



НКТМ
РАН



N*



VII Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых учёных

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

г. Сочи

Научно-технологический университет «Сириус»
5–14 сентября 2022 г.

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

г. Сочи

Научно-технологический университет «Сириус»
5–14 сентября 2022 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Министерство науки и высшего образования РФ
Сибирское отделение РАН

Национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Новосибирский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Морской гидрофизический институт РАН

Научно-технологический университет «Сириус»

Российский научный фонд

ПАО «Газпром нефть»

СИРИУС
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

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

Оргкомитет и участники конференции благодарны
Министерству науки и высшего образования Российской Федерации
за финансовую поддержку в рамках Соглашения № 075-15-2021-575

Министерство науки и высшего образования РФ
Сибирское отделение РАН
Национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирский государственный университет
Новосибирский государственный технический университет
Морской гидрофизический институт РАН
Научно-технологический университет «Сириус»
Российский научный фонд
ПАО «Газпром нефть»

VII Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых учёных

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

г. Сочи
Научно-технологический университет «Сириус»
5–14 сентября 2022 г.

Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

г. Сочи
Научно-технологический университет «Сириус»
5–14 сентября 2022 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск 2022

Сборник содержит тезисы докладов VII Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2022) и, проводимой в рамках этой конференции, научной молодёжной школы «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (ТФГСВ2022). Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Сочи. Организаторами конференции выступают: Министерство науки и высшего образования РФ, Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Научно-технологический университет «Сириус», Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Морской гидрофизический институт РАН, ПАО «Газпром нефть». Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах; гидродинамика и теплообмен в многофазных системах; фазовые переходы; научные основы нефтегазовых технологий; гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы; численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике; методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента; теплофизические свойства веществ и новые материалы; теплообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах; электрофизические явления в газовых и жидких средах; теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

Заместитель

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

Марчук И.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Технический комитет

Смовж Д.В., к.ф.-м.н.

Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.

Чернякова О.В.

ООО «МКС» конгресс-организатор

Учёный секретарь

Наумкин В.С., к.ф.-м.н.

Научный комитет

Алексеев С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Батаев А.А., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Васильев А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Губайдуллин А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТПМ СО РАН, Тюмень)

Дёмышев С.Г., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Елистратов С.Л., доцент, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Исаев С.А., профессор, д.ф.-м.н. (СПбГУГА, Санкт-Петербург)

Кабов О.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Кедринский В.К., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Коротаев Г.К., чл.-корр. РАН (МГИ РАН, Севастополь)

Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Кузнецов В.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куперштох А.Л., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Леонтьев А.И., академик РАН (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва)

Павленко А.Н., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Пруэлл Э.Р., к.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Пухначёв В.В., чл.-корр. РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Рыжков А.Ф., профессор, д.т.н. (УрФУ, Екатеринбург)

Самодуров А.С., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Смовж Д.В., к.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Станкус С.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.И., профессор, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.В., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Федорук М.П., академик РАН (НГУ, Новосибирск)

Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Хасанов М.М., д.т.н. (Газпром нефть, директор по науке)

Цвелодуб О.Ю., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Чернов А.А., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Christos Markides, PhD (Imperial College London, UK)

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.

За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.



Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ
ГИДРОДИНАМИКА:
СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ



АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ВИХРЕВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Исаев С.А.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: isaev3612@yandex.ru

Вихревые технологии [1] приобрели междисциплинарный характер. Прорывные результаты получены при разработке энергоэффективных структурированных поверхностей [2–19].

Открыто явление интерференции потока, взаимодействующего с наветренной кромкой наклонной канавки на обтекаемой пластине и стенке узкого канала, и сгенерированного на входе в канавку смерчеобразного вихря, которое сопровождается ультравысоким перепадом давления между зонами торможения и разрежения. До двух раз растет скорость возвратного течения, а скорость вторичного течения достигает величин, превышающих среднemasсовую скорость.

Обоснованы аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на энергоэффективных поверхностях с многократным (до 6–9 раз) увеличением относительного трения и тепловых потоков внутри канавок, а также ускорение пристеночного потока однорядными наклонными канавками особенно в узких каналах (более 1.5 раз).

Выполнено аэродинамическое проектирование новых структурированных лунками и канавками энергоэффективных поверхностей.

Список литературы

1. Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеев, Э.П. Волчок и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350 с.
2. Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int.J.HMT. 2017. Vol.109. P. 40–62.
3. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y. and Popov I. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. EHT. 2018. V. 25. No.6. P.579–604.
4. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I. and Sudakov A. Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Energies. 2019. V. 12. No. 1296. P. 1–24.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф., Леонтьев А.И., Попов И.А., Щелчков А.В., Миронов А.А., Скрыпник А.Н. Теплообменная поверхность. Патент РФ. RU 2716958 C1, МПК F28F 3/04 (2006.01). Заявка 2019124260, 26.07.2019 опубликована 17.03.2020 Бюл. № 8.
6. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклонными овально-траншейными лунками // ПЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 9. С. 73–80.
7. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклонными овальными лунками // ИФЖ. 2018. Т.91. №4. С.1022–1034.

8. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int.J.HMT. 2019. V. 134. P. 338–358.
9. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Попов И.А. Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов // Энергетика. 2020. № 4. С. 3–10.
10. Isaev S., Gritkevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 (Part.A). P. 202–207.
11. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. №5. С. 797–800.
12. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклонных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. №5. 697–702.
13. Isaev S.A., Gritkevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. HMT. 2019. V. 145. P.118737.
14. Исаев С.А., Мазо А.Б., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г. Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овально-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // ПЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 21. С.18–21.
15. Mironov A., Isaev S., Skrypnik A. and Popov I. Numerical and Physical Simulation of Heat Transfer Enhancement Using Oval Dimple Vortex Generators —Review and Recommendations // Energies. 2020. V. 13. P. 5243.
16. Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами // ТПТ. 2020. Т. 12. №9. С. 386–402.
17. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклонными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 116–125.
18. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Интенсификация отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ИФЖ. 2021. Т. 94. №1. С. 160–168.
19. Исаев С.А., Судаков А.Г., Чорный А.Д., Жукова Ю.В., Усачов А.Ю. Интенсификация теплообмена в микротрубе с коридорным пакетом сферических и наклонных овально-траншейных лунок при прокачке трансформаторного масла // ТВТ. 2019. Т. 57. №6. С. 866–869.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке
РФФИ (грант №21-58-52013, теоретический анализ)
и РНФ (грант №22-19-00056, экспериментальное
обоснование)*

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И 3D ПРОТОТИПИРОВАНИЯ****Кудияров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Пушилина Н.С.**

Томский политехнический университет

e-mail: Kudiyarov@tpu.ru

Хранение водорода в металлгидридных системах представляет важность для развития водородной энергетики. Абсорбция в баллоне с гидридом металла представляет собой экзотермический процесс, вызывающий повышение температуры твердого вещества. С более высокими температурами связаны большие значения равновесного давления. В результате движущий потенциал снижается, задерживая время начала и снижая скорость реакции преобразования металла в его гидрид. Кроме того, эффективность металлгидридного баллона может снижаться из-за кризиса тепломассопереноса. Следовательно, необходима эффективная система подвода и отвода тепла в системе, чтобы обеспечить возможность использования всего реагента в металлгидридном аккумуляторе. При проектировании металлгидридного баллона наиболее важно рассмотреть теплопередачу от теплообменника к металлгидриду, а также возможные колебания температуры при циклах зарядки/разрядки баллона.

Порошок гидрида характеризуется недостаточной передачей тепла от одной частицы порошка к другой, что может приводить к неравномерному и неполному выходу водорода при разрядке баллона. В таком случае необходимо увеличивать объем соприкосновения порошка гидрида с теплообменником, однако при этом будет уменьшаться количество материала, сорбирующего водород, что негативно скажется на емкости баллона. Для решения этих проблем необходимо проанализировать широкий спектр вопросов теплопередачи, связанных с процессом проектирования, чтобы выбрать наиболее подходящую конфигурацию теплообменника. В этой связи, актуальным является разработка и оптимизация теплообменных элементов металлгидридных систем хранения водорода с использованием методов цифрового моделирования и 3D-прототипирования.

В литературе встречаются различные подходы к моделированию процессов сорбции и десорбции водорода, основанные на относительно простых математических моделях, таких как одномерное нестационарное уравнение диффузии или уравнениями тепло- и массопереноса, а также на более сложных, где учитывается изменение удельного объема металлгидридного слоя. Так как расчет работы металлгидридных баллонов является сложной научно-математической проблемой из-за необходимости учета химических превращений в пористой среде, используется упрощенная математическая модель, позволяющая предусмотреть эксплуатационные характеристики баллона без решения сложных задач теплообмена.

Для решения задач теплопроводности были проанализированы современные платформы, основанные на численных методах решения дифференциальных

уравнений с частными производными – методе конечных элементов в частности. В качестве основного инструмента в данной работе была выбрана совокупность программных средств фирмы ANSYS, состоящая из обширного семейства удобных, многоцелевых расчетных кодов, имеющих много общего и призванных удовлетворять потребности пользователя в решении обширного круга инженерных задач, в том числе задач теплопроводности.

В настоящей работе с помощью методов цифрового моделирования в пакете программных средств фирмы ANSYS было исследовано несколько геометрий теплообменника, выполненного из меди. Была определена оптимальная конфигурация теплообменника, а также вычислена скорость заполнения водородом металлгидридного баллона с теплообменником и без него. Приводятся результаты расчетов полей температуры. Оптимизация геометрии теплообменника проводилась с целью получения минимального времени разрядки/зарядки баллона, а также максимального удельного количества тепла, подводимого/отводимого к засыпке металлгидрида. В качестве параметров оптимизации были исследованы такие параметры, как толщина теплообменной трубки, расстояние между трубками (шаг), а также расположение трубок в металлгидридном баллоне.

Для конструирования теплообменников потенциально могут применяться аддитивные технологии. Благодаря аддитивным технологиям возможно проектировать эффективные теплообменники сложной формы с характеристиками лучше, чем у аналогов, изготовленных с использованием традиционных методов изготовления. Чтобы показать принципиальную возможность изготовления теплообменного аппарата для металлгидридного баллона, в данной работе с помощью методов 3D-прототипирования было реализовано несколько моделей медного теплообменника. Осаждение осуществлялось плавлением и переносом проволоки меди на подложку из нержавеющей стали AISI 321 в вакуумной камере при помощи электронного луча. Разработана методика и подобран оптимальный режим 3D-печати для изготовления медных теплообменных элементов. Показана зависимость свойств теплообменника от выбранной геометрии, а также от погонной энергии Q процесса 3D-печати. Проведены испытания выбранных теплообменников в металлгидридных системах хранения водорода.

На основании проведенного комплексного изучения методами цифрового моделирования и 3D-прототипирования свойств теплообменников выполнена оптимизация металлгидридных систем хранения водорода.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-29-01280)*

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА
ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ****Кузнецов В.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Водород является перспективным теплоносителем низкоуглеродной экономики. В связи с принятой программой использования водорода в энергетике и на транспорте, большое значение приобретает разработка технологий каталитической конверсии углеводородного топлива для получения водорода в компактных реакторах-теплообменниках, интегрированных с топливными элементами. Процессы конверсии в реакторах-теплообменниках происходят в неизотермических условиях, поэтому оптимизация теплового режима является критически важной для повышения их энергетической эффективности [1]. Целью настоящей работы является рассмотрение физико-химических и тепловых процессов при конверсии углеводородных газов в микроструктурных реакторах-теплообменниках на основе микроканалов и разработка предложений по созданию энергоэффективных реакторов-теплообменников, которые могут быть интегрированы с топливными элементами для выработки электроэнергии и тепла.

Разработаны методы получения водорода при каталитической конверсии широкого спектра природных и возобновляемых углеводородов и их производных в неизотермических условиях в микроканальных реакторах-теплообменниках. Для компактных каталитических систем наиболее эффективными способами получения, обогащенного водородом синтез-газа и чистого водорода, является паровая и автотермическая конверсия метана в микроструктурных реакторах-теплообменниках, называемых топливными процессорами, позволяющих значительно интенсифицировать процессы теплообмена в каналах малого размера и увеличить загрузку катализатора. Использование микроканальных технологий позволяет в значительной степени устранить диффузионные ограничения на скорости реакций и интенсифицировать процесс конверсии. Преимущества микроканальных реакторов наиболее полно проявляются в случае экзотермических или эндотермических реакций, когда необходимо регулирование температуры катализатора для управления составом продуктов конверсии.

Экспериментально изучены теплофизические и физико-химические процессы в микро- и наноразмерных системах, синтезированы многокомпонентные каталитические наноразмерные структуры на основе родия, палладия и кобальта, разработаны методы их применения в аппаратах водородной энергетики. Выполнен цикл экспериментальных исследований паровой и автотермальной конверсии углеводородов и спиртов в микроканальных реакторах-теплообменниках в условиях управляемого теплового режима. Развита теория высокоинтенсивных хи-

мических превращений при конверсии углеводородов. разработана математическая модель конверсии углеводородов, определена кинетика и полнота реакций. Обнаружено сильное воздействие тепловых и диффузионных процессов на скорость и последовательность многостадийных гетерогенных реакций в микроканальных реакторах, разработаны методы управления процессом конверсии.

Исследованы многостадийные физико-химические превращения при конверсии углеводородов в неизотермических условиях в каталитических микроструктурных топливных процессорах, предложены методы интегрирования потоков тепла и продуктов реакций в энергоустановках водородной энергетики для повышения их эффективности. Полученные результаты открывают возможности для создания компактных систем получения водорода для перспективных энергетических систем на основе комбинированных микро и нанотехнологий.

При разработке компактных интегрированных систем производства и потребления водорода большое значение имеет снижение концентрации оксида углерода в продуктах конверсии и разработка методов удаления двуокиси углерода для последующей утилизации. Экспериментально и численно изучены процессы паровой конверсии оксида углерода и разработаны реакторы конверсии с переменным полем температуры, что позволяет применить одностадийные аппараты конверсии и повысить их энергоэффективность. Изучена абсорбция двуокиси углерода при газожидкостном течении в микроканалах, предложены микроканальные абсорберы, позволяющие удалять двуокись углерода из продуктов конверсии.

Рассмотрены перспективы крупномасштабного производства водорода на основе паровой конверсии природного газа в установках атомно-водородной энергетики с использованием тепла высокотемпературного газоохлаждаемого реактора.

Разработан новый подход к проведению низкотемпературного синтеза Фишера-Тропша в микроструктурном многофазном реакторе, обоснована концепция интегрированных энергоустановок водородной энергетики и систем получения синтетического жидкого топлива из природного газа и биогаза.

Список литературы

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

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

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО И ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Мильман О.О.^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»,
248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, 26

²ЗАО НПВП Турбокон,
248010, г. Калуга, ул. Комсомольская роща, 43

e-mail: turbocon@kaluga.ru

Важнейшее направление совершенствования экологических параметров – производство, транспортировка и использование водородного топлива. Привлекательным в этом плане так же представляется использование водорода в смеси с природным газом для трубопроводного транспорта его внутри России и за рубеж.

1 Метано-водородная смесь как топливо

В таблице приведены характеристики теплотворной способности некоторых углеводородов при давлении 1 бар и температуре 0°C.

Газ	Плотность кг/м ³	$Q_B^P \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$Q_H^P \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$
Водород	0,083	141,9	11,80
Метан	0,66	55,6	36,7
Пропан	1,85	50,37	93,2

Из таблицы следует, что замещение части объема природного газа водородом приведет к заметному снижению тепловой энергии, заключенной в одном кубометре топлива. При перспективном соотношении водород – газ 30%/70% теплотворная способность топлива уменьшится в $k_w=1,26$ раза, т.е. для реализации тепловых процессов во столько же увеличится объем поставляемого топлива и скорость потока в трубе.

2 Эмиссия оксида углерода

Водородное топливо обладает безусловным достоинством: нет выбросов CO₂, тогда как все углеводороды дают углеродный след на 1 МДж тепловой энергии: уголь 0,122 кг/МДж, метан 0,05 кг/МДж, пропан 0,06 кг/МДж.

Присутствие водорода в смеси уменьшает выбросы CO₂, но из-за роста необходимого расхода топлива в расчете на 1 МДж тепла этот эффект заметно снижается. Например, что при объемной доле водорода 30% уменьшение эмиссии CO₂ (с учётом необходимого увеличения объемного расхода топлива) составит лишь ~12%.

3 Трубопроводный транспорт метано-водородной смеси

В отличие от природного газа смесь с водородом существенно легче. Например, при объемной концентрации водорода 30% $\rho_{см}$ окажется меньше в $k_p=1,36$ раза. При этом объемный расход и следовательно, скорость перекачки газа для достижения заданного энергетического потока необходимо увеличить в

$k_w=1,26$ раза. Тогда, можно утверждать, что относительные потери давления на транспорт (и напор нагнетателей) изменяются в отношении

$$\Delta \bar{p} = \frac{k_w^2}{k_p} = \frac{1,26^2}{1,36} = 1,17$$

Работа сжатия единицы массы смеси водорода с природным газом с учетом необходимого повышения напора увеличивается в ~1,6 раза, потребляемая мощность для обеспечения заданного энергопотока – в $\bar{N} \sim 1,5$ раза, или он уменьшится при существующем оборудовании.

4 Использование водорода для повышения эффективности цикла паросиловой установки

Сегодня это направление работ связывают с режимом работ АЭС: использование провалов электропотребления с производством и накоплением водорода. Здесь водород и кислород сжигаются в водяном паре после котла и повышают начальную температуру и эффективность цикла паросиловой установки.

Реализация цикла с водородным перегревом пара имеет особенность, которая представлена на рис. 1.

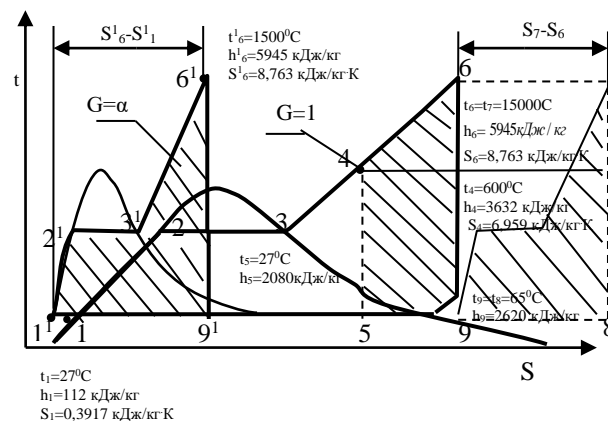


Рис. 1. К расчету эффективности водородной надстройки
 $P_0 = 9 \text{ МПа}, T_0 = 1500^\circ\text{C}$

Продукты сгорания дополнительного цикла $G=\alpha$ образованы из водорода и кислорода, который не участвует в основном потоке $G=1$, где существенную роль в повышении КПД играет система регенерации. Иными словами, с ростом температуры КПД растет, но не так быстро, как это предполагалось.

Путь реального совершенствования экологии ТЭС – повышение КПД, энергосбережение, когенерация.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПЛАСТ

Рига В.Ю.¹, Турунтаев С.Б.^{1,2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва

² ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва

e-mail: s.turuntaev@me.com

Проблема прогнозирования реакции подземных флюидных систем на техногенное воздействие приобретает все большую значимость в связи с начавшимся во всем мире широким введением в эксплуатацию нетрадиционных месторождений нефти и газа и реализацией проектов по использованию геотермальных источников энергии. И в одном, и в другом случае предполагается проведение массовых гидравлических разрывов пластов (для повышения дебитов на месторождениях углеводородов, получения перегретой воды, для увеличения приемистости закачивающих скважин). Проведение многостадийных гидроразрывов является основным методом разработки сланцевых месторождений углеводородов, а также залежей в доманиковской и баженовской свитах в России.

В последние годы повысился интерес к возможностям использования микросейсмического мониторинга для получения дополнительной информации о механических свойствах коллекторов, о сейсмодинамических и флюидодинамических процессах, происходящих в них. Наиболее широко сейсмический мониторинг используется для оперативного определения положения трещины гидроразрыва пласта. Иногда закачка жидкости вызывает землетрясения, причем индуцированная сейсмичность наблюдается на расстояниях до десятка километров от закачивающей скважины, и на глубинах, отличных от глубины закачки. Появились и работы, показывающие возможность использования данных микросейсмического мониторинга для оценки проницаемости пласта.

В докладе рассматриваются примеры возникновения сейсмичности, связанной с воздействием на подземные флюидные системы, предлагается модель возникновения сейсмических событий при закачке, приводятся примеры результатов расчетов по предложенной модели.

Механистической моделью систем трещин и разломов [1] является набор блоков, соединенных упругими связями друг с другом и с некоторой плоскостью, движущейся с постоянной скоростью. Блоки испытывают трение со стороны неподвижной плоскости. В работах [2, 3] показано, что трение в такой системе может быть описано при помощи уравнения типа gate-state, согласно которому величина силы трения зависит от скорости и параметра состояния контакта на разломе. Алгоритм расчета сейсмичности, вызванной закачкой жидкости, рассмотрен в работе [4].

Рассматривались две ситуации:

1. сейсмические события, возникающие при закачке жидкости в среду с естественной трещиноватостью, которая моделировалась случайным од-

нородным распределением трещин, каждая из которых состояла из трех элементов;

2. подвижки по разлому, возникающие при закачке жидкости на некотором расстоянии от него.

При моделировании первой ситуации использовались данные по сейсмичности, вызванные реализацией Базельского геотермального проекта, вторая ситуация моделировалась на основе результатов натурного эксперимента по закачке воды в разлом на юге Франции.

Расчеты, выполненные с использованием характеристик пород и условий закачки в ходе реализации Базельского геотермального проекта, позволили получить результаты, качественно и количественно близкие к наблюдавшейся сейсмичности. Было показано, что, в зависимости от свойств среды, может наблюдаться как постепенный спад индуцированной сейсмической активности после ее начального увеличения, вызванного закачкой жидкости, так и возрастание активности индуцированной сейсмичности спустя некоторое время после прекращения закачки.

Рассмотрены случаи, когда закачка осуществляется в скважину, находящуюся на небольшом удалении от разлома (от 4 до 8 м) или в разломе. Изучалось влияние неоднородности фрикционных свойств разлома на результирующую подвижку. Были проведены серии расчетов, в которых менялись скорость закачки (от 1.5 до 8 л/мин), кумулятивный объем закачанной воды (от 20 до 80 м³). Показано, что определяющими параметрами, влияющими на параметры подвижки по разлому, являются расход, расположение зоны разупрочнения на разломе по отношению к скважине, параметры закона трения. Последние играют ключевую роль в вопросе возможности возникновения сейсмического скольжения.

Полученные результаты могут быть использованы для построения реалистичных сценариев развития сейсмической активности в районах воздействия на подземные флюидные системы.

Список литературы

1. Barridge R., L. Knopoff. Model and theoretical seismicity // Bull. Seismol. Soc. Of America. 1967. V. 57 No. 3. P. 341–371.
2. Dieterich, J. H., Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // J. Geophys. Res. 1979. 84(B5). P. 2161–2168.
3. Gu J-C., Rice J.R., Ruina A.L., Tse S.T. Slip motion and stability of a single degree of freedom elastic system with rate and state dependent friction // Apl. Mech. Phys. Solids. 1984. V. 32, No 3, P. 167–196.
4. McClure M.W. Modeling and characterization of hydraulic stimulation and induced seismicity in geothermal and shale gas reservoirs // Doctoral dissertation. Stanford University. 2012.

ПРИРОДА ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА**Фомин П.А., Николаев Ю.А.**

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск, Россия

Сделан обзор выполненных авторами результатов исследований природы Тунгусского взрыва, серебристых облаков и озонных «дыр».

Показано, что в основе Тунгусского события лежит детонация тороидального облака, образованного разовым выбросом газообразного метана (имеющего газогидратную природу) в атмосферу. Взрыв инициирован относительно небольшим, полого летевшим метеоритом, скорость которого к моменту инициирования замедлилась до нескольких километров в секунду. Указана область, откуда произошел выброс.

Рассчитаны возможные траектории метеорита, оценены его максимальный и минимальный размеры. Определено наиболее вероятное место его падения.

Выполнен модельный эксперимент по вывалу леса (взрыв детонирующего шнура в форме кольца над «лесом» из проволочек). Результаты эксперимента были статистически обработаны. Показано, что вывал проволочек полностью идентичен вывалу леса при Тунгусском взрыве.

Показано, что природа серебристых облаков, озонного слоя и озонных «дыр» связана с цепным

окислением водорода в верхних слоях Атмосферы. Дано объяснение световым, акустическим и атмосферным явлениям (увеличение яркости серебристых облаков над северной Европой после взрыва, нарушения озонного слоя, магнитная буря), связанным с Тунгусским событием.

Объяснено отсутствие значительного количества метеоритного вещества в области эпицентра. Сделана оценка характерного размера микрокапель, сорванных с расплавленной поверхности метеорита (и, соответственно, характерный размер микрочастиц метеоритного вещества, найденного в районе взрыва). Оценена возможная скорость вращения метеорита и связанное с ней изменение его траектории. Проанализирована вероятность взрывов наподобие Тунгусского.

Совокупность полученных результатов подтверждает рассматриваемую гипотезу, не противоречит известному фактическому материалу и физически корректно объясняет все особенности Тунгусского явления.



СЕКЦИЯ 1

Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах



ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА И ГЛУБИНЫ СОТ НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С СОТОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

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

e-mail: andreybarsukov96@gmail.com

Развитие технологий, способствующих интенсификации теплообмена энергетических установок в сферах авиа и автомобилестроения, микроэлектроники, в холодильной и пищевой промышленности и пр., является одним из приоритетных направлений во всем мире. Важное место среди них занимают пассивные методы управления теплообменом: лунки [1], ребра [2], уступы [3] и т.д. Так, использование сотовой поверхности в качестве вихрегенератора позволяет добиться существенного увеличения теплообмена, при умеренном увеличении гидравлического сопротивления. В частности на таких поверхностях при определенных условиях может возникать эффект проскальзывания [4]

В настоящей работе проведены расчеты отрывного турбулентного потока в плоском канале с сотовой поверхностью при варьировании глубины сот ($0.1-2S$, S – характерный размер сот) и числа Рейнольдса ($5\,000-15\,000$), рассчитанному по ширине канала и среднерасходной скорости. Расчетная область и сетка представлена на рисунке 1. На боковых стенках были заданы циклические граничные условия. На всех стенках был задан постоянный тепловой поток, численное моделирование было проведено методом RANS с использованием решателя simpleFoam из пакета OpenFoam.

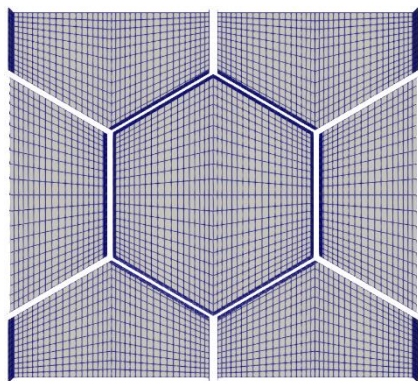


Рисунок 1. Схема расчетной области

В работе представлено подробное численное исследование усиления теплообмена при размещении сотовой поверхности в канале. Полученные результаты расчетов отрывного обтекания сотовой поверхности большой глубины согласуются с экспериментальными данными [5]. Подробно исследованы локальные и интегральные характеристики турбулентного течения и теплообмена в сотах в диапазоне значений глубины и числа Рейнольдса. Было получено распределение локального числа Нуссельта (рис 2). Исследовано влияния отношения глубины к диаметру и числа Рейнольдса на течение, вклад различных частей поверхности теплообменника в повышение теплоотдачи.

кальные и интегральные характеристики турбулентного течения и теплообмена в сотах в диапазоне значений глубины и числа Рейнольдса. Было получено распределение локального числа Нуссельта (рис 2). Исследовано влияния отношения глубины к диаметру и числа Рейнольдса на течение, вклад различных частей поверхности теплообменника в повышение теплоотдачи.

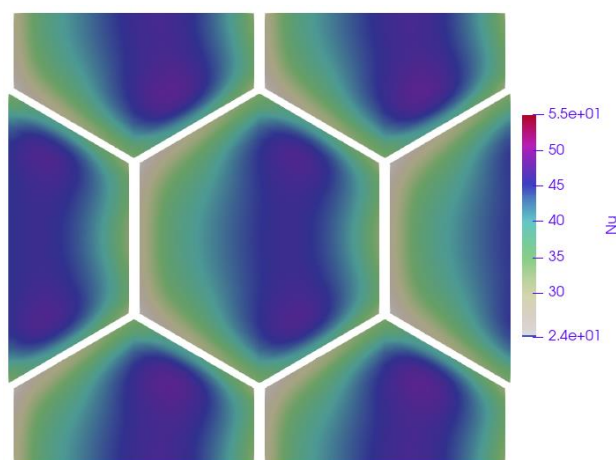


Рисунок 2. Распределение числа Нуссельта на сотовой поверхности ($Re = 10\,000$, $d/S = 0.1$)

Список литературы

1. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // International Journal of Heat and Mass Transfer 2009. V.53. pp 178-197
2. Weihing P, Younis B A, Weigand B Heat transfer enhancement in a ribbed channel: Development of turbulence closures //Int. J. Heat Mass Transfer 2014. V. 76 pp 509-522
3. Chovet C., Lippert M., Foucaut J.-M., Keirsbulck L. Dynamical aspects of a backward-facing step flow at large Reynolds numbers// Exp Fluids 2017. V. 58 162
4. Ковальногов Н.Н. Модель турбулентного переноса в пограничном слое на перфорированной поверхности с глухими демпфирующими полостями // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 5–6. С. 41–47.
5. Терехов В.И., Смольский Я.И., Шаров К.А., Золотухин А.В. Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика 2014. Т. 21, №6

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00162).

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМИТАРОВ РАСПЛАВА СОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К РЕАКТОРНЫМ УСТАНОВКАМ IV ПОКОЛЕНИЯ

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

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

e-mail: belavinaea@gmail.com

Запас обогащенного урана – основного топливного ресурса, используемого в ядерных реакторах (ВВЭР, БН, PWR, BWR) ограничен и поиск его замены – это вопрос времени. Другой проблемой, тесно связанной с ограниченностью урана является создание альтернативных реакторных установок, которые помимо эффективности, будут отвечать всем требованиям безопасности. Перспективным вариантом в этой области может послужить реактор с расплавом солей, который входит в перечень конструкций реакторов IV поколения и является потенциально обладающим наибольшей пассивной безопасностью из шести моделей, рассмотренных в рамках данной концепции.

Жидкосолевые теплоносители имеют высокую температуры плавления и ограниченный набор конструкционных материалов. Их эксплуатация накладывает ограничение на рабочий диапазон температур, в котором возможно их использование (около ста градусов). Подобная специфика усложняет экспериментальную работу с ними, но при этом требует достаточно точного знания не только средних, но и локальных характеристик теплообмена. Решить возникшее противоречие можно путем модельных экспериментов на базе имитаторов реальных рабочих сред, которые имеют схожие теплофизические свойства, но при этом просты и понятны в эксплуатации. Работа в этой области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ» – ОИВТ РАН.

Одной из задач данного исследования является вопрос рассмотрения ряда численных и экспериментальных исследований особенностей теплообмена в условиях смешанной и естественной конвекций под действием массовых сил различной природы, применительно к идее «жидкой» активной зоне ЖСР, которую формирует гомогенная расплавленная смесь из фторидов солей и фторида урана, плутония или тория. Эта же топливная композиция служит теплоносителем первого контура. В качестве модельной жидкости рассматривались водные растворы КОН с массовой концентрацией в 3,4, 20 и 30 процентов. Также был проведен ряд опытов по подбору альтернативных рабочих сред с 10- процентными водными растворами ZnSO₄, MgSO₄, K₂SO₄, CuCl, Na₂CO₃, Na₂SO₄, NaCl со схожими теплофизическими свойствами к реальным теплоносителям. В рамках работы сделан анализ существующей литературы, подтверждающий актуальность дальнейших исследований. Для изучения поведения естественной конвекции был создан экспериментальный стенд, состоящий из тестовой ячейки и медных платин, пропускание тока через которые моделирует объемное тепловыделение. Максимальная тепловая нагрузка, реализуемая

в эксперименте, составила 800 кВт/м³. В ходе работы была выявлена сильная зависимость электропроводности от температуры, что может привести к неоднородности тепловыделения и, соответственно, получению сложной картины неудобной для дальнейшей интерпретации, построены распределения полей температуры и потенциала. Приведенный анализ подтвердил, наиболее перспективным вариантом остается раствор КОН.

С целью анализа особенностей смешанной конвекции в условиях, приближенных к реальным термоядерным и гибридным установкам, проведена серия экспериментальных исследований в вертикальном и горизонтальном положениях трубы в условиях однородного обогрева ($Gr=2,7 \cdot 10^6 - 3,9 \cdot 10^7$) и поперечного магнитного поля ($Ha=17$) при режимных параметрах, соответствующих переходным режимам течения ($Re=3000-7000$) и развитой турбулентности ($Re=14000-20000$) [1, 2] с использованием модернизированного солевого контура РК-3 [2]. Модельная жидкость – 30% водный раствор КОН. Вторичные вихревые структуры обладают неустойчивостью в каналах прямоугольной геометрии. С целью верификации данных выводов, было проведено исследование в вертикальном канале с односторонним обогревом ($Gr=1,7 \cdot 10^9 - 1,1 \cdot 10^{10}$) и компланарным магнитным полем ($Ha=15-30$) при переходных режимах течения ($Re=8000$) и развитой турбулентности ($Re=12000$). Модельная жидкость-20-процентный водный раствор КОН. С целью сопоставления результатов, полученных для горизонтальной трубы с результатом для прямоугольных каналов, проведено исследование в области развитой турбулентности ($Re=11000-12000$), а также в переходных режимах ($Re=8000$) с заданным тепловым потоком на обогреваемой стенке ($Gr=1,7 \times 10^9 - 1,0 \times 10^{10}$). Полученные зависимости качественно совпадают с прогнозируемыми результатами и с численным моделированием [3].

Список литературы

1. Belyaev I.A et al. Experimental study of molten salt mixed convection in a pipe affected by transverse magnetic field // MHD, 2019, V. 55 No 1/2, P. 241–250
2. Belyaev I.A et al. Heat transfer in the mixed convection of the molten salt in the presence of magnetic fields. ТРНЛ, 2019, V. 45 No 5, P. 499–502
3. Белавина Е.А. и др. Исследование теплогидравлики имитатора расплава соли при течении в канале в условиях неоднородного обогрева // ВАНТ ЯРК, 2021, 4, с. 82–97

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и Высшего Образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01056-22-00)

БИФУРКАЦИИ, НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ И ЛАГРАНЖЕВА ДИНАМИКА ДВУМЕРНЫХ ДВОЯКОПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Вертегейм И.И.¹, Сагитов Р.В.², Шарифулин А.Н.³, Закс М.А.⁴

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

⁴ Университет им. Гумбольдтов, Берлин

e-mail: wertg@icmm.ru

Представлены результаты аналитического и численного исследования семейства плоских течений несжимаемой жидкости, вызванных двоякопериодической в пространстве движущей силой. Неустойчивость возникает при значениях параметров, соответствующих вытянутым прямоугольным ячейкам периодичности, в стороны которых укладывается несколько периодов силы [1]. На основе иерархии разложений Фурье-Галеркина с разным числом мод и метода сеток исследуются нелинейные режимы течения, строятся бифуркационные диаграммы с изменением безразмерных параметров: прокачки Re_x , Re_y , амплитуды внешней силы λ и пространственных периодов в двух направлениях. В закритической области обнаружено большое количество вторичных и третичных мод различного типа в зависимости от определяющих параметров задачи. Общая картина и разнообразие бифуркаций основного решения определяются в основном величиной прокачки Re_x по направлению x , соответствующему максимальной стороне ячейки периодичности. При слабой прокачке чередуются вторичные стационарные течения, при более сильной устанавливаются автоколебания. Они могут появляться либо как результат бифуркации Андронова-Хопфа основного решения [2] при достаточно больших значениях Re_x и амплитуды силы λ , либо в области их промежуточных значений как результат разрушения седлоузловой гомоклинической траектории (бифуркация SNIC). Переход к этим сверхкритическим режимам течения существенно влияет на поведение лагранжевых переменных, в частности, за счет появления зависимости характеристик течения от времени. Это приводит при достаточно больших амплитудах силы к хаотическому поведению лагранжевых траекторий с непрерывным спектром вместо менее выраженного и более экзотического сингулярно-фрактального спектра для стационарного решения. Случай стационарного решения аналогичен интегрируемой гамильтоновой динамике с одной степенью свободы, где функция тока играет роль гамильтониана, а фрактальный спектр мощности и алгебраически убывающая автокорреляция лагранжевых наблюдаемых представляют собой наиболее сложный вариант динамики.

Монотонные неустойчивости основного течения не вносят качественных изменений в эту картину: они (так же как и бифуркация SNIC) порождают новые устойчивые стационарные поля скорости. При этом любое стационарное течение, вне зависимости от деталей его структуры, характеризуется числом

вращения $\rho = Re_x/Re_y$ и разбивается на глобальную и локализованные компоненты, а лагранжевы наблюдаемые в случае иррационального ρ демонстрируют декорреляцию и слабую неупорядоченность во времени.

Совершенно иной характер носят перемены, вызываемые колебательной неустойчивостью основного течения. Такая неустойчивость наблюдается в широком диапазоне параметров, что приводит к появлению зависящего от времени вторичного течения (периодического в эйлеровых переменных). Периодическими по времени являются и режимы, рождающиеся с конечной амплитудой в результате бифуркации SNIC. Фазовое пространство системы, описывающей динамику лагранжевой частицы в периодически зависящем от времени плоском поле скорости, трёхмерно. Поскольку система сохраняет фазовый объем, ее типичные траектории экспоненциально неустойчивы [3]. Это явление – хаотическая динамика частиц жидкости в полях скорости с простыми эйлеровыми свойствами – известно как «лагранжев хаос» или «хаотическая адвекция» [4]. Этот режим характеризуется наличием абсолютно непрерывной составляющей в спектре мощности и экспоненциальным затуханием автокорреляции. Оценивается изменение свойств спектров мощности и временных корреляций поля скоростей для лагранжевой динамики в нелинейных стационарных и нестационарных вторичных режимах. Для стационарных решений исследуются условия сохранения аномальных свойств спектра, при малых амплитудах колебаний прослеживаются промежуточные асимптотики от фрактального спектра к непрерывному спектру.

Список литературы

1. Wertgeim I. I., Zaks M. A., Sagitov R. V., Sharifulin A. N. Stability and nonlinear secondary modes of double-periodic flows with pumping//Journal of Physics: Conference Series, 1675 (2020) 012002. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1675/1/012002
2. Zaks M., Pikovsky A., Kurths J. Steady viscous flow with fractal power spectrum//Phys. Rev. Lett., 1996. V.77. P. 4338-4341.
3. Arnold V. I. Sur la Géométrie Différentielle des Groupes de Lie de Dimension Infinie et ses Applications a l'Hydrodynamique des Fluides Parfaits//Annales de l'Institut Fourier. 1966. V. XVI. P. 319–361.
4. Aref H. Stirring by Chaotic Advection. J. Fluid Mech. 1984. V. 143. P. 1–21.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ в рамках совместного российско-германского
проекта 20-51-12010 ННИО_a*

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РЕЗОНАНСНАЯ КОНВЕКЦИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ

Вяткин А.А.¹, Козлов В.Г.¹, Сабиров Р.Р.²

¹ Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

e-mail: vjatkina_aa@pspu.ru

Тепловая конвекция в переменных силовых полях является предметом большого числа исследований [1,2]. Модуляция силовых полей может генерировать конвективные потоки вибрационной или параметрической резонансной природы [3]. Во вращающихся полостях переменные силовые поля при определенных условиях выступают источником специфических явлений, например, инерционных волн и возбуждаемой ими осредненной конвекции [4]. Исследование тепловой конвекции в осциллирующих силовых полях имеет большое прикладное значение и связано, в том числе, с развитием космических технологий [5].

В работе экспериментально исследуется тепловая конвекция жидкости в толстом горизонтальном цилиндрическом слое при вращении. Внутренняя граница слоя имеет более высокую температуру. Кювета совершает быстрое вращение, при этом жидкость устойчиво стратифицирована в центробежном силовом поле. Подробное описание экспериментальной установки и методики исследования представлено в [6].

При горизонтальном расположении оси вращения поле силы тяжести осциллирует в системе отсчета полости, возмущая поле центробежной силы инерции. Обнаружено, что модуляции силового поля являются источником параметрических колебаний жидкости. Последние возбуждаются пороговым образом при понижении скорости вращения полости. Колебания жидкости происходят с частотой в два раза меньшей частоты вращения полости. Конвективные течения представляют собой двумерные валы, вытянутые вдоль оси вращения (Рис. 1 а). За один период вращения каждый вал меняет направление вращения на противоположное (Рис. 1 б).

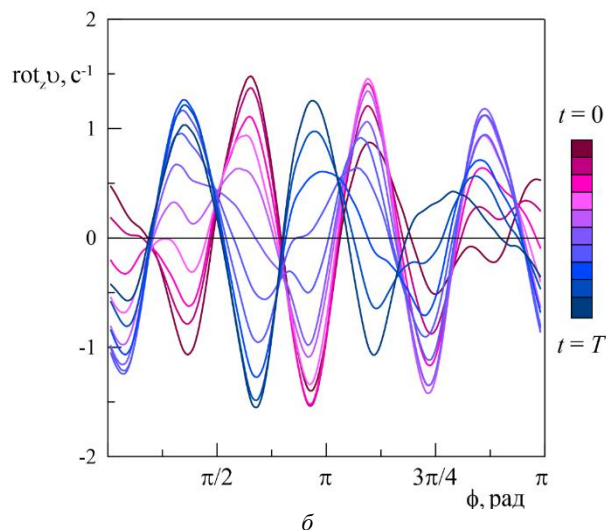
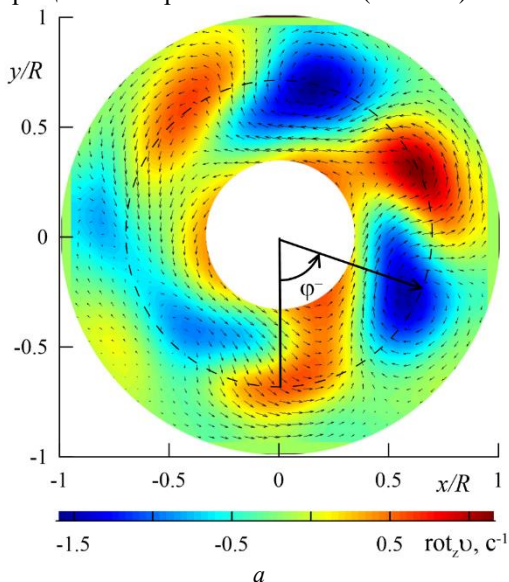


Рис. 1. Поле осредненной завихренности (а) и азимутальные профили (б). Скорость вращения полости $f_{rot} = 0.9$ об/с; разность температур границ слоя $\Theta = 26^\circ\text{C}$.

Изучены пороги возникновения тепловой конвекции и структуры конвективных потоков в зависимости от скорости вращения, вязкости жидкости и разности температур границ слоя. Конвективные течения исследованы с использованием PIV метода. Показано, что конвекция определяется амплитудой модуляции и комплексом, включающим в себя безразмерную скорость вращения и число Прандтля.

Список литературы

1. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. Thermal vibrational convection. N.Y.: Wiley et al. 1998. 358 p.
2. Vjatkina A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. Convection of a heat-generating fluid in a rotating cylindrical cavity subject to transverse vibrations // International Journal of Thermal Sciences, 2019. Vol. 137 P. 560–570.
3. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
4. Kozlov V.G., Ivanova A.A., Vjatkina A.A., Sabirov R.R. Vibrational convection of heat-generating fluid in a rotating horizontal cylinder. The relative length of the cavity role // Acta Astronautica. 2015. Vol. 112. P. 48–55.
5. Shevtsova, V., Ryzhkov, I., Melnikov, D., Gaponenko, Y., Mialdun, A. (2010). Experimental and theoretical study of vibration-induced thermal convection in low gravity // Journal of Fluid Mechanics. Vol. 648. P. 53–82.
6. Kozlov V.G., Vjatkina A.A., Sabirov R.R., Myznikov V.M. Methods of experimental study of thermal convection in cavity subject to rotation and vibration // MethodsX, 6 (2019) P. 2420–2428.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
(проект № 18-71-10053)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ КЕРАМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ОПТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Горбачев М.В.¹, Карасев Д.П.¹, Наумкин В.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный технический университет

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

e-mail: vsnaumkin@itp.nsc.ru

В связи с ростом мощности источников синхротронного излучения (порядка 10^6 – 10^7 Вт/м²) возникает необходимость в эффективном охлаждении элементов оптической аппаратуры (зеркала, кристаллы, алмазные окна и др.), на которую падает излучение с большой плотностью. На 1 см² падает поток порядка 1 кВт. Столь большой тепловой поток может привести к локальному перегреву и как следствие к сильной тепловой деформации керамических зеркал, вплоть до их разрушения. Таким образом, возникает необходимость в эффективном отводе сконцентрированного теплового потока с поверхности или объёма подобных зеркал.

Для уменьшения абсолютной величины деформаций, вызванных тепловым воздействием, предлагаются различные формы зеркал и системы охлаждения. Схематично предлагаемые в литературе формы зеркал изображены на рисунке 1. Поверхность, на которую подаётся излучение, находится сверху. Охлаждение во всех случаях, кроме второго слева, может осуществляться с нижней стенки и с боков. Во втором случае дополнительно через каналы, проходящие внутри зеркала.



Рис. 1. Формы керамических зеркал.

В данной работе была рассмотрена система с боковым охлаждением зеркала с «smart-cut», предложенного в [1] (крайняя форма зеркала справа на рисунке 1). Очевидно, что наибольшие деформации будут возникать на узкой полоске зеркала. Охлаждение подобного зеркала предполагается с боковой части (рис. 2). На рисунке 2 указаны размеры исследуемого зеркала.

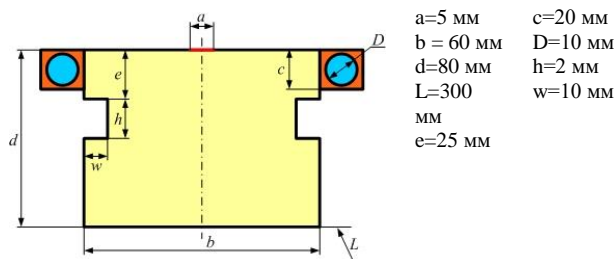


Рис. 2. Геометрические размеры исследуемого зеркала.

Тепловой поток подавался сверху зеркала по всей длине зеркала, ширина облучаемой зоны была равна размеру «а». На реально работающей установке, облучаемая зона может смещаться влево или вправо от оси симметрии. Плотность теплового потока задавалась в двух вариациях: переменная (в зависимости от

координат) и постоянная плотность потока, равного интегральному из первого случая (10^6 Вт/м²). Материал зеркала – кремний. Моделирование проводилось как без учёта медного радиатора, так и при его наличии. Ширина охлаждаемой области (радиатора) равнялась «с». При охлаждении «без радиатора» на поверхности «с» задавалась температура охладителя (вода) и значение коэффициента теплоотдачи. На остальных границах задавались условия лучистого теплообмена с окружающей средой (вакуум, температура 25°C, степень черноты зеркала задавалась равной единице). Ввиду того, что охлаждение подавалось по двум независимым трубкам, то рассматривалась осесимметричная задача. Режим теплообмена считался стационарным. Коэффициент теплопроводности кремния задавался как функция от температуры, полученной после аппроксимации данных [2].

Температура охлаждающей воды принималась равной 22°C. На рисунке 3 представлено изменение температуры поперёк зеркала от оси симметрии к радиатору на длине b/2 при варьировании коэффициента теплоотдачи с боковой поверхности. На данное сечение приходится максимум теплового потока. В рассматриваемом случае моделировалась задача без радиатора. Максимум температуры находится для рассмотренных режимов на оси зеркала. При увеличении коэффициента теплоотдачи наблюдается общее снижение температуры поверхности зеркала. При увеличении значения $\alpha > 6000$ Вт/м²К (что эквивалентно увеличению расхода теплоносителя) температура поверхности зеркала практически не изменяется.

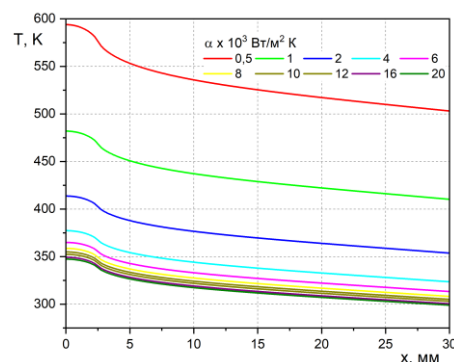


Рис. 3. Распределение температуры по верхней поверхности зеркала от оси симметрии до радиатора.

Список литературы

1. Brumund P, Reyes-Herrera J, Morawe C, Dufrane T, Isern H, Brochard T, et al. Thermal optimization of a high-heat-load double-multilayer monochromator // J Synchrotron Rad. 2021. -28(5).-pp.1423–36.
2. Touloukian YS, Powell RW, Ho CY, Klemens PG. // Thermal Conductivity.-1970.- Boston, MA: Springer US.

ТЕПЛОТДАЧА И СТРУКТУРА ПОТОКА В ПЛОСКОМ БЕЗОТРЫВНОМ ДИФFUЗОРЕ

Давлетшин И.А.^{1,2}, Михеев Н.И.¹, Шакиров Р.Р.¹¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

e-mail: davlet60@mail.ru

Сложность кинематической структуры течения и теплообмена в диффузорных каналах обусловлена большим количеством определяющих факторов [1, 2]: геометрия канала, угол раскрытия, отрыв потока, число Рейнольдса, наличие предвключенного участка. Анализ процессов в таких течениях зачастую базируется на различных безразмерных параметрах: параметр Клаузера, параметр ускорения Кейса и др.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и структуры потока в диффузорах различной геометрии. В исследованиях рабочий участок представлял собой плоский канал длиной 1820 мм и шириной 150 мм с плавным входом. Диффузор создавался отклонением одной стенки канала на угол $\varphi=0,38-5,3^\circ$. Высота входного сечения диффузора составляла $H_0=20-40$ мм. На стенке канала шириной 150 мм проводились измерения теплоотдачи. На вход канала подавался воздух с параметрами окружающей среды. Теплообмен между стенкой и потоком воздуха в экспериментах был организован путем нагрева теплообменной стенки постоянным электрическим током. При этом обеспечивались граничные условия, близкие к $q_w=\text{const}$.

На основе тепловых измерений были получены распределения коэффициента теплоотдачи α на стенке диффузора при различных режимных параметрах потока. Исследования проводились в диапазонах среднерасходной скорости потока на входе в диффузор $U_0=(4,17-22,2)$ м/с. Числа Рейнольдса по высотам входных сечений диффузоров находились в диапазоне $Re_0=U_0H_0/\nu=(0,79-4,14)\times 10^4$. Для плоских диффузоров параметр ускорения Кейса имеет довольно простой вид $K=v/U^2(dU/dx)=-\text{tg}\varphi/Re_0$ (x – продольная координата). В экспериментах его значения находились в диапазоне $K=(-0,16-12)\times 10^{-6}$.

Результаты измерений показали, что распределения коэффициента теплоотдачи хорошо обобщаются при использовании скорости потока на входе в диффузор U_0 в качестве определяющего параметра. Соответственно при анализе данных числа Рейнольдса и Стантона следует представлять в виде: $Re=U_0x/\nu$ и $St=\alpha/(\rho c_p U_0)$. Получено, что продольные распределения коэффициента теплоотдачи St по стенке диффузора могут быть представлены с использованием скорости потока на входе и параметра ускорения Кейса. При этом нет необходимости использовать информацию о распределении локальных значений скорости потока по длине канала. Оказалось, что при таком подходе на ламинарном режиме распределения коэффициента теплоотдачи на стенке диффузора довольно хорошо согласуются с соответствующим

классическим распределением на пластине без градиента давления. Распределения на турбулентном режиме оказалось возможным аппроксимировать степенным соотношением $St\sim Re^{-n}$. В частности для диффузора с углом раскрытия $\varphi=2,5^\circ$ соотношение имеет вид $St\sim Re^{-0,4}$ (рис. 1).

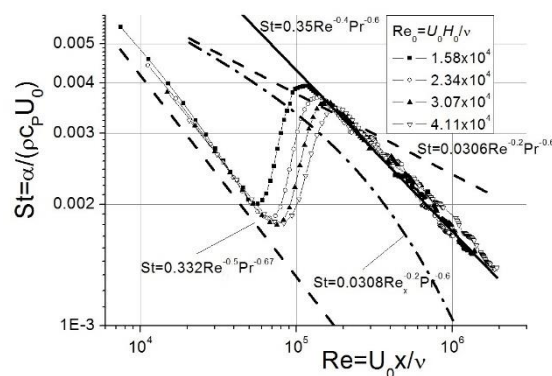


Рис. 1. Распределение коэффициента теплоотдачи на стенке диффузора $\varphi=2,5^\circ$ при $H_0=40$ мм.

По результатам всей совокупности полученных экспериментальных данных (по всем исследованным геометриям и числам Re) оказалось, что влияние градиента давления на распределение коэффициента теплоотдачи может быть описано степенной зависимостью от параметра ускорения $St\sim|K|^{-0,23}$.

Для выявления механизма формирования процесса теплообмена были проведены измерения полей скорости и характеристик турбулентности в диффузоре с углом раскрытия $\varphi=2,5^\circ$ в характерных сечениях при $Re_0=1,58\cdot 10^4$. Оптическим методом получена информация об особенностях турбулентной структуры потока. Установлено, что в ее формировании важную роль играет генерация турбулентности на начальном участке канала и ее дальнейшая конвекция вниз по потоку. Данное положение согласуется с характером распределения коэффициента теплоотдачи. Совместный анализ гидродинамических и тепловых процессов показал наличие корреляции между локальными значениями реинольдсовых напряжений вблизи стенки и числа Стантона $St\sim(-U'V/U_0^2)^{0,35}$.

Список литературы:

1. В. Г. Лушник, А. И. Решмин. Интенсификация теплообмена в плоском безотрывном диффузоре // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 589–596.
2. Davletshin I.A., Dushina O.A., Mikhееv N. I., Shakirov R.R. // Heat transfer and flow structure in a plane diverging channel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. 189. 122744.

Работа поддержана РФФ (грант №22-19-00507)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУЧКОВ КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ АТАКИ

Дееб Равад (Сирия), Сиденков Д.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица,14

Теплообменники широко используются для многих промышленных и бытовых целей, например, в качестве компонентов систем кондиционирования, отопления и охлаждения. Большинство теплообменников представляют собой круглые трубы, расположенные в шахматной или в коридорной компоновке. Характеристики круглой трубы как неудобообтекаемого тела имеют ряд недостатков. Поэтому перспективным является изменение круглой трубы на удобообтекаемую в качестве элементов теплообменных аппаратов. Многие исследователи работали над этим вопросом в течение нескольких предыдущих десятилетий [1].

В данной работе проводится численное исследование конвективного теплообмена пучка каплевидных труб (рис. 1), расположенных в шахматном и коридорном порядке при поперечном обтекании воздухом. Угол атаки θ контролируется в каждом ряду, чтобы найти пучок труб (извилистая компоновка), обеспечивающий наилучшую эффективность. Результаты сравниваются с круглыми трубами того же эквивалентного диаметра. Число Рейнольдса Re варьируется от $1,78 \times 10^3$ до $18,72 \times 10^3$. Изменение угла атаки достигается поворотом всех труб, расположенных в одном ряду, по часовой стрелке от 0° до 360° . Было исследовано десять случаев, как показано в таблице 1 (θ_{i-j} указывает угол атаки от ряда трубы i до j , шахматный пучок). Расчетная область с граничными условиями показаны на рис. 2.

Таб. 1. Углы атаки рассматриваемых случаев

№ случая	Угол атаки (градус)
1	Шахматный пучок круглых труб
2	Коридорный пучок круглых труб
3	$\theta_{1-20} = 0^\circ$, шахматный пучок
4	$\theta_{1-20} = 0^\circ$, коридорный пучок
5	$\theta_{1-5}=0^\circ, \theta_{6-10}=345^\circ, \theta_{11-15}=15^\circ, \theta_{16-20}=0^\circ$ (шах)
6	$\theta_{1-5}=0^\circ, \theta_{6-10}=330^\circ, \theta_{11-15}=30^\circ, \theta_{16-20}=0^\circ$ (шах)
7	$\theta_{1-2}=\theta_{19-20}=0^\circ, \theta_{3-5}=\theta_{13-15}=345^\circ, \theta_{6-8}=\theta_{16-18}=15^\circ, \theta_{9-12}=0^\circ$ (шах)
8	$\theta_{1-2}=\theta_{19-20}=0^\circ, \theta_{3-5}=\theta_{13-15}=330^\circ, \theta_{6-8}=\theta_{16-18}=30^\circ, \theta_{9-12}=0^\circ$ (шах)
9	$\theta_{1-5}=0^\circ, \theta_{6-10}=345^\circ, \theta_{11-15}=195^\circ, \theta_{16-20}=0^\circ$ (шах)
10	$\theta_{1-2}=\theta_{11-12}=0^\circ, \theta_3=\theta_{13}=350^\circ, \theta_4=\theta_{14}=345^\circ, \theta_5=\theta_{15}=340^\circ, \theta_6=\theta_{16}=10^\circ, \theta_7=\theta_{17}=15^\circ, \theta_8=\theta_{18}=20^\circ, \theta_{9-10}=\theta_{19-20}=0^\circ$ (шах)

Эффективность пучков труб возможно оценить следующим образом [2]:

$$\varepsilon = \frac{Nu_{cp}}{f}$$

где Nu_{cp} – среднее число Нуссельта; f – коэффициент аэродинамического сопротивления.

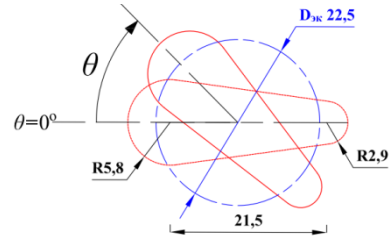


Рис. 1. Поперечное сечение каплевидной трубы

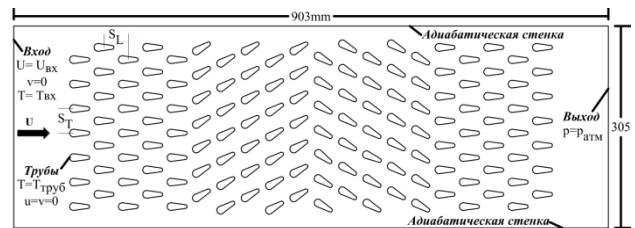


Рис. 2. Двумерная вычислительная область с граничными условиями, случай 6

Рисунок 2 демонстрирует сравнение эффективности круглых и каплевидных труб. Видно, что во всех случаях пучки каплевидных труб превосходят круглые по эффективности. Также, было найдено, что шахматные пучки каплевидных труб обеспечивают лучшую эффективность по сравнению с коридорными. Случай 6 имеет наибольшую эффективность среди исследованных случаев (примерно в 1,4 ~ 1,8 и 2,9 ~ 3,5 раза больше, чем у случаев 3 и 1, соответственно).

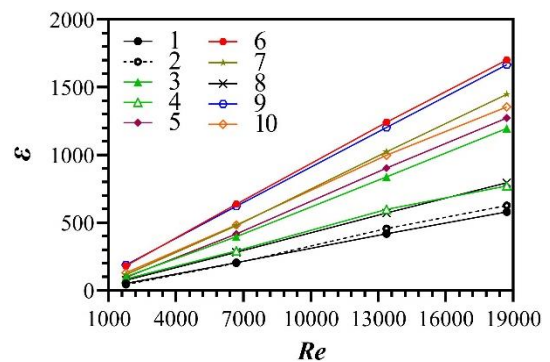


Рис. 3. Зависимости ε от Re

Список литературы

1. Дееб Р. Обобщение и анализ результатов последних исследований в области улучшения характеристик теплообмена и гидродинамики при поперечном обтекании гладких труб // Вестник Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 2. С. 50–69.
2. Deeb R. Numerical analysis of the effect of longitudinal and transverse pitch ratio on the flow and heat transfer of staggered drop-shaped tubes bundle // Int. J. Heat Mass Transfer 2022. V. 183, 122123.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА БЛИЖНИЙ СЛЕД ГИДРОФОБНОГО КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА В КРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ОБТЕКАНИЯ

Добросельский К.Г.

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

e-mail: dobroselsky@mail.ru

Возможное применение гидрофобных поверхностей для управления потоком связано с явлением поверхностного скольжения и его гидродинамическим влиянием на потоки, ограниченные стенками. Одним из приложений может быть управление потоком вокруг тел обтекания, чтобы менять отрыв и регулировать последующую динамику вихря в следе. Обтекание тела (в частности, круглого цилиндра) имеет большое значение как для академических, так и для промышленных приложений из-за его сложных явлений течения, включая рост пограничного слоя при неблагоприятном градиенте давления, отрыв потока, неустойчивость сдвигового слоя и периодическое вихреобразование в следе [1, 2].

Представлены результаты экспериментального исследования бескавитационного обтекания фторопластового цилиндра турбулентным потоком воды в критической области с числами Рейнольдса по диаметру в диапазоне $Re \approx (1,95 - 2,85) \times 10^5$. С использованием метода PIV получены осредненные поля скорости около цилиндра и приведены сравнительные характеристики турбулентного следа за цилиндром для потоков с разными числами Рейнольдса.

Для проведения экспериментов использовалась гидродинамическая труба замкнутого типа [3]. Рабочий участок имеет поперечное сечение размером $0,08 \times 0,15$ м (ширина \times высота), в котором располагался круглый цилиндр диаметром $d = 0,026$ м с шероховатостью $R_a \approx 1,2$ мкм. На рис. 1 приведена схема измерений. Рабочей жидкостью служила водопроводная фильтрованная вода с объемным содержанием воздуха примерно $0,01$ м³/м³. Форма полученного профиля скорости свободного потока показала наличие ядра с постоянной скоростью u_c и степенью турбулентности в нем $Tu \approx 1,4$ %.

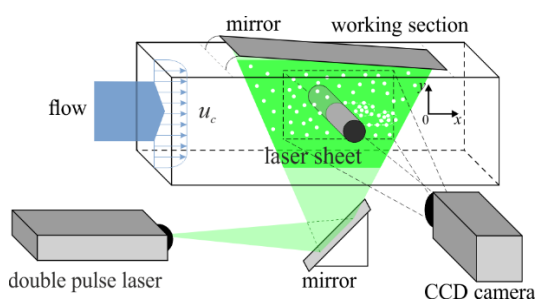


Рис. 1. Схема эксперимента (белыми точками обозначены трассеры).

Параметры потока перед цилиндром находились в диапазоне: статическое давление 120–155 кПа, температура 23–26°C.

Управление экспериментом и обработка данных осуществлялись с использованием программного па-

кета «ActualFlow», который предназначен для автоматизации процесса проведения эксперимента, обработки и визуализации данных. Поля мгновенной скорости (1500 пар) рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек. Размер расчетной области составлял примерно 1120×720 пикселей, что соответствовало приблизительно $x = -0,7d - 2,4d$; $y = \pm 1d$.

Показано, что изменение числа Рейнольдса в рассмотренном диапазоне приводит к изменению размеров, кинематических и энергетических характеристик следа цилиндра. При увеличении числа Рейнольдса размер и кинематические характеристики следа за цилиндром сначала уменьшаются, а затем увеличиваются.

Для потока с $Re = 2,2 \times 10^5$ был получен минимум длины обратного тока и ширины вихревой зоны следа цилиндра (вероятно, кризис сопротивления). При уменьшении давления в этом потоке со 150 кПа до 120 кПа было отмечено увеличение размера и кинематических характеристик вихревой зоны в следе за цилиндром примерно на 20%. Возможно, это связано с явлением локального увеличения газосодержания потока воды вблизи поверхности цилиндра с осаждением пузырьков воздуха. Было получено, что максимальная скорость в узком слое течения вблизи поверхности цилиндра увеличивается примерно в 1,55 раза по сравнению с набегающим потоком и, соответственно, уменьшается местное статическое давление, которое может стать меньше атмосферного. Для близких чисел Рейнольдса снизу таких изменений при уменьшении давления не наблюдалось.

Исследование воздушного пластрона: его появление и изменение от температуры и давления, зависимость от скорости потока и локального газосодержания, поможет в дальнейшем понимании проблемы сохранения свойств гидрофобности, использовании гидрофобных поверхностей для управления потоком вокруг обтекаемого тела.

Список литературы:

1. Kim N., Kim H., Park H. An experimental study on the effects of rough hydrophobic surfaces on the flow around a circular cylinder // Phys. Fluids. 2015. V. 27. 085113.
2. Dobroselsky K.G. Influence of pressure on the wake of a hydrophobic circular cylinder for a flow regime with Reynolds number of 2.2×10^5 // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2119. 012011.
3. Добросельский К.Г. Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8. Вып. 4. С. 110–117.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2022-1043).

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ОБДУВА НА ПРОЦЕСС ОСТЫВАНИЯ МОДЕЛИ ГОРОДА**Евграфова А.В., Сухановский А.Н.**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: eav@icmm.ru

На сегодняшний день существует лишь несколько работ, которые пытаются охватить все многообразие и многомасштабность городской геометрии. Часть из них связана с распространением примеси и образованием очагов высокой концентрации [1–3], другая относится к изучению аэродинамических характеристик городского массива [4–5].

Исследование закономерностей теплообмена на масштабах городского пространства является сложной междисциплинарной задачей. Расположение и высота зданий, термодинамические свойства поверхности рельефа городского ландшафта, а также особенности рельефа местности влияют на распределение температуры и самовентилиацию городской среды. Поэтому вопрос о тепловых процессах внутри городского пространства и их зависимости от геометрии города является предметом дискуссии на протяжении последнего десятилетия [6–7].

В данной работе экспериментально был исследован процесс остывания поверхности со сложным рельефом. В качестве объекта исследования был использован макет части города Пермь, который воспроизводит особенности рельефа местности, в том числе искусственного происхождения, на территории площадью пять квадратных километров. В качестве основы были использованы данные из некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap. Модель создана из ABS пластика на 3D принтере Picaso, масштаб печати примерно 1 к 4000, масштаб выбран с учетом характерных значений коэффициентов турбулентной вязкости ($1\text{--}5\text{ м}^2/\text{с}$), для того, чтобы управляющие параметры в лабораторном эксперименте и эффективные управляющие параметры в реальных условиях были сравнимы.

Была проведена серия экспериментов по моделированию процесса остывания поверхности города после продолжительного нагрева солнечным излучением при наличии и отсутствие внешней циркуляции. Нагрев поверхности города реализован при помощи инфракрасного обогревателя. Измерения температуры производились посредством ИК камеры. Для создания внешней циркуляции был использован колонный вентилятор, скорость обдува варьировалось.

Минимальная скорость обдува в порывах составляла до 10 см/с , максимальная до 30 см/с .

Используя в качестве статистической взаимосвязи линейную зависимость, были найдены коэффициенты линейной корреляции для следующих пар переменных: плотность застройки и максимальная/средняя температура поверхности, средняя высота поверхности и максимальная/средняя температура поверхности, произведение максимальная/средняя температура поверхности.

Было показано, что временная зависимость корреляционных коэффициентов имеет максимум, в этот момент времени неоднородность рельефа оказывает наибольшее влияние на распределение температуры. Это может быть связано с изменением толщины температурного пограничного слоя в процессе остывания поверхности. Известно, что шероховатость поверхности существенно влияет на теплообмен в случае, когда размер шероховатости сравним с толщиной теплового пограничного слоя. Наличие внешней циркуляции не оказывает существенного влияния на корреляционные характеристики в исследуемом диапазоне параметров.

Список литературы

1. Nakayama, H., Jurcakova, K., Nagai, H. Large-eddy simulation of plume dispersion within various actual urban areas. *Advances in Science and Research*. 2013. 10. 33–41
2. Baklanov, A.A., Nuterman, R. Multi-scale atmospheric environment modelling for urban areas. *Advances in Science and Research*. 2009. 3. 53
3. Klein, P., Leidl, B., Schatzmann, M. Concentration fluctuations in a downtown urban area. part ii: analysis of joint urban 2003 wind-tunnel measurements. *Environmental Fluid Mechanics*. 2011. 11. 43–60
4. Hertwig, D., Patnaik, G., Leidl, B. LES validation of urban flow, part i: flow statistics and frequency distributions. *Environmental Fluid Mechanics*. 2017. 17. 521–550
5. Carpentieri, M., Robins, A.G., Baldi, S. Three-dimensional mapping of air flow at an urban canyon intersection. *Boundary-layer meteorology*. 2009. 133. 277–296
6. Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., Voogt, J. Suhi analysis using local climate zones: a comparison of 50 cities. *Urban Climate* 2019. 28. 100451
7. Shreevastava A, Bhalachandran S, McGrath GS, Huber M, Rao PSC. Paradoxical impact of sprawling intra-Urban Heat Islets: Reducing mean surface temperatures while enhancing local extremes – Scientific reports. 2019. 9(1). 1–10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПАРЫ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С.

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

e-mail: zditovets@mail.ru

Обычно, для повышения величины удельного теплового потока в однофазных течениях, используют методы воздействия на коэффициент теплоотдачи, связанные с введением искусственных турбулизаторов (штырьки, канавки, ребра и т.п.). Однако, в случае движения газа с умеренно высокими дозвуковыми скоростями (число Маха 0,3–0,7) появляется дополнительная возможность повышения величины удельного теплового потока (эффективности теплообмена) – это использования эффекта газодинамического энергоразделения - самопроизвольного возникновения горячих и холодных зон на поверхности и в следе плохообтекаемого тела. Как впервые экспериментально обнаружено Эккертом [1] – температура поверхности поперечно обтекаемого кругового цилиндра может принимать значения ниже температуры набегающего потока. Например, в работе [2] получено, что при числе Маха набегающего потока 0,65 и температуре торможения 25°C температура поверхности кругового цилиндра снижалась на 28°C градусов в окрестности задней лобовой точки. Сам цилиндр был выполнен из теплоизолятора, т.е. теплообмен между цилиндром и потоком был бесконечно мал, следовательно, температура поверхности цилиндра была равна температуре пристенных слоев газового потока – адиабатной температуре стенки.

В работе [3] на основе прямого численного моделирования двумерных уравнений Навье-Стокса предложено объяснение эффекта энергоразделения в нестационарном вихревом течении при обтекании одиночного цилиндра поперечным ламинарным потоком, а в последующей публикации авторов [4] также на основе численных расчетов показано, что воздействовать на процесс энергоразделения возможно изменением расстояния между двумя цилиндрами. При этом взаимное расположение тел может как увеличивать эффект энергоразделения, так и снижать его по сравнению со случаем обтекания одиночного кругового цилиндра.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния расстояния между цилиндрами на величину адиабатной температуры стенки, которая отражает эффект энергоразделения на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра.

Экспериментальный стенд базируется на малой дозвуковой аэродинамической установке НИИ механики МГУ, работающей по принципу нагнетания (Рис. 1). Установка состоит из высоконапорного центробежного вентилятора (1), частотного преобразователя (2), предназначенного для плавного регулирования частоты вращения вентилятора и соответственно,

изменения скорости потока в канале от 5 до 125 м/с. Далее расположены: форкамера (4), сопло (6) и рабочий канал (7), которые для исключения влияния вибрации от вентилятора смонтированы на отдельной опорной раме (10), а между вентилятором и форкамерой установлен мягкий соединительный рукав, изготовленный из брезента (3).

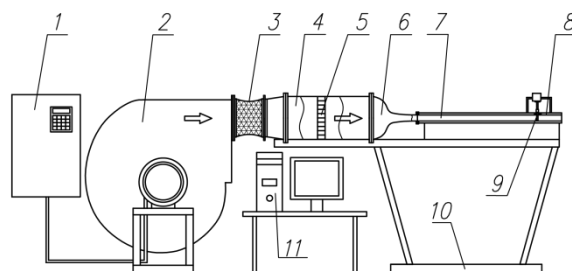


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – частотный преобразователь, 2 – высоконапорный вентилятор, 3 – мягкий рукав, 4 – форкамера, 5 – хонейкомб, 6 – сопло, 7 – плоский канал, 8 – координатник, 9 – цилиндры, 10 – рама, 11 – АЦП и ЭВМ.

Рабочий канал установки имеет длину $L=1000$ мм, высоту $H=50$ мм, ширину $B=300$ мм. Расстояние от среза сопла до оси цилиндров – 500 мм. Исследуемые цилиндры располагались в канале вертикально, таким образом, что плоскость, проходящая через оси цилиндров, была параллельна плоскости среза сопла. Координатный механизм (8) позволял перемещать один из цилиндров и вращать вокруг своей оси. В работе использовались цилиндры круглого поперечного сечения диаметром 10 мм, расстояние между центрами изменялось в диапазоне 12–40 мм. Одна из боковых стенок канала отсутствовала, что позволило использовать тепловизор InfraTEC 8800 для регистрации температуры поверхности цилиндра.

Список литературы

1. Eckert E., Weise W. Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angestromter unbeheizter Körper // Forsch. Geb. Ing. Wesen. 1942. Vol. 13. P. 246–254.
2. Ryan L.F. Experiments on Aerodynamic Cooling. Swiss Federal Institute of Technology, 1951.
3. Aleksyuk A.I., Osipov A.N. Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 119. P. 665–677.
4. Aleksyuk A.I. The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 915. P. A95.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФ
№22-29-00443*

ПРЯМОЙ ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МОДЕЛЬНЫХ СБОРОК ТВЭЛОВ

Иващенко В.А.¹, Токарев М.П.^{1,2}, Мулладжанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: ivashchenko@itp.nsc.ru

Атомная энергия на сегодняшний день играет важную роль в производстве электроэнергии по всему миру, при этом, по оценкам Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ), мировые мощности атомной энергетики могут увеличиться вдвое к 2050 году [1]. Одним из перспективных вариантов реализации атомных реакторов являются реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. При этом, несмотря на наличие уже действующих реакторов такого типа, ряд теплофизических задач (выбор теплоносителя, интенсификация теплообмена, снижение гидравлических потерь и др.) в тепловыделяющих сборках требует дополнительного внимания [2, 3].

В данной работе рассматриваются различные модельные сборки ТВЭЛОВ, охлаждаемые различными теплоносителями, включая жидкие металлы. Пример одной из таких конфигураций в изотермическом приближении представлен на рис. 1. С помощью метода прямого численного моделирования проводится анализ эффективности теплоотведения на основе систем охлаждения жидкими металлами, исследуются как средние поля скоростей, давления и температуры, так и локальные эффекты вблизи ТВЭЛОВ и межТВЭльном пространстве связанные с турбулентным течением, которые могут не вносить существенного изменения в средние поля, но влиять на общую безопасность и прогнозирование характеристик реактора в условиях проектирования, например такие как энергоэффективность. Результаты, полученные с помощью вихреразрешающего численного моделирования, в дальнейшем будут использоваться для создания новых моделей турбулентности в рамках RANS-подхода, которые возможно применить для широкого спектра задач при проектировании энергетического оборудования. С помощью данных прямо-

го численного моделирования произведен анализ энергетических спектров в различных точках сборки для выявления наиболее интенсивных процессов в потоке.

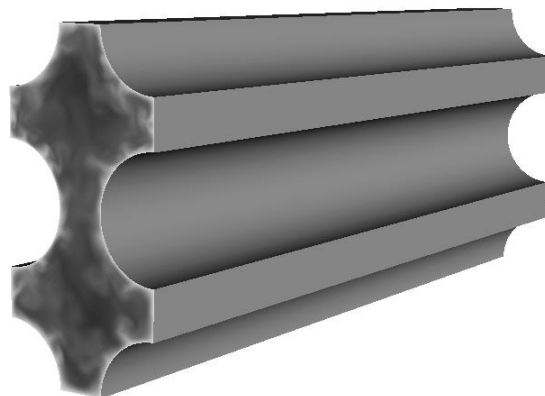


Рис. 1. Модель сборки из 6 ТВЭЛОВ с мгновенной амплитудой скорости.

Список литературы

1. IAEA. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 // International Atomic Energy Agency, 2021.
2. Драгунов Ю. Г. Разработка реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – №. 1. – С. 4–6.
3. Лемехов В. В., Смирнов В. С., Уманский А. А. Активная зона реактора БРЕСТ: современное состояние и перспективы // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – №. 2. – С. 89–93.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01274. Авторы благодарны Институту теплофизики СО РАН за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера “Каскад”.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ВЯЗКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Киреев В.Н.¹, Низамова А.Д.², Урманчиев С.Ф.²

¹ Башкирский государственный университет, Уфа

² Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

e-mail: kireev@anrb.ru

Экспериментальное, теоретическое и численное исследование задач, связанных с устойчивостью течения жидкости и различными аспектами ламинарно-турбулентного перехода, по-прежнему остается одной из актуальных задач современной гидродинамики [1–3]. Целью настоящей работы является численное исследование влияния параметров зависимости вязкости от температуры на устойчивость течения жидкости в кольцевом канале с неоднородным температурным полем.

Пусть вязкая несжимаемая жидкость движется под действием постоянного перепада давления в кольцевом канале (зазоре), образованном двумя соосными цилиндрами различных радиусов a и b ($a < b$).

В случае изотермического течения уравнения Навье-Стокса, записанные в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) , принимая во внимание осесимметричный характер течения, имеют следующее точное решение для профиля осевой скорости невозмущенного потока [4]:

$$W_0(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\mu_0 L} a^2 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 + \frac{\eta^2 - 1}{\ln \eta} \ln \frac{r}{a} \right),$$

где p_1 и p_2 – давление в начале и в конце участка канала, L – длина участка канала, μ_0 – постоянная динамическая вязкость жидкости, $\eta = b/a$ – безразмерный геометрический параметр.

Используя стандартное для линейной теории устойчивости представление малых возмущений гидродинамических параметров в виде бегущей волны

$$\forall r, z, t) = \phi(r) \exp[ik(z - ct)],$$

где $k > 0$ – волновое число, $c = c_r + ic_i$ – комплексная скорость распространения возмущений, подставляя возмущенные величины в уравнения Навье-Стокса и проводя процедуру линеаризации, получается хорошо известное уравнение Орра-Зоммерфельда для осесимметричного течения в кольцевом зазоре [4]:

$$\begin{aligned} (W_0 - c) \left(\phi'' + \frac{\phi'}{r} - \frac{\phi}{r^2} - k^2 \phi \right) - \left(W_0'' - \frac{W_0'}{r} \right) \phi = \\ = -\frac{i}{k \operatorname{Re}} \left[\phi^{(4)} + \frac{2\phi'''}{r} + \left(-\frac{3}{r^2} - 2k^2 \right) \phi'' + \left(\frac{3}{r^2} - 2k^2 \right) \frac{\phi'}{r} + \right. \\ \left. + \left(-\frac{3}{r^4} + \frac{2k^2}{r^2} + k^4 \right) \phi \right] \end{aligned}$$

где Re – число Рейнольдса.

Граничные условия для уравнения Орра-Зоммерфельда имеют вид:

$$\phi(a) = \phi(b) = \phi'(a) = \phi'(b) = 0.$$

Постановка задачи в настоящей работе отличается от классической постановки тем, что температуры внутреннего и внешнего цилиндров кольцевого канала

предполагаются различными (T_a и T_b , соответственно), что приводит к неоднородному распределению температуры внутри канала. Поскольку вязкость жидкости является тем параметром, который достаточно чувствителен к изменению температуры, то следует ожидать изменение режимов течения и, в частности, характеристик гидродинамической устойчивости.

Зависимость вязкости от температуры была принята в виде простой экспоненциальной зависимости

$$\mu(T) = \mu_0 \exp[-\alpha(T - T_0)],$$

где μ_0 – вязкость при температуре T_0 , $\alpha > 0$ – параметр термовязкости, характеризующий степень изменения вязкости в рассматриваемом температурном диапазоне.

С учетом температурной зависимости вязкости было получено аналитическое решение для профиля осевой скорости невозмущенного потока. При увеличении параметра термовязкости максимальное значение скорости смещается ближе к тому из цилиндров, температура которого больше.

Показано, что задача об исследовании устойчивости течения термовязкой жидкости в кольцевом канале с неоднородным распределением температуры сводится к задаче на собственные значения для системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений относительно возмущений осевой скорости и температуры. Уравнение для возмущения осевой скорости содержит дополнительные слагаемые, характеризующие изменение как температуры, так и вязкости по сечению канала и для изотермического течения сводится к уравнению Орра-Зоммерфельда.

Построены спектры собственных значений модифицированного уравнения Орра-Зоммерфельда для различных значений параметра термовязкости. Анализ областей неустойчивости течения термовязкой жидкости показал, что при увеличении параметра термовязкости критическое число Рейнольдса, при котором происходит ламинарно-турбулентный переход, уменьшается.

Список литературы

1. Hattori H., Wada A., Yamamoto M., Yokoo H., Yasunaga K., Kanda T., Hattori K. Experimental study of laminar-to-turbulent transition in pipe flow // *Physics of Fluids* 2022. V. 34. 034115.
2. Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmantcheev S.F. Some features of hydrodynamic instability of a plane channel flow of a thermoviscous fluid // *Fluid Dynamics* 2019. V. 54, No. 7. P. 978-982.
3. Chang T.-Y., Chen F., Chang M.-H. Stability of plane Poiseuille-Couette flow in a fluid layer overlying a porous layer // *Journal of Fluid Mechanics* 2017. V. 826. P. 376-395.
4. Mott J. Stability of parallel flow between concentric cylinders // *Physics of Fluids* 1968. V. 11, No. 10. P. 2065-2073.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-21-00915).*

ВИБРАЦИОННАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Козлов В.Г., Вяткин А.А., Рысин К.Ю.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,
Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермь

e-mail: kozlov@pspu.ru, vjatkina_aa@pspu.ru, rysin@pspu.ru

Тепловая конвекция во вращающихся системах является актуальной геофизической и технологической проблемой. Наряду с классическим гравитационным механизмом тепловая конвекция может возбуждаться осциллирующими силовыми полями. Осредненная конвекция неизотермической жидкости, вызываемая вибрациями полости, получила название вибрационной тепловой конвекции [1].

Действие гравитационного механизма определяется числом Рэлея Ra , в горизонтальном плоском слое конвекция возникает пороговым образом по достижении критического значения Ra . Вращение слоя оказывает стабилизирующее действие, с повышением безразмерной скорости вращения порог конвективной устойчивости возрастает [2].

Термовибрационный механизм проявляется независимо от гравитационного. В связи с этим, интерес представляет случай одновременного действия обоих механизмов, гравитационного и вибрационного, к примеру, в подогреваемом сверху плоском слое, когда поле силы тяжести играет стабилизирующую роль ($Ra < 0$). В работах [3, 4] впервые экспериментально изучены пороги возбуждения вибрационной тепловой конвекции, структура конвективных течений и теплоперенос в подогреваемом сверху горизонтальном плоском слое жидкости, совершающем круговые поступательные колебания в горизонтальной плоскости в отсутствие вращения. Обнаружено, что вибрационная конвекция развивается пороговым образом при повышении интенсивности вибраций в виде пространственных структур в форме вытянутых валов, разбитых по длине на сравнительно короткие сегменты – бусы (Рис.1а). Конвекция в такой постановке определяется вибрационным параметром R_v [1], пороговое значение которого возрастает с повышением модуля $|Ra|$.

Влияние вращения на вибрационную тепловую конвекцию и теплоперенос представляет особый интерес. Незученной остается задача о конвекции, вызываемой быстровращающимся силовым полем при заданной (независимо) скорости вращения полости. Результаты экспериментов в такой постановке важны для понимания действия вибрационного механизма конвекции во вращающейся системе [5], а также влияния вибраций на режимы конвективных течений.

В текущей работе выполнено экспериментальное исследование вибрационной тепловой конвекции во вращающемся вокруг вертикальной оси горизонтальном плоском слое, возбуждаемой внешним осциллирующим силовым полем круговой поляризации. Исследование проведено в широком диапазоне безразмерных частот вибраций и скорости вращения при варьировании геометрических размеров полости,

свойств жидкости, условий нагрева и вращения. На рис. 1б приведены виброконвективные структуры, наблюдаемые в надкритической области во вращающемся слое. В сравнении со случаем отсутствия вращения слоя в исследованном интервале скоростей вращение вызывает перестройку конвективных структур, однако волновое число структур изменяется не значительно.

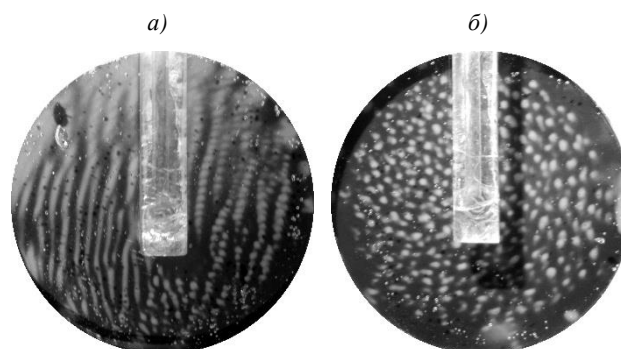


Рис.1. Надкритические виброконвективные структуры в подогреваемом сверху слое этанола толщиной $h=0.32$ см, визуализированные с помощью термочромной методики: а – без вращения; б – при вращении со скоростью 0.25 об/с

Результаты исследований обобщены в пространстве управляющих безразмерных параметров: гравитационного числа Рэлея Ra , вибрационного параметра R_v и безразмерной скорости вращения полости ω_{rot} . Показано, что вращение оказывает стабилизирующее влияние на возбуждение высокочастотной вибрационной конвекции в устойчиво стратифицированном в поле силы тяжести слое. Выполнен сравнительный анализ влияния вращения на гравитационную и вибрационную конвекцию в плоском слое, в зависимости от стабилизирующего действия статического внешнего поля.

Список литературы

1. Gershuni G.Z., Lyubimov D.V. Thermal Vibrational Convection // Wiley, NY, 1998. 358 p.
2. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability // Oxford University Press, 1961. 656 p.
3. Kozlov V.G., Rysin K.Y., Vjatkina A.A. Vibroconvective patterns in a layer under translational vibrations of circular polarization // Fluids. 2021. V. 6, No. 3. 108.
4. Kozlov V. G., Rysin K. Y., Vjatkina A. A. Vibroconvective stability of liquid in horizontal plane layer subject to circular translational vibrations // Microgravity Sci. Technol. 2019. V.31. P.759–765.
5. Kozlov V.G. Thermal Vibrational Convection in Rotating Cavities // J. Fluid Dynamics. 2004. V.39. P.3–11.

Работа поддержана РФФ
(грант № 18-71-10053).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО КОЛЬЦЕВОГО ГОРЕНИЯ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ И ФЛЕЙМЛЕТОВ

Кундашкин А.Д.^{1,2}, Палкин Е.В.¹, Хребтов М.Ю.^{1,2}, Мулляджанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

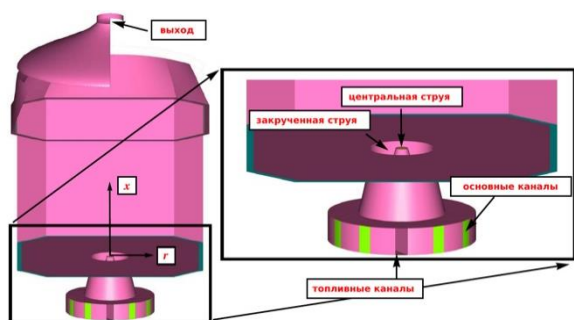
² Новосибирский государственный университет

e-mail: alexkundashkin@gmail.com

В современном мире и ближайшем обозримом будущем горение различных видов топлива все еще останется основным ресурсом добычи энергии для человечества. В связи с этим встают вопросы оптимизации расходов топлива при горении в различных двигателях. Также большую важность представляет оптимизация геометрии двигателей для более экономичного сгорания топлива с меньшим вредом для экологии.

В качестве примера попытки решения этих проблем можно выделить предварительно смешанного газового топлива, которое обеспечивает низкие выбросы оксидов азота и высокую топливную экономичность для многих устройств сгорания. Однако, стратифицированные смеси с неоднородной концентрацией топлива дают лучшую стабильность пламени и воспламеняемость по сравнению с предварительно смешанным пламенем в условиях очень скудного топлива [1, 2] и часто намеренно используются в практических системах сгорания, например в двигателях со стратифицированным зарядом.

В данной работе исследуется изотермическая и реагирующая аэродинамика в модельной камере с двенадцатью закрученными входными потоками. Модель камеры сгорания состоит из цилиндрической форкамеры, модельного фронтального устройства и камеры сгорания. Ширина камеры сгорания составляет 180 мм. Фронтальное устройство включает в себя радиальный завихритель потока и центральное сопло для подачи пилотного топлива. Была построена расчетная сетка, содержащая 13 млн ячеек.



Поля скоростей и распределение давлений были смоделированы с помощью модели табулированной химии (flamelet модель) и метода крупных вихрей, имплементированных в открытый пакет OpenFOAM.

На основе имеющихся экспериментальных данных была проведена валидация изотермических расчетов с различными расходами топлива.

Ранее было показано, что в реагирующем случае пламя прикреплено к поверхности сопла с углом соприкосновения, перемещающимся азимутально с основным закрученным потоком [3]. Также было продемонстрировано, что в пределах одного калибра поток имеет довольно устойчивую конфигурацию, где внешняя форма ограничена внешним слоем смешивания, а внутренний контур потока определяется тепловым расширением, которое предполагается распределением высокой температуры в зоне рециркуляции изнутри вихревого ядра. Далее вниз по течению температурная изоповерхность имеет спиральную структуру, распространяющуюся с низкой частотой, что наблюдалось в предыдущих исследованиях в случае изотермического нижнего завихрения [4].

В дальнейших исследованиях было продемонстрировано, что введение дополнительной центральной струи позволяет осуществлять управление течением с целью подавления прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), как в реагирующем, как и в изотермическом случае [5]. Однако, отмечено, что инжектирование с помощью центральной струи недостаточно эффективно, и с помощью теории возмущений были получены предполагаемые координаты сопла, инжекция в которых будет более эффективной для подавления ПВЯ.

В данной работе проведена серия изотермических и реагирующих расчетов для различных расходов топлива и различных расходов инжектируемого потока. Инжекция осуществлялась по окружности на разных высотах соплового устройства. Было показано, что наблюдается эффективное подавление ПВЯ уже при расходах инжекции порядка 1-5% от общего расхода топлива в камере. В реагирующих расчетах с инжекцией продемонстрировано лучшее сгорание топлива, а так же подавление ПВЯ, что делает пламя гораздо более устойчивым, чем без инжекции дополнительного топлива.

Список литературы

1. Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion. – RT Edwards, Inc., 2005.
2. Pope S. B., Pope S. B. Turbulent flows. – Cambridge university press, 2000.
3. Hrebtov M. Y. et al. Large-eddy simulation of a reacting swirling flow in a model combustion chamber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2119. – №. 1. – С. 012031.
4. Hrebtov M. Y., Palkin E. V. and Mullyadzhyanov R. I. 2020 J. of Phys.: Conf. Series, 1677(1) 012012.
5. Palkin E. V. et al. Influence of a Central Jet on Isothermal and Reacting Swirling Flow in a Model Combustion Chamber //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 5. – С. 1615.

МАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЫ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ

Лаптева Е.А.¹, Фарахов М.И.², Лаптев А.Г.¹

¹ Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань,

² Инженерно-Внедренческий Центр «Инжехим» (ИВЦ «Инжехим»), Россия, Казань

e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Известны многие сотни разнообразных регулярных и хаотичных насадок, однако дискретно-шероховатые регулярные конструкции исследованы не достаточно полно, особенно для градирен и скрубберов охлаждения газов. Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование трубчатой насадки из полиэтилена с дискретной-регулярной шероховатостью в виде прямоугольных выступов при увлажнении воздуха водой, т.е. когда основное сопротивление массопередачи сосредоточено в газовой фазе.

Исследование процесса массообмена выполнялось на лабораторном макете насадочной колонны. Макет насадочной колонны представляет собой аппарат (колонну) заполненный регулярной насадкой высотой 1000 мм. Исходная жидкость (вода) подается из бака-накопителя по трубопроводу насосом в теплообменник, где подогревается до 20°C. Расход воды измеряется ротаметром, перепад давления в колонне измеряется дифманометром, температура термомпарой. Далее вода через распылительное устройство поступает на слой регулярной насадки в колонну. Измеряется относительная влажность воздуха на входе и выходе слоя насадки.

Удельная геометрическая поверхность насадки как для условно гладких труб составляет 110,8 м²/м³. Удельный свободный объем $\varepsilon_{св}=0,95$. Эквивалентный диаметр $d_э=0,034$ м.

Эксперимент проводился при температурах воды и воздуха 20°C; скорости газа $w_r=0,7-1,9$ м/с, плотности орошения $q_{ж}=4,9-14,1$ м³/(м² ч).

Исследовался процесс увлажнения воздуха водой. Измерялись расходы фаз и влагосодержание воздуха на входе x_n и на выходе x_k колонны. Определялся поток массы (кг/с) $M = \rho_r V_r (x_k - x_n)$, где V_r – объемный расход воздуха, м³/с; x_n, x_k – начальное и конечное влагосодержание, кг/кг; ρ_r – плотность газа, кг/м³.

Из уравнения массоотдачи $M = \rho_r \beta_r F \overline{\Delta x}$, вычислялся объемный коэффициент массоотдачи, а также эффективность массообмена

$$(\beta a)_x = \frac{M}{\Delta x V_{нас}}, \quad E_r = \frac{x_k - x_n}{x_k - x_n^*}, \quad (1)$$

где $(\beta a)_x$ – объемный коэффициент массоотдачи, кг/м³ с; $\overline{\Delta x}$ – средняя движущая сила массоотдачи, кг/кг; $V_{нас}$ – объем насадки, м³; F – площадь межфазной поверхности газ - жидкости, м².

Средняя движущая сила массообмена определялась как среднелогарифмическая.

На рис. 1 даны экспериментальные результаты по объемным коэффициентам массоотдачи при различных плотностях орошения от скорости воздуха. Очевидно, что как при увеличении плотности орошения,

так и скорости воздуха объемные коэффициенты увеличиваются. Это связано, как с повышением смоченной поверхности труб, так и турбулизацией газовой фазы. Однако, экспериментально установлено, что при увеличении скорости воздуха эффективность массообмена (рис.2) незначительно, но снижается, а при повышении плотности орошения повышается значительно. Однако, при плотности орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час) значения E_r имеют близкие значения. Для труб с гладкими стенками такое явление не наблюдается и при $q=12,4$ м³/(м²час) эффективность E_r больше на 8-10%, чем при $q=8,8$ м³/(м²час).

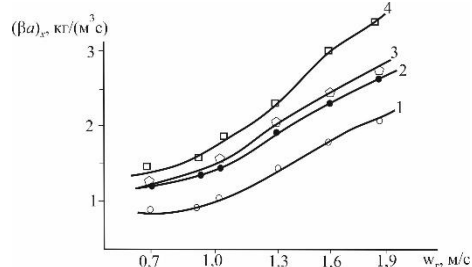


Рис. 1. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха. Плотность орошения: 1-4,9; 2-8,8; 3-12,4; 4-14,1 м³/(м² час)

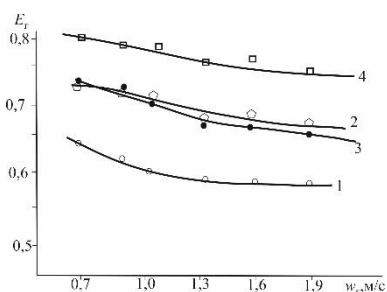


Рис. 2 Зависимость эффективности массообмена от скорости воздуха. Обозначения на рис 1.

Установлено, что полученные результаты по объемному коэффициенту массоотдачи удовлетворительно согласуются с расчетом по математической модели [1], а эффективность массообмена хорошо описывается моделью идеального вытеснения газа.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании насадочных скрубберов и пленочных градилен.

Список литературы

- Лаптев А. Г., Лаптева Е. А. Математические модели трения на поверхности раздела фаз и тепломассоотдачи в пленочных блоках оросителей градилен с интенсификаторами // Теоретические основы химической технологии, 2021, Т. 55, № 5, стр. 594-601.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-79-10136

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА НА ГРАНИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ РАСПЛАВА, ПОДОГРЕВАЕМОГО СНИЗУ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В ЯЭУ

Локтионов В.Д.^{1,2}, Мухтаров Э.С.¹

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО «НИУ – «МЭИ»), г. Москва

²Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций» (АО «ЭНИЦ»), г. Электрогорск, Московской области

e-mail: LoktionovVD@mpei.ru; Loktionov@erec.ru

В работе представлены и обсуждаются результаты численного анализа процессов теплообмена в плоском слое металлического расплава, подогреваемого по его нижней поверхности, при различных условиях теплообмена на его граничных поверхностях. Металлический слой расплава представляет собой расплав металлических компонентов (сталь, цирконий и др.) материалов активной зоны ядерного реактора, которые формируют данный цилиндрический слой внутри корпуса ядерного реактора в процессе тяжелой аварии (ТА). Вследствие стратификации компонентов в ванне расплава кориума, слой металлического расплава располагается над оксидной частью ванны расплава, имеющей остаточное тепловыделение. В этом случае, металлический слой расплава подогревается по его нижней поверхности со стороны нижележащей оксидной части расплава, что приводит к появлению эффекта фокусирования тепловой нагрузки на боковой поверхности металлического слоя расплава, воздействующей на корпус ядерного реактора.

Основная цель работы состояла в изучении закономерностей течения и условий теплообмена в плоском слое металлического расплава и построении аналитических зависимостей вида $Nu(Ra, Pr)$ для боковой и верхней граничных поверхностей слоя расплава в условиях, имитирующих тяжелую аварию в ЯЭУ. Одной из особенностей процессов теплообмена в таком слое расплава является то, что течение расплава происходит в условиях естественной конвекции при высоких числах Рэлея. Важной и значимой проблемой при изучении подобных систем является определение тепловых нагрузок и условий теплообмена на боковой и верхней поверхностях металлического слоя расплава в зависимости от ряда параметров, характеризующих условия протекание ТА. Изучение закономерностей протекания процессов теплообмена в слое расплава является крайне актуальным для реализации концепции внутриреакторного удержания расплава [1, 2] и предотвращения выхода радиоактивных материалов в окружающую среду при ТА. В настоящей работе изучение процессов теплообмена в слое расплава осуществлялось на основе численного моделирования естественной конвекции

в расплаве, которое выполнялось кодом ANES [3] с использованием различных моделей турбулентности, реализованных в данном коде. В качестве группы параметров, влияющих на условия теплообмена на граничных поверхностях слоя, рассматривались как геометрические (толщина и радиус слоя) характеристики слоя, так и теплофизические свойства расплава (коэффициент кинематической вязкости), а также параметры окружающей среды и граничные условия. В результате выполнения серий численных экспериментов и статистической обработки результатов моделирования были определены интегральные характеристики теплообмена на граничных поверхностях слоя расплава при различных значениях размеров слоя и свойств расплава.

Полученные соотношения для значений Nu на боковой и верхней поверхностях слоя расплава удовлетворительно согласуются в широком диапазоне значений чисел Рэлея (до $Ra \sim 10^{10}$) с известными аналогичными соотношениями. В то же время, для ряда расчетных случаев показана существенная зависимость числа Nu от значений числа Прандтля и от отношения геометрических размеров слоя расплава, что необходимо учитывать при выполнении практических расчетов при оценке значений тепловой нагрузки на корпус ядерного реактора, действующей со стороны слоя расплава в течение ТА.

Полученные в исследовании соотношения для чисел Нуссельта позволяют существенно снизить консервативность оценок тепловых нагрузок, действующих на корпус ядерного реактора при ТА, для определения которых используются подобные соотношения.

Список литературы

1. Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996. In-vessel Coolability and Retention of a Core Melt. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1.
2. Loktionov, V.D., Mukhtarov, E.S., Lyubashevskaya, I.V., 2018. Nuclear Engineering and Design, 326 (2018). 320–332. doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.11.015.
3. ANES team «ANES/20XE : Код для численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена. Описание математических моделей кода». - 2015. http://anesch12655.ttwweb.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МГНОВЕННОГО ОТРЫВА ПОТОКА В ДОЗВУКОВОМ КОНФУЗОРЕ ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА

Лукьянов А.А.^{1,2}, Зарипов Д.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: a.lukyanov@g.nsu.ru

Явление отрыва потока встречается в различных отраслях народного хозяйства, таких как авиастроение, ракетостроение и энергетика. Оно имеет важное практическое значение, поскольку возникновение отрыва потока напрямую влияет на эффективность и надежность работы тех или иных технических устройств. Между тем, говоря об отрывном течении, обычно имеется в виду формирование среднего отрывного течения, которое, вообще говоря, является результатом осреднения соответствующего флуктуирующего сигнала. Таким образом, в турбулентном пограничном слое (ТПС) может возникнуть мгновенный локальный отрыв потока, но отрыв среднего потока, при этом не сформируется, хотя при большой частоте появления соответствующих мгновенных локальных событий они могут оказать сильное влияние на такие величины, как гидравлическое сопротивление и теплообмен. Явление отрыва потока, возникающего в дозвуковых диффузорах, хорошо изучено и его существование не вызывает сомнений [1]. Возникновение таких явлений в безградиентном ТПС долгое время считалось невозможным [2], однако оно было экспериментально обнаружено в 2015 году [3], а механизм его формирования был предложен и обоснован в работе [4]. Оказалось, что вероятность возникновения таких событий в этом случае очень мала ($P \sim 0,01\%$), а высота отрывной области в 5 раз меньше толщины вязкого подслоя. В работе [5] было показано, что с увеличением положительного продольного градиента давления в ТПС вероятность возникновения обратного течения резко увеличивается. Однако вопрос о его существовании при отрицательном продольном градиенте давления, например, в конфузоре, остается открытым и требует дальнейшего исследования.

Для этого, в данной работе экспериментально (методом PIV) было рассмотрено турбулентное течение воздуха в дозвуковом плоском конфузоре при числе Рейнольдса $Re = 3100$, рассчитанном по полувысоте канала и среднерасходной скорости. Рассматривалось течение в канале длиной 6 м, конфузурная часть которой была длиной 1200 мм и располагалась на расстоянии 3600 мм от входного сечения рабочего участка постоянного поперечного сечения 100×100 мм². Входное сечение конфузора оставалось неизменным (100×100 мм²), а выходное сечение варьировалось: 100×80 , 100×60 , 100×40 мм².

Результаты предварительных измерений профиля скорости и турбулентных пульсаций вдоль поперечного сечения канала показали, что течение на входе в конфузор было турбулентным, развитым и без закрутки. Исследование процессов, протекающих в пристенной области ТПС, проводилось с высоким

пространственно-временным разрешением. В этом случае масштабный коэффициент используемой оптической системы был 120 пикс·мм⁻¹, а частота съемки – 4900 Гц. Алгоритм обработки полученных PIV-изображений и метод фильтрации осциллограмм скорости подробно описаны в работе [6]. Обработка PIV-изображений проводилась с использованием вытянутых в продольном направлении расчетных областей со сторонами 64×8 пикс без перекрытия, как наиболее оптимальным с точки зрения снижения неопределенности измерения и повышения пространственного разрешения. Проанализированы профили средней продольной скорости и турбулентных пульсаций скорости поперек канала. Проведено сравнение с соответствующими литературными данными.

Анализ мгновенных и условно осредненных осциллограмм скорости показал существование явления локального мгновенного отрыва потока в канале с выходным сечением 100×80 мм². Интересно, что в каналах с выходным поперечным сечением 100×60 и 100×40 мм² такие события обнаружены не были. Это свидетельствует о том, что либо существует критическое значение параметра Клаузера, при котором возникновение отрывного течения становится невозможным, либо события становятся настолько редкими, что рассматриваемого времени наблюдения оказалось недостаточно. Анализ условно осредненных осциллограмм продольной и нормальной к стенке составляющих вектора скорости в вязком подслое ($y^+ = 0,3$) и в буферной области ($y^+ = 13$) ТПС показал, что механизм их возникновения в конфузоре такой же, как и в канале с постоянным поперечным сечением.

Список литературы

1. Чжен К. Пауль. Отрывные течения // Перевод с английского докт. техн. наук. А.И. Голубинского. Под ред. Г.И. Майкапара. МИР. М. 1972–1973. В 3-х томах.
2. Eckelmann H. The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow // J. Fluid Mech. 1974. Vol. 65, № 3. P. 439–459.
3. Brücker Ch. Evidence of rare backflow and skin-friction critical points in near-wall turbulence using micropillar imaging // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27, № 3, Art. 031705. 7 p.
4. Zaripov D., Ivashchenko V., Mullyadzhanzov R., Li R., Mikheev N., Kähler Ch.J. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 923, Art. A20.15 p.
5. Lenaers P. et al., Rare backflow and extreme wall-normal velocity fluctuations in near-wall turbulence // Phys. Fluids. 2012. Vol. 24, № 3, Art. 035110. 19 p.
6. Zaripov D.I., Li R., Dushin N.S. Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar Particle Image Velocimetry // Experiments in Fluids. 2019. Vol. 60, № 1. 16 p.

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-29-01274)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ДВУХ МОДЕЛЕЙ, ИМИТИРУЮЩИХ ЗДАНИЯ РАЗНОЙ ВЫСОТЫ

Мешкова В.Д.¹, Дектерев А.А.^{1,2}, Дектерев Д.А.^{1,2}, Лобасов А.С.^{1,2}, Дектерев Ар.А.²

¹ Сибирский федеральный университет

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

e-mail: Redel-VD@yandex.ru

На протяжении нескольких десятилетий наблюдается особый интерес к изучению влияния застройки на изменение поведения ветрового потока. Аэрационный режим является определяющим фактором, обуславливающим микроклимат территории, от которого зависит процесс рассеивания загрязняющих веществ, а также формирования условий комфортной среды для пребывания в ней человека [1–2].

Существует несколько методов исследования аэродинамики обтеканий зданий. Традиционным методом изучения является проведение экспериментальных исследований в аэродинамических каналах [3]. В качестве альтернативного метода используется современные подходы в области CFD-методов. В настоящее время имеющиеся вычислительные мощности и должный уровень развития численных методов в области механики жидкости и газа позволяют оптимизировать процесс изучения рассмотренных выше задач. Но, стоит отметить, что используемые численные модели требуют верификации, чтобы удостовериться в адекватности полученных результатов. Как правило, верификация выполняется на основе данных физического эксперимента.

Одним из важных аспектов является и то, что проведение физического и численного моделирования осуществляется на модельных объектах, которые выдерживают условное геометрическое подобие с оригиналом и значительно меньшим масштабам. В связи с этим, необходимо, чтобы соблюдались условия и физического подобия. При рассмотрении изотермической задачи, достаточно выдержать подобие по одному критерию, в данном случае по числу Рейнольдса.

На основании выше сказанного выполнено исследование обтекания ветровым потоком модельных объектов, упрощенного вида зданий (с характерными размерами $50 \times 50 \times 100$ и $50 \times 50 \times 50$ мм) в аэродинамической трубе Сибирского федерального университета. Результаты исследования были получены в виде полей скоростей и турбулентных пульсаций, полученных с помощью PIV-метода.

Далее выполненный эксперимент был воспроизведен численно в ПО SigmaEco, в котором реализована математическая модель, основанная на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью. Использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST. Полученные результаты были сопоставлены с результатами эксперимента и показали хорошую сходимость между собой (рис. 1).

Следующий этап исследования заключался в определении корректности полученных результатов при обтекании моделей зданий в эксперименте и их переноса на реальный масштаб. При рассматриваемых

геометрических размерах модельных объектов в эксперименте, характеризующий параметр потока число Рейнольдса равняется $Re=17000$, в то время как, для размеров реальных строений составляет около $Re=6,8 \times 10^6$.

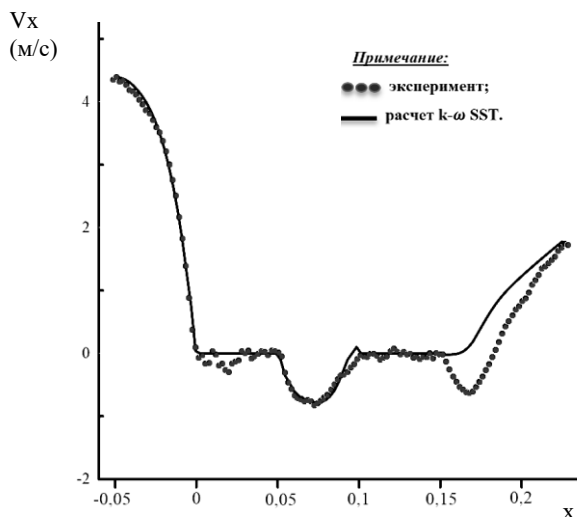


Рис. 1. Сравнение результатов численного моделирования с результатами эксперимента.

Точки – эксперимент. Линия – расчет $k-\omega$ SST.

Сопоставление результатов численного моделирования для чисел Рейнольдса $Re=17000$ и $Re=6,8 \times 10^6$ позволили выявить, что условия автомодельности соблюдаются и полученные в ходе эксперимента и численного моделирования данные являются корректными для реальных масштабов.

Отработанные методы и подходы позволяют выполнять оценки современных подходов градостроительства, связанных с организацией строительства микрорайонов.

Список литературы

1. Jingyuan Zhao, Jiaping Liu and Jing Sun. Numerical Simulation of the Thermal Environment of Urban Street Canyon and a Design Strategy Build Simul (2008) 1: 261–269 DOI 10.1007/s12273-008-8320-8.
2. Jing Xiao; Takaya Yuizono; Hideomi Goko. Numerical Simulation of Winter Microclimate and Thermal Comfort of an Asymmetric Canyon in the Urban Square Area. 2021 5th International Conference on Vision, Image and Signal Processing (ICVISIP). DOI: 10.1109/ICVISIP54630.2021.00044/.
3. Кузнецов С.Г., Ветровые нагрузки на кровлю малоэтажного здания под воздействием высотного здания / Кузнецов С.Г., Дроздов А.А. // Современное промышленное и гражданское строительство. 2010 Т. 6.

Работа поддержана РНФ
(грант № 22-61-00098)

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА

Михеев А.Н.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

e-mail: AndreiRonnieMiheev@yandex.ru

Представлены данные экспериментальных исследований кинематической структуры потока в условиях динамического воздействия на поток. Исследования проводились для нескольких значений частот при одном уровне относительных амплитуд пульсаций скорости потока. По результатам оптических измерений построены профили скоростей и турбулентных характеристик потока в характерных сечениях за источниками динамических воздействий.

Для визуализации течения в поток вводились специальные трассеры при помощи генератора аэрозоли, который располагался перед входом в рабочий участок установки. Расход подаваемых в поток частиц изменяется специальным регулятором. При визуализации потока использовался световой нож, создаваемый лазером непрерывного действия. Толщина ножа составляла 1 мм. Съемки проводились скоростной монохромной видеокамерой с частотой 4000 кадров/с, которая являлась оптимальной для последующего анализа и обработки изображений при максимальном разрешении кадров 1280×100 пикселей. Полученные методом дымовой визуализации видеоизображения затем обрабатывались методом SIV [1], который позволяет получать динамику векторных полей скорости и завихренности потока на основе поккадровой обработки результатов скоростной видеосъемки.

Для получения новых экспериментальных данных о влиянии динамического воздействия путем перемешивания на характеристики турбулентности потока, были измерены осредненные профили поперечной компоненты скорости, ее среднеквадратических отклонений, а также завихренности в различных сечениях канала и для различных частот вращения миксеров (рис.1).

Анализ данных профилей позволяет сделать вывод о том, что внесение такого вида динамического воздействия в турбулентный поток приводит к сильному искажению профиля скорости, по сравнению с классическим профилем для турбулентного потока.

Анализируя профили среднеквадратических отклонений продольной и поперечной компонент скорости, очевидно, что увеличение частоты вращения миксеров не всегда приводит к увеличению СКО компонент скорости.

Анализ профилей завихренности показал, что принудительное перемешивание потока с симметричным расположением миксеров не оказывает существенного влияния на завихренность потока по сравнению с вариантом течения без перемешивания, не создает закрутки потока или тяги.

Также была проанализирована эволюция профилей статистических характеристик турбулентности в зависимости от расстояния до системы миксеров на одном из режимов.

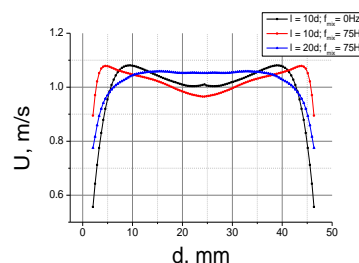


Рис. 1а. Профи продольной компоненты скорости.

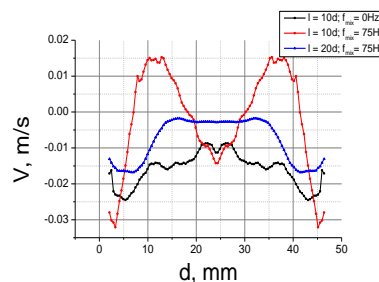


Рис. 1б. Профи поперечной компоненты скорости.

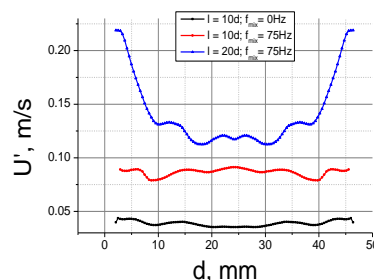


Рис. 1в. Профи пульсаций продольной компоненты скорости.

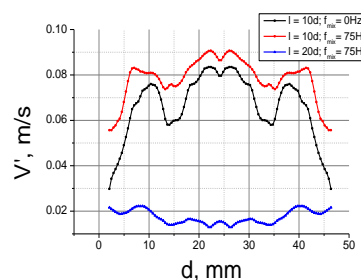


Рис. 1г. Профи пульсаций поперечной компоненты скорости.

Список литературы:

1. Molochnikov V.M., Mikheev N.I., Mikheev A.N., Paereliy A.A., Dushin N.S., Dushina O.A. SIV measurements of flow structure in the near wake of a circular cylinder at $Re=3900$ // Fluid Dynamics Research 51

*Работа выполнена при финансовой поддержке
гранта РНФ 21-71-00107*

ТЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛОВ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОКСИМАЛЬНЫЙ КОНЕЦ АНАСТОМОЗА

Молочников В.М.¹, Михеев Н.И.¹, Михеев А.Н.¹, Мазо А.Б.², Калинин Е.И.², Ключев М.А.¹

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

² Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Казань, ул. Кремлевская, 18

e-mail: vmolochnikov@mail.ru

Одно из направлений исследований течения в разветвляющихся каналах связано с гемодинамикой в области шунта артерии. В 20–50% постоперационных случаев наблюдается нарастание внутренней поверхности протеза нижних конечностей с последующим полным прекращением кровотока. Многочисленные исследования свидетельствуют о взаимосвязи этих процессов с гемодинамическими факторами: низким поверхностным трением и его значительными градиентами. Основной объем исследований выполнен для области слияния двух потоков. Слабо изучена структура течения в области разветвления каналов (проксимальный анастомоз), а также процессы перехода к турбулентности, которые могут иметь место в области разветвления при более низких, по сравнению с гладким прямым каналом, числах Рейнольдса.

В настоящей работе представлены результаты эксперимента и прямого численного моделирования (DNS) течения в области разветвления каналов, моделирующего проксимальный анастомоз конец-в-бок. На этом этапе исследования выполнены для стационарного режима при $Re=1500$, что соответствует максимальному расходу крови в бедренной артерии за период сердечных сокращений. Экспериментальные исследования проводились в установке, описание которой представлено в [1]. В качестве рабочего тела использовался водный раствор глицерина. Установка снабжена системой измерений мгновенных двумерных векторных полей скорости потока SIV. Рабочий участок установки имеет форму разветвляющегося канала диаметра $d=17$ мм. Ответвление располагалось под углом 60° к основному каналу. Прямое численное моделирование выполнялось в пакете Ansys Fluent версии 19.4 методом конечных объемов. Решались трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса в безразмерных естественных переменных. В экспериментах и расчетах варьировалось соотношение расхода через основной канал $Q1$ к полному расходу через рабочий участок установки Q .

Получено удовлетворительное соответствие расчетных (DNS) и экспериментальных профилей скорости потока и ее пульсаций. Выявлены основные закономерности развития вихревой структуры течения в области разветвления в зависимости от соотношения $Q1/Q$. Установлено, что при увеличении $Q1/Q$ от 0 до 0,5 вихревая структура в основном канале ниже разветвления трансформируется от системы вращающихся в противоположные стороны вихрей масштаба $\sim d$ до развитой отрывной области в на противоположной от ответвления стенке канала, в которой формируются крупномасштабные вихри, периодически сносимые внешним потоком (рис.1). При

этом в ответвлении образуется отрывная область с поперечным размером $0,75\dots 0,8d$, в пределах которой локализуются вторичные течения (вихри Дина). Получены закономерности изменения пульсаций скорости вдоль границы отрывной области на каждом режиме. Показано, что уровень этих пульсаций приблизительно такой же, как на внешней границе турбулентного пограничного слоя. При $Q1/Q=0,75$ происходит существенная перестройка течения в области разветвления: зоны отрыва потока уменьшаются, а уровень пульсаций скорости на их границе резко снижается. По результатам DNS получены поля мгновенной и осредненной скорости потока скорости потока в поперечных сечениях основного канала и ответвления (рис.2), а также распределения поверхностного трения на стенке каналов при различных $Q1/Q$. Выявлена локализация областей низкого трения.

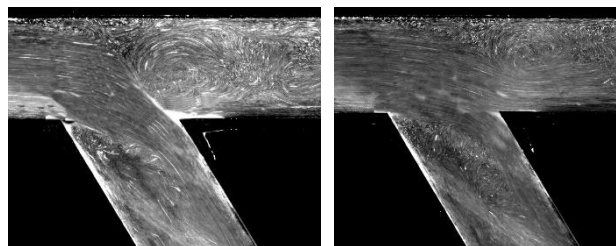


Рис.1. Визуализация структуры течения в области разветвления при $Q1/Q = 0$ (слева) и 0,5 (справа)

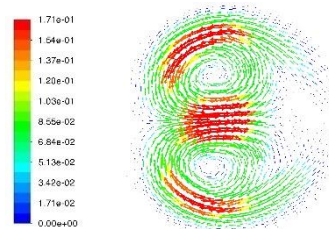


Рис.2. Векторное поле вторичного течения в ответвлении при $Q1/Q = 0,5$

Полученные данные вместе с результатами анализа спектров пульсаций свидетельствуют, что при $Q1/Q=0\dots 0,5$ наблюдаются признаки локальной турбулизации потока в основном канале и ответвлении.

Список литературы

1. V M Molochnikov, N I Mikheev, A N Mikheev, A A Paereliy, A E Goltsman Investigating a pulsating flow in the smooth channel and at the bifurcation section with regard to the popliteal artery hemodynamics // Journal of Physics: Conference Series 2119 (2021) 012020

Работа поддержана РФФ №20-61-47068 (научные результаты) и ФИЦ КазНЦ РАН (FMEG-2021-0001) (апробация метода DNS)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ГАЗО-ВИХРЕВОМ БИОРЕАКТОРЕ

Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Скрипкин С.Г.

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

e-mail: naumov@itp.nsc.ru

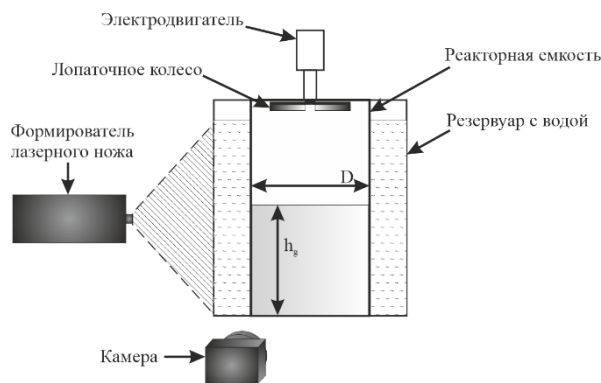
Во многих вихревых аппаратах существует взаимодействие вращающейся рабочей жидкости с другой жидкостью или газом, например, при неполном заполнении реактора рабочей жидкостью [1]. Изучение особенностей квазистационарного вращательного движения несмешиваемых сред в таких устройствах, становится важной задачей как с точки зрения оптимизации работы действующих установок, так и для проектирования новых устройств. Биореакторы являются одним из основным звеньев в различных технологических процессах, их применяют для обеспечения оптимальных условий жизнедеятельности культивируемых сред. В газо-вихревом биореакторе перемешивание суспензии клеток осуществляется путём создания в ней квазистационарного вращательного движения, генерируемого закрученным потоком газа.

Целью работы является экспериментальное исследование распределения скорости при организации вихревого движения в газо-вихревом биореакторе. В работе проведено исследование формирования циркуляционных вихревых ячеек в жидкости. Экспериментальное исследование выполнено в промышленном стеклянном биореакторе объемом 10 литров с диаметром реакторной емкости $D=190$ мм (рис. 1(а)). Вихревое движение воздуха генерируется активатором с частотой вращения Ω до 2700 об/мин при заполнении реакторной емкости на 50% и 80% модельной средой. В качестве модельной среды использовался 65% водный раствор глицерина (плотность $\rho=1150$ кг/м³ и кинематическая вязкость $\nu=15$ мм²/с). Для поддержания постоянной температуры и избавления от оптических aberrаций, реактор был помещен в резервуар квадратного сечения, заполненный водой. Для наблюдения картины вихревого движения применялись методы цифровой трассерной визуализации (PIV) и адаптивной трековой визуализации [2].

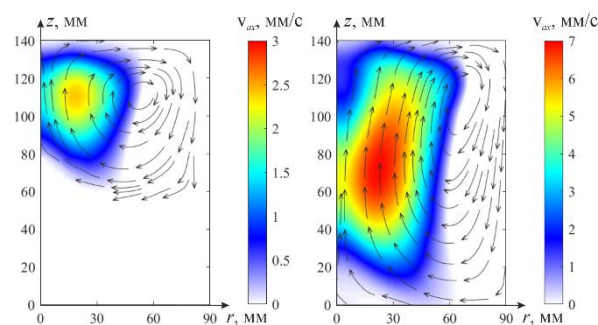
Показано, что при вращении активатора в жидкости возникает меридиональное и циркуляционное течение. Под границей раздела возникают ячейки центробежной циркуляции, которые при увеличении частоты вращения активатора увеличиваются в глубь реактора. На рис. 1(б) представлены скалярные поля осевой компоненты скорости в жидкости при $\Omega=720$ (слева) и 1800 об/мин (справа), полученного методом PIV в вертикальном сечении. Для удобства на рис. 1(б) приведены половины скалярных полей скорости в жидкости, где левый край изображения соответствует оси реакторной емкости, а правый край – периферии.

Были определены закономерности вихревого движения модельной среды в зависимости от ее объема и интенсивности вращения активатора. Установлено, что развитие центробежной циркуляции жидкости происходит аналогично тому, как это происхо-

дит в замкнутом вихревом течении одной жидкости и в нижней жидкости в системе ограниченного вихревого движения двух несмешиваемых жидкостей [3].



(а)



(б)

Рис. 1. Схема экспериментального стенда (а), скалярное поле осевой компоненты скорости при $\Omega = 720$ (слева) и 1800 об/мин (справа) (б).

Список литературы:

1. Savelyeva A. V. et al. Analysis of the efficiency of recombinant *Escherichia coli* strain cultivation in a gas-vortex bioreactor // *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2017, Vol. 64(5), P. 712–718.
2. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Naumov I.V. Visualization the different type of vortex breakdown in conical pipe flow with high cone angle // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2021, Vol. 28(2), P. 43–53.
3. Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // *Теплофизика и аэромеханика*, 2021, Т. 28, № 1, С. 67–78.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00083).*

ХАОТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ВИХРИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ СУММА**Немировский С.К.^{1,2}**¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1²Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

На основе теории термодинамического равновесия в системе квантовых вихрей в сверхтекучих жидкостях и в конденсате Бозе – Эйнштейна при наличии противотока нормальной и сверхтекучей компонент вычисляется статистическая сумма, учитывающая различные конфигурации вихря нитей, а также распределение петель по длине. Обсуждаются общие черты статистической суммы и некоторые свойства ансамбля множества хаотических вихревых волокон, связанные с этими характеристиками.

Ранее (см. [1]) нами было показано, что ансамбль вихревых нити под действием случайной ланжевеновской силы в сверхтекучем гелии в присутствии противотока с относительной скоростью \mathbf{v}_{ns} приходит в состояние термодинамического равновесия с распределением Гиббса

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

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

$$H_c(\{\mathbf{s}\}) = E(\{\mathbf{s}\}) - \mathbf{P}(\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_s) \quad (2)$$

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

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

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

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

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

В общем виде вычисление статистической суммы представляет очень большую сложность. Это удалось однако выполнить с использованием кубической решёточной модели (с ребром a), в рамках так называемого локального приближения для интеграла энергии (3). При таком подходе интеграл по траекториям становится гауссовым и может быть точно вычислен. Техника близка к задаче о движении заряженной частицы в постоянном магнитном поле [3]. В результате полученных вычислений удалось получить следующее выражение для статистической суммы

$$\int \left(\frac{dl}{l}\right) \left(\frac{3/2}{\pi a l}\right)^{3/2} \left[\frac{\sin(l\kappa\beta\alpha\rho_s v_{ns}/6)}{l\kappa\beta\alpha\rho_s v_{ns}/6}\right]^{-1} \exp[-\beta\varepsilon l]$$

Здесь $\beta = 1/k_B T$. Величина ε – это энергия вихревой линии на единицу длины (натяжение).

С использованием полученной статистической суммы можно вычислить различные структурные факторы квантовой турбулентности, например, среднюю поляризацию вихревых петель, входящих в состав вихревого клубка в противотоке гелия II, а также анизотропию и среднюю кривизну. Эти величины были ранее получены только в численной работе Шварца [4]. Представляет интерес сравнить результаты по равновесным свойствам вихревого клубка, которые могут быть получены на основании развитого здесь формализма, с данными по квантовой турбулентности. Эту программу предполагается реализовать в дальнейшем

Список литературы

1. Nemirovskii, S. K. . Thermal Equilibrium of Vortex Lines in Counterflowing He II // Journal of Low Temperature Physics. 2016. V. 185. P. № 5–6. 365–370.
2. Nemirovskii S. K., Quantum turbulence: Theoretical and numerical problems // Phys. Rep. 2013. V.524, P. 85–202.
3. Kleinert, H.: Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistics, Polymer Physics, and Financial Markets. World Scientific, Singapore, (1990)
4. Schwarz, K. W., Three-dimensional vortex dynamics in superfluid ^4He : Homogeneous superfluid turbulence // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. № 4. P. 2398–2417.

Работа поддержана РФФ (грант № 22-69-00046) и Государственным заданием в Институте теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук (AAAA-A17-117022850027-5)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ЗА МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНОЙ ФРЭНСИСА

Палкин Е.В.¹, Хребтов М.Ю.¹, Мулляджанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: palkinev89@gmail.com

Гидроэнергетика является одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии. Сегодня гидроэнергетика играет ключевую роль в переходе к чистой энергии не только из-за огромного количества вырабатываемой ею электроэнергии с низким содержанием углерода, но также из-за ее способности обеспечивать гибкость и хранение энергии. Радиально-осевые турбины относятся к наиболее распространенным в мире типам турбин, которые могут эксплуатироваться при частичных и форсированных нагрузках генератора.

В данной работе численно было исследовано течение в модельной воздушной турбине Фрэнсиса-99 с завихрителем, вращающимся с фиксированной частотой, в широком диапазоне режимов с использованием вихреразрешающего подхода. Было проведено сравнение нескольких режимов низкой нагрузки с использованием экспериментальных данных. Большинство исследованных режимов выявляют наличие в отсасывающей трубе когерентной винтовой вихревой структуры - прецессирующего вихревого жгута или ядра (ПВЯ) [1]. Визуализация ПВЯ, полученная в численном исследовании, доступна по адресу <https://youtu.be/PGIH353jWYM>.

Используемая модель турбины использует два блока завихрителей для воспроизведения поля скоростей за рабочим колесом полномасштабной гидротурбины Фрэнсиса. Такой подход значительно снижает затраты на исследование течения как численно, так и экспериментально. Пара завихрителей была рассчитана на оптимальные условия работы (точка наилучшего КПД или best efficiency point, BEP), соответствующие объемному расходу и скорости вращения рабочего колеса. Рабочие параметры установки варьировались от различных расходов до различных режимов работы гидротурбины. Используется отсасывающая труба Фрэнсиса-99. Такая схема установки полностью соответствует геометрии и режимам, реализованным на лабораторной установке, расположенной в Институте теплофизики СО РАН [2].

В рамках численного исследования мы используем вычислительный пакет OpenFOAM с открытым исходным кодом, основанный на методе конечных объемов, имеющий второй порядок точности как по времени, так и по пространству. Код численно решает трехмерные пространственно отфильтрованные несжимаемые уравнения Навье-Стокса, которые соответствуют подходу крупных вихрей (large-eddy simulation, LES). Подсеточные масштабы моделируются динамической моделью Смагоринского.

Для проведения нестационарных расчетов методом LES для модельной геометрии гидротурбины была построена гексагональная вычислительная сетка, состоящая из трех неконформных блоков (см. рис. 1). На входе задается однородный профиль скорости с фиксированным расходом, на выходе ставится выходное граничное условие. Все расчеты были выполнены при частичной нагрузке $Q < Q_c$, а именно при входном расходе $Q / Q_c = 0.30, 0.5, 0.65$ отвечающие числам Рейнольдса 11 600, 19 300 и 25 100, соответственно.

С помощью метода главных компонент будут исследованы вихревые структуры, возникающие за рабочим колесом.

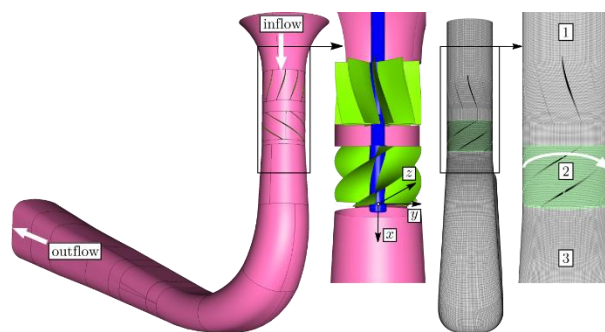


Рис. 1. Исследуемая геометрия модельной гидротурбины (слева) и вычислительная сетка (справа). На левом рисунке все поверхности соответствуют непроницаемым стенкам, также отмечены декартова система координат, вход и выход. Первый стационарный и второй вращающийся постоянный угловой частотой 40.53 Гц завихритель состоит из 10 и 5 лопаток, соответственно. Блоки 1 и 3 на правом рисунке стационарны, а блок 2 вращается в указанном направлении.

Список литературы

- Gallaire F., Ruith M., Meiburg E., Chomaz J.M., Huerre P. Spiral vortex breakdown as a global mode // *J. Fluid Mech.* 2006. V. 549, P. 71–80
- Litvinov I., Shtork S., Gorelikov E., Mitryakov A., Hanjalic K. Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2018. V. 91, P. 410–422.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, грант № СП-829.2021.1.

Разработка вычислительного кода выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

ЛОКАЛЬНАЯ ЛАМИНАРИЗАЦИЯ В УСКОРЕННОМ ПРИСТЕННОМ ТЕЧЕНИИ

Сахнов А.Ю.

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

e-mail: aleksei_sakhnov@mail.ru

В работе [1] на основе достаточно простого анализа интегрального соотношения импульсов для ускоренного турбулентного пограничного слоя В.М. Кейс получил минимальное значение параметра $K=3.55 \times 10^{-6}$, при котором происходит реламинаризация всего турбулентного пограничного слоя. Как показано в работе [2] турбулентные пульсации и кинетическая энергия турбулентности снижаются в условиях ускоренного течения, что и является индикатором ламинаризации.

В ускоренных пристенных течениях с существенной разницей плотности газа вблизи стенки и в основном потоке может возникать явление прострела продольной скорости, при котором скорость внутри пограничного слоя превышает скорость основного потока [3]. Чтобы исследовать это явление в турбулентном пограничном слое на нагретой стенке, мы задавали слабое ускорение потока $K=3 \times 10^{-7}$. Однако, кинетическая энергия турбулентности вблизи стенки была снижена по сравнению с ускоренным турбулентным потоком, а распределение скорости совпало с ламинарным профилем [4]. Таким образом, ламинаризация происходила локально, только в пристенной области пограничного слоя.

В данной работе проведено численное моделирование пограничного слоя воздуха на нагретой поверхности при наличии продольного градиента давления (Рис.1). Численная модель состояла из системы уравнений Прандтля, описывающих динамические и тепловые процессы в пограничном слое, и $k-\omega-\gamma$ модели турбулентности, позволяющей обоснованно моделировать ламинарно-турбулентный переход и подавление турбулентности. Для решения дифференциальных уравнений применялись конечно-разностные методы. Расчётная сетка имела сгущение к стенке по всей её длине и к передней кромке пластины до $Re_x=100$, а при больших числах Рейнольдса шаг сетки вдоль оси x оставался постоянным 2×10^{-5} м.

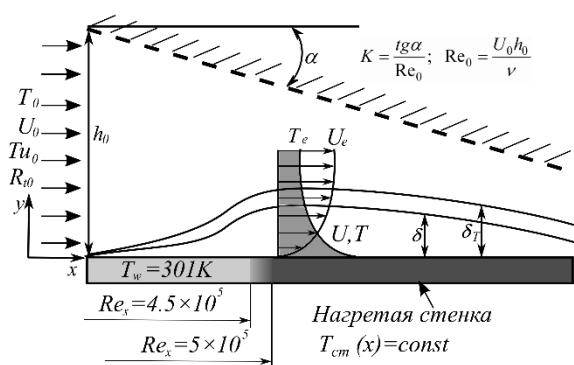


Рис. 1. Схема течения.

На рис. 2 показано сравнение профилей продольной скорости в пограничном слое на нагретой стенке в присутствии слабого градиента давления. Профиль 1 соответствует течению рассчитанному с учё-

том модели турбулентности $T_{cm}=1110$ К. Исходя из данных по коэффициенту перемежаемости и кинетической энергии турбулентности, этот профиль вблизи стенки описывает распределение скорости ламинарного течения, а в остальной части пограничного слоя изменение скорости соответствует турбулентному потоку. Профиль 2 рассчитан без модели турбулентности в тех же условиях, что и профиль 1. Как видно, профили 1 и 2 вблизи стенки совпадают, отличаясь только величиной прострела. Профиль 3 рассчитан с учётом модели турбулентности при $T_{cm}=1100$ К. Здесь локальная ламинаризация вблизи стенки отсутствует. Очевидно, что без изменения режима течения разница по температуре стенки в 10 К незначительна для распределения скорости в пограничном слое. Однако, появление локальной ламинаризации вблизи стенки приводит к заметному различию профилей 1 и 3 в этой области. Таким образом, профиль 1 состоит из ламинарной и турбулентной частей. Другими словами, локальная ламинаризация приводит к одновременному сосуществованию ламинарного и турбулентного течений внутри пограничного слоя.

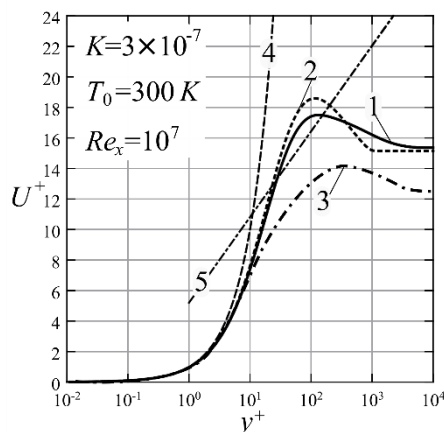


Рис. 2. Профили скорости при $T_{cm}=1110$ К: 1 – расчёт с моделью турбулентности, 2 – расчёт без модели турбулентности; 3 – профиль скорости при $T_{cm}=1100$ К; 4 – ламинарный подслей; 5 – логарифмический закон.

Список литературы

1. W.M. Kays, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1966.
2. G. Saltar, G. Araya Reynolds shear stress modeling in turbulent boundary layers subject to very strong favorable pressure gradient // Computers and Fluids 2020. V 202. Paper 104494.
3. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Лукашов В.В. Теплообмен в ускоренном химически реагирующем пограничном слое // ДАН. 1996. Т. 350. № 6. С. 763–765.
4. А.Ю. Сахнов Local laminarization within the mild pressure gradient flow over the heated wall // Int. J. Heat and Mass Transfer 2021. V 165. Part B. Paper 120698.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН №121031800217-8

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДВУХСПИРАЛЬНОГО РАСПАДА ВИХРЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Скрипкин С.Г., Шторк С.И.

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

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

Экспериментальное исследование закрученных потоков с образованием крупномасштабных вихревых структур представляет значительный интерес с точки зрения фундаментальной науки, так как подобные структуры широко распространены в природе в различных масштабах. Не менее важную роль вихревые структуры играют и в технических приложениях, например, камерах сгорания [1], вихревых сепараторах и циклонах [2], вихревых химических и солнечных реакторах [3]. Отдельный интерес представляет собой нестационарный двуспиральный распад вихря, такие режимы течения встречаются гораздо реже, а ограниченное количество экспериментальных данных является основной проблемой, сдерживающей дальнейшее развитие аналитических теорий винтовых вихрей.

Исследования проводились в вихревой камере тангенциального типа, являющейся частью замкнутого гидродинамического контура. Основными режимными параметрами являлись число Рейнольдса и геометрический параметр крутки. Были определены границы, с точки зрения режимных параметров, формирования устойчивых прецессирующих двойных вихревых структур и области с наблюдаемым периодическим переходом между двойной и одинарными модами. В качестве определяющего структуру течения параметра был выбран конструктивный (или геометрический) параметр крутки S . Параметр $S = D^2 \sin(\gamma) / (N \cdot s)$ можно оценить, исходя из геометрии вихревой камеры: где $D = 190$ мм – диаметр камеры, $N = 4 \times 3 = 12$ – количество сопел, $s = 14 \times 23$ мм – площадь одного сопла, а γ – угол поворота сопел относительно центральной оси. Угол поворота сопел γ меняется от 0 до 45 градусов, соответственно, параметр крутки может варьироваться 0 до 6.6. При перекрытии ряда сопел параметр крутки может быть увеличен пропорционально отношению площадей открытых и закрытых сопел.

Было установлено, что при увеличении закрутки потока больше 10 двойная вихревая спираль вырождается и в потоке начинает доминировать мода $m=1$, при дальнейшем увеличении закрутки $m=1$ становится устойчивой. На рисунке 1 приведено сопоставление визуализации фазово-осредненной структуры вихревого течения для $S=6.6$ и для $S=13.2$, полученных в результате PIV измерений в горизонтальном сечении центральной области вихревой камеры. Осреднение для каждой фазы вихря проводилось примерной по 100 мгновенным полям скорости.

Полученные количественные данные о структуре вихревого течения могут быть полезны для верификации CFD кодов при моделировании вихревого течения, а также при совершенствовании аналитических моделей, использующих винтовую симметрию

приемлемо описывающие только односпиральные вихревые структуры.

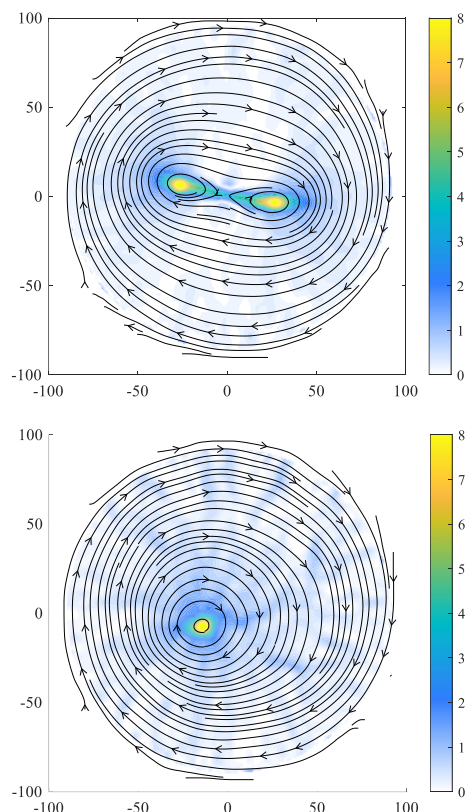


Рис. 1. Фазово-осредненная картина течения, визуализированные вихревым критерием Γ [4] $S = 6.6$ (сверху), $S = 13.2$ (снизу).

Список литературы

1. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgoin, P. Morenton, M. Viallon, T. Schuller, S. Candel. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control, *Combust. Flame*. 160 (2013) 1729–1742. doi:10.1016/j.combustflame.2013.03.004.
2. K. Elsayed, C. Lacor, Modeling, analysis and optimization of air-cyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches, *Powder Technol.* 212 (2011) 115–133. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // *J. Eng. Therm.* 2008. V. 17, No. 1. P. 53–59. 2.
3. A. Chinnici, M. Arjomandi, Z.F. Tian, Z. Lu, G.J. Nathan, A Novel Solar Expanding-Vortex Particle Reactor: Influence of Vortex Structure on Particle Residence Times and Trajectories, *Sol. Energy*. 122 (2015) 58–75.
4. Graftieaux, L., Michard, M., & Grosjean, N. (2001). Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. *Measurement Science and technology*, 12(9), 1422.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00769)*

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СТРУИ

Сорокин М.И.^{1,2}, Лебедев А.С.¹, Токарев М.П.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: m.sorokin@g.nsu.ru

Явление отрыва потока с поверхности обтекаемого тела может приводить к таким нежелательным эффектам, как: увеличение лобового сопротивления, возникновение подъемной силы, вибрации и акустический шум. Для подавления этих эффектов могут использоваться методы пассивного и активного управления отрывом потока, развитие которых имеет большое прикладное значение для промышленности, в частности – для летательных аппаратов, автомобилей и зданий.

Целью данной работы является развитие методов активного управления отрывом потока с использованием пульсирующей струи. В качестве обтекаемого тела был выбран круглый, поперечно обтекаемый цилиндр. Такой выбор обусловлен тем, что задача обтекания цилиндра хорошо изучена и представлена широким набором литературных данных. Это позволяет в полной мере верифицировать полученные экспериментальные данные. Результаты, полученные при исследовании методов управления отрывом потока на примере круглого цилиндра в последствии могут быть обобщены на объекты с более сложной геометрией.

В статье [1] было проведено исследование влияния частного случая пульсирующей струи – синтетической струи на характер течения в отрывной области за цилиндром, а также на величину лобового сопротивления поверхности цилиндра в зависимости от частоты и среднего импульса струи. В результате исследований было достигнуто уменьшение коэффициента лобового сопротивления цилиндра на 35% на частоте, приближенной к собственной частоте системы.

В настоящей работе эксперименты проведены на малогабаритной аэродинамической трубе, оборудованной PIV системой (см. рис. 1). Рабочий участок установки представляет собой прозрачную трубу из органического стекла, имеющую прямоугольное сечение 125×125 мм², длиной 1000 мм. Объект исследования выполнен в виде полого круглого цилиндра с продольной щелью, через которую в область за цилиндром подается струя воздуха. Реализация методов активного управления осуществляется в двух конфигурациях:

– синтетическая струя с нулевым расходом массы [2], генерируемая с помощью акустического динамика, усилителя и генератора сигналов произвольной формы (см. рис. 2);

– пульсирующая струя, генерируемая с помощью постоянно-подаваемого сжатого воздуха и высококачественного электромагнитного клапана.

Для обеих конфигураций была проведена серия PIV экспериментов при следующих параметрах: скорость набегающего потока – 5 и 10 м/с, $Re=5000$ и 10000 – соответственно, собственная частота

$f=64$ Гц. Также, для пульсирующей струи была проведена серия экспериментов с измерением коэффициента лобового сопротивления круглого цилиндра. Для измерения коэффициента лобового сопротивления использовались тензометрические датчики.

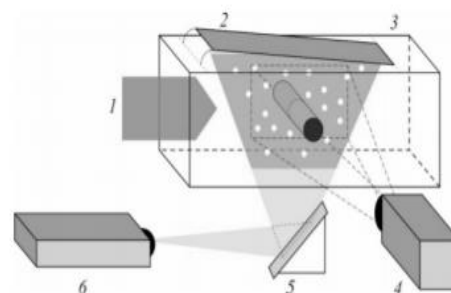


Рис. 1. Схема рабочего участка экспериментальной установки: 1 – набегающий поток; 2 – зеркало; 3 – измерительная область; 4 – камера; 5 – зеркало; 6 – лазер. Белые точки – трассеры

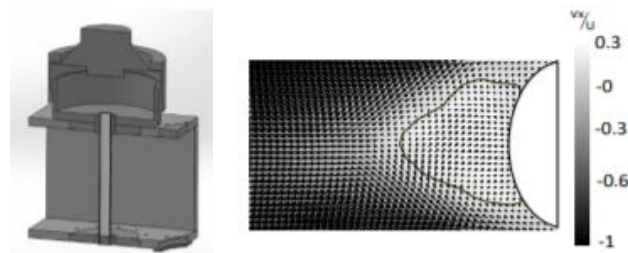


Рис. 2. Изображение объекта исследования в конфигурации синтетической струи с закрепленным на торце динамиком (слева), поле средней продольной компоненты скорости при частоте воздействия синтетической струи 32 Гц (справа).

Список литературы

1. Greco C. S. et al. The von Kármán street behind a circular cylinder: Flow control through synthetic jet placed at the rear stagnation point //Journal of Fluid Mechanics. – 2020. – Т. 901.
2. Smith B. L., Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets //Physics of fluids. – 1998. – Т. 10. – №. 9. – С. 2281-2297.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-79-30075)

ТЕПЛОБМЕН В ИМПАКТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДВУХ ГАРМОНИК

Строева П.С.^{1,2}, Ничик М.Ю.¹, Токарев М.П.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: vmd@itp.nsc.ru

Турбулентные сдвиговые течения, в том числе струи, широко применяются во многих областях промышленности в силу относительной простоты их реализации и высокой эффективности. В настоящее время актуальной задачей является развитие эффективных методов управления гидродинамикой струйных течений для интенсификации тепломассообмена.

Одним из наиболее известных методов активного контроля струйными потоками является внесение в поток периодических пульсаций расхода жидкости. Воздействие на поток возмущениями различной частоты может привести к усилению или ослаблению когерентных структур, что, в свою очередь, приводит к изменению интенсивности теплообменных процессов. Таким образом, крупномасштабные вихревые структуры в струях играют важную роль в процессе тепломассопереноса [1].

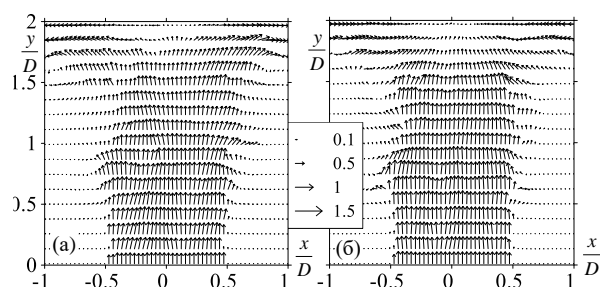


Рис. 1. Векторные поля мгновенной скорости струи:
(а) – возмущение на одной частоте $f = 12.4$ Гц,
(б) – возмущение с использованием модуляции $f = 12.4$ Гц,
 $f_m = 6.2$ Гц

Возбуждение струи как один из методов активного контроля струйными потоками достаточно хорошо изучен. Однако, систематическое исследование влияния возмущения на двух частотах (с использованием модуляции) на характеристики импактной струи и теплообмен вблизи импактной поверхности в литературе отсутствует. Амплитудная модуляция осуществляется простым умножением модулирующего сигнала на несущий.

В экспериментах рабочей жидкостью служила дистиллированная вода, число Рейнольдса составляло $Re=12\,500$. Импактная струя формировалась круглым соплом Витошинского с внутренним диаметром $D=20$ мм. Расстояние между кромкой сопла и импактной поверхностью составляло $H=2D$. Пульсации расхода жидкости генерировались на частоте наибольшей восприимчивости струи [2], которая соответствовала числу Струхаля $St=0.5$. Значение пульсационного расхода составляло 10% от общего расхода струи. Импактная поверхность изготовлена из сапфирового стекла (150×150 мм). Со стороны во-

ды стекло покрыто тонкой проводящей пленкой из оксида индия-олова (толщина 1.2 мкм), прозрачной в видимом диапазоне. Через покрытие пропускался электрический ток 12 А, обеспечивая равномерный нагрев 1.1 Вт/см². Инфракрасная камера Titanium HD 570M (FLIR Systems ATS) регистрировала температуру проводящей пленки на нагревательном элементе, которая варьировалась от 30 до 42°C. Температура воды в рабочем канале поддерживалась постоянной на уровне 27 ± 0.1 °C.

В данной работе методом цифровой трассерной визуализации были получены поля распределения мгновенной скорости струи (рис.1), пульсационных составляющих радиальной и продольной компонент скорости, а также поля распределения модуля средней скорости и напряжения Рейнольдса. Для реализации метода PIV был использован измерительный комплекс, состоящий из двойного импульсного Nd:YAG лазера Photonics Industries DM-525-50, высокоскоростной CMOS-камеры Photron Fastcam Nova S12. Частота съемки составляла 3 кГц.

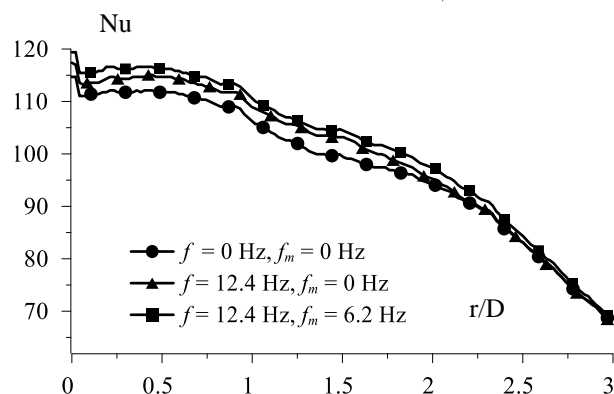


Рис. 2. Распределение числа Нуссельта

На рис. 2 представлено распределение числа Нуссельта в трех режимах для сравнения: без воздействия, с воздействием $f=12.4$ Гц и с воздействием с модуляцией ($f=12.4$ Гц и $f_m=6.2$ Гц). Теплоотдача получается интенсивнее для режима с двухчастотным воздействием.

Список литературы

1. Drobnik S., Elsner J. W., El-Kassem E. S. A. The relationship between coherent structures and heat transfer processes in the initial region of a round jet //Experiments in fluids. – 1998. – Т. 24. – №. 3. – С. 225-237.
2. Vejrazka J. et al. Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet //Physics of Fluids. – 2005. – Т. 17. – №. 10. – С. 105102.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-79-30075)

СДВИГОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ТРИАДНЫЕ РЕЗОНАНСЫ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С КОЛЕБЛЮЩИМСЯ ЯДРОМ

Субботин С.В.¹, Шмакова Н.Д.², Ерманык Е.В.², Козлов В.Г.¹

¹ Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуется устойчивость осредненного течения во вращающейся сферической полости с колеблющимся ядром. Рассматривается случай круговых колебаний, когда ядро в системе отсчета полости движется по круговой траектории в плоскости перпендикулярной оси вращения. В результате осциллирующего движения в сферическом слое возбуждается осредненное азимутальное течение, структура которого зависит от безразмерной частоты колебаний.

В области частот, где инерционные волны отсутствуют, структура осреднённого течения напоминает классический столбик Тейлора: внутри тангенциального цилиндра (характеристическая поверхность, касательная к границе внутреннего ядра и параллельная оси вращения) жидкость совершает практически твердотельное вращение, в то время как за его пределами дифференциальное вращение отсутствует. При повышении амплитуды колебаний ядра на границе столба пороговым образом возбуждается двумерная азимутальная волна (рис. 1а). Фазовая скорость волны не зависит от числа Экмана E и определяется интенсивностью осредненного дифференциального вращения жидкости. Анализ результатов показывает, что природа возникновения волны связана с неустойчивостью сдвиговых слоев Стюартсона, при этом пороги неустойчивостей характеризуются числом Рейнольдса, рассчитанным через квадрат амплитуды колебаний и числом Экмана, $Re = b^2 / (R_1 \delta E)$. Здесь R_1 – радиус ядра, а δ – толщина динамического пограничного слоя, который является генератором осредненной завихренности.

Если частота колебаний ядра меньше удвоенной скорости вращения, в сферическом слое жидкости распространяются инерционные волны, вносящие сильную корректировку в осреднённый профиль угловой скорости. В докритическом профиле появляется серия экстремумов, которые эквивалентны жидким геострофическим цилиндрам, вращающимся с различными угловыми скоростями. При повышении амплитуды колебаний инерционные волны испытывают неустойчивость по сценарию триадных взаимодействий [1, 2]. Неустойчивость проявляется в двух областях сферического слоя одновременно с одинаковыми частотами, но различными волновыми числами. Так, на периферии вблизи стенки полости про-

являются субгармоники с короткой длиной волны, в то время как вблизи оси вращения индуцируются длинные волны. Развитие триадного резонанса приводит к сильному нелинейному отклику жидкости: вдоль оси вращения пороговым образом формируются осреднённые вихревые структуры с азимутальной периодичностью (рис. 1б). При определённых частотах колебаний ядра субгармоники внешних и внутренних триад взаимодействуют между собой, что проявляется в изменении скорости азимутального дрейфа осредненных надкритических структур.

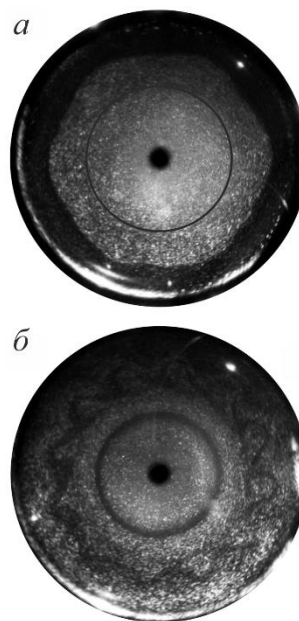


Рис. 1. Фотографии структуры надкритического азимутального течения при частоте вибраций $n = 2.0$ (а) и 1.1 (б)

Список литературы

1. Boury S., Sibgatullin I., Ermanyuk E., Shmakova N., Odier P., Joubaud S., Maas L.R.M., Dauxois T. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor // *J. Fluid Mech.* 2021. V. 926. A12.
2. Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // *Phys. Fluids* 2022 V. 34, No. 6 (in press).

*Работа поддержана РФФ
(грант № 18-71-10053)*

АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ ФРЕНСИСА

Суслов Д.А.^{1,2}, Литвинов И. В.^{1,2}, Цой М. А.¹, Гореликов Е. Ю.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: d.suslov@g.nsu.ru

В закрученном потоке за рабочим колесом гидротурбины возникают нестационарные вихревые явления в виде распада вихря и прецессии вихревого ядра (ПВЯ). ПВЯ генерирует мощные колебания давления, которые негативно влияют на надежность и безопасность элементов гидроагрегатов. Механизмы формирования нестационарных вихревых структур и генерация пульсаций давления всё ещё остаются неясными. Таким образом, расширение режимов устойчивой работы гидротурбин путем управления возникающими вихревыми структурами – актуальная задача гидроэнергетики.

Один из методов управления ПВЯ основан на использовании струи воды постоянного расхода через центр тела обтекания рабочего колеса [1]. Несмотря на то, что метод действительно позволяет убрать асинхронные пульсации давления, тем не менее остаются опасные синхронные пульсации давления с малой амплитудой. Более того, для необходимого подавления ПВЯ, расход аксиальной струи должен превышать 11% от общего расхода жидкости, что, приводит к большим потерям эффективности гидротурбины.

Следует отметить, что в литературе почти не представлена информация о том, влияет ли распределение струи в пространстве и угол ее подачи на эффективность управления вихревыми структурами. Вместе с тем, в работе [2] численным моделированием показано, что положение аксиальной струи, а также угол подачи значительно влияют на эффективность подавления вихревых структур.

Цель данной работы заключается в изучении оптимального способа подачи аксиальной струи для эффективного подавления ПВЯ за рабочим колесом аэродинамической модели гидротурбины. Научная работа направлена на расширение диапазона устойчивой работы гидротурбин за счет снижения неблагоприятного воздействия вихревых структур. Результаты позволят повысить безопасность гидроэлектростанции и увеличить её КПД.

Было изготовлено десять различных тел обтекания, позволяющих подавать аксиальную, радиальную и аксиально-радиальную струю. Также варьировалось распределение струи относительно площади самого тела обтекания.

Экспериментальное исследование проводилось на аэродинамическом стенде. Система из двух последовательно расположенных аксиальных завихрителей позволяет выполнить симуляцию распределений скорости, характерных для реальных гидротурбин. Данный подход позволяет получать необходимое распределение скоростей на выходе с рабочего колеса с удовлетворительной точностью.

В работе проведено сравнение различных способов активного управления: подача управляющей струи воздуха, в зависимости от ориентации струи в пространстве, а также ее распределения относительно площади тела обтекания рабочего колеса. Варьирование режимов работы позволило охватить широкий диапазон работы гидротурбины.

Для количественной оценки эффективности подавления использовались четыре акустических датчика, установленных за рабочим колесом для измерения возникающих пульсаций давления. Выделение синхронной и асинхронной составляющей в сигналах пульсаций давления, использование разложения на азимутальные моды составило основу для количественной оценки эффективности подавления.

Помимо этого, проведено методическое сравнение подходов по выделению синхронной и асинхронной составляющей пульсаций давления, а также с использованием азимутальных мод.

В ходе экспериментов получено, что при достижении расхода управления в диапазоне 2–5% от основного расхода, пульсации давления на частоте ПВЯ значительно уменьшаются. Интересно отметить, что в результате управления частота ПВЯ может уменьшаться. Однако, дальнейшее увеличение расхода управления более 5% приводит к увеличению уровня когерентных пульсаций в потоке.

Обнаружено, что угол подачи управляющей струи существенно влияет на эффективность подавления вихревых структур. Комбинирование аксиальной и радиальной подачи – наименее эффективный способ подавления, более того, при некоторых значениях управляющих расходов амплитуда ПВЯ возрастает, а не уменьшается. Управление ПВЯ с помощью радиальной подачи струи обладает хорошим потенциалом, но это требует дальнейшей проработки.

Список литературы

1. Tanasa C., Ciocan T., Muntean S. Numerical assessment of pulsating water jet in the conical diffusers //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – Т. 1906. – №. 1. – С. 050002.
2. Javadi A., Nilsson H. Active flow control of the vortex rope and pressure pulsations in a swirl generator //Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2017. – Т. 11. – №. 1. – С. 30–41.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-58-12012 (в части методики активного управления), при частичной поддержке гранта Президента № МК-1504.2021.4 (в части анализа азимутальной моды ПВЯ $m=-1$), а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (в части использования инфраструктуры и оборудования)

Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

e-mail: fai@ipmnet.ru

Метод зонной плавки впервые был предложен в 1952 году Пфанном В. Г., как революционный метод для очистки материалов [1]. Этот метод используется для выращивания монокристаллов. Суть метода заключается в том, что расплавляется узкая часть слитка и затем перемещением слитка или температурного поля происходит его перекристаллизация с отгеснением примесей и получением относительно чистого монокристалла. В поле силы тяжести расплавленная часть слитка (плавающая зона) удерживается за счет сил вязкости и поверхностного натяжения.

Для получения совершенных однородных монокристаллов необходимо организовать режим теплообмена с максимальным теплоотвод от растущего кристалла, равномерным по поверхности фронта кристаллизации и без нарушений условий устойчивого роста кристаллов. Существуют различные способы управления ростом кристалла через воздействие на конвективный теплоперенос, в частности, нагревом, вращением, вибрационным воздействием [2–6].

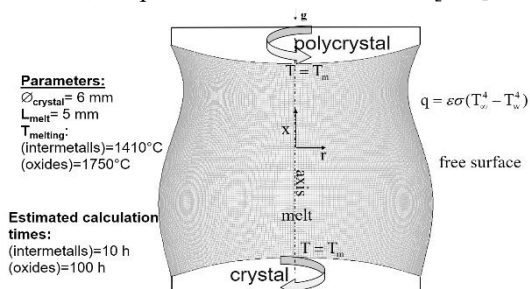


Рис. 1. Математическая модель плавающей зоны.

В данной работе приведены результаты численно-го исследования влияния гравитационной и термокапиллярной конвекции, вращения и вибраций на гидродинамику и теплоперенос при выращивании монокристаллов вертикальным методом безтигельной зонной плавки (БЗП). На рис. 1 показана расчетная область диаметром 6 мм и высотой 5 мм, сетка, граничные условия и параметры расчетов. Моделирование основано на численном решении 2D уравнений Навье – Стокса и уравнения сохранения энергии в осесимметричном приближении. Модель учитывает следующие особенности метода БЗП: криволинейность свободной поверхности и фронтов кристаллизации (плавления), вращение, вибрации, термокапиллярную конвекцию и условия излучения на свободной поверхности. В работе приводятся примеры вклада данных механизмов при раздельном и совместном воздействии на гидродинамику и теплоперенос на расплав полупроводников ($Pr=0.01$) (рис.2а) и оксидов ($Pr=5$) (рис.2б). Показано, что вибрации можно использовать в качестве управляющего механизма [2–6]. Для БЗП показано, что не только для больших чисел Прандтля [4], но и для малых чисел Прандтля ($Pr=0.01$) вибрации также могут уменьшать температурный пограничный слой и увеличивать температур-

ный градиент на фронте кристаллизации (скорость роста), но при больших частотах вибрационного воздействия рис 2в.

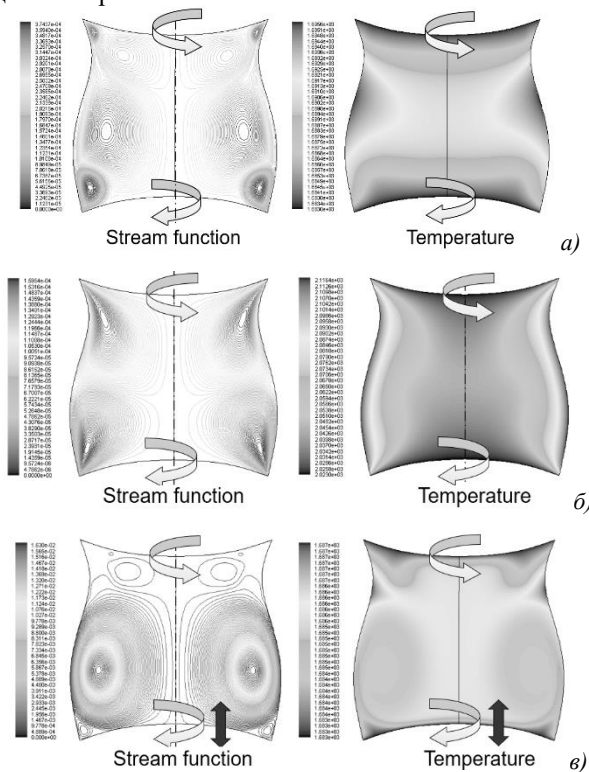


Рис. 2. Функция тока и изотермы при совместном действии вращения, гравитационной и термокапиллярной конвекции: а) $Pr=0.01$, б) $Pr=5$, в) при вибрациях нижней границы ($Pr=0.01$, $f=3\text{КГц}$, $A=100\text{мкм}$)

Анализ численных результатов показал, что высокочастотные вибрации с малыми амплитудами могут быть доминирующим источником перемешивания расплава в БЗП по сравнению с вращениями и конвективными течениями.

Список литературы

1. Пфанн В. Зонная плавка. – Москва, «Мир». – 1970. – 367 с.
2. Fedyushkin A. The gravitation, rotation and vibration - controlling factors of the convection and heat - mass transfer. // Proc. of 4th ICCHMT, Paris, France. 2005. P.948–951
3. Fedyushkin A., Bourago N., Polezhaev V. and Zharikov E. The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth. J. Crystal Growth. 2005. V. 275. P. e1557
4. Fedyushkin A.I. Heat and mass transfer during crystal growing by the Czochralski method with a submerged vibrator. IOP Publishing (Bristol, UK, England), V. 1359. 2019. P. 012054
5. Fedyushkin A.I., Burago N.G., Puntus A.A., Convective heat and mass transfer modeling under crystal growth by vertical Bridgman method. Journal of Physics: Conf. Series (1479), 012029, 2020
6. Fedyushkin A.I., The effect of controlled vibrations on Rayleigh-Benard convection. J. Phys.: Conf. Series (2057)1, 012012, 2021

Работа выполнена по теме гос. задания № АААА-А17-117021310375-7 и поддержана РФФИ (грант №20-04-60128 Вирусы)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА КОЛЬЦЕВОЙ ЗАКРУЧЕННОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУИ

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

e-mail: mfilippov181096@gmail.com

В настоящее время, в связи с ростом производственных мощностей, проблема эффективного охлаждения для нагретых поверхностей становится все более актуальной. Импактные струи являются одним из наиболее простых и распространённых способов интенсификации теплообмена. В последнее время, все чаще объектом исследования становятся кольцевые сопла с использованием закрутки выходящего потока, которые довольно эффективно решают проблемы неоднородности теплоотдачи. При этом, возникает сложность при построении связи между характеристиками выходящего потока и динамикой течения, и, более того, теплопередачей кольцевых импактных струй. В частности, в ряде режимов наблюдаются явления асимметрии течения. В связи с этим работа была посвящена исследованию аэродинамики и теплообмена кольцевой закрученной импактной струи.

Для измерения аэродинамики использовался измерительный комплекс PIV, который включает в себя источник излучения, в качестве которого используется импульсный лазер Beamtech Vlite-200 с длительностью импульса 6-8нс и максимальной энергией излучения 200 мДж, синхронизатор, для регистрации изображений применяются 2 цифровых камеры ImperX GEV-B2020M-TF000 с матрицей 2048×2048 пикселей, изображения записываются на жёсткий диск компьютера. Для получения поля скоростей изображения разбиваются на расчетные области $dx \cdot dy$ и каждая область рассчитывается отдельно. Для обработки изображений и нахождения скорости в расчетной области используется кросскорреляционный метод. Для более точного нахождения перемещения применяется подпиксельная интерполяция для каждого вектора скорости, фильтрация векторов по отношению сигнал/шум и медианным фильтром и интерполяции векторного поля.

Для тепловых измерений тепловизор testo с разрешением 1280×800 пикселей. Обработка данных происходила с помощью собственных программ, написанных на C++ и Python.

Экспериментальный участок представлял собой кольцевую закрученную струю, бьющую в поверхность. Ширина щели $b=3$ мм, внешний диаметр кольцевой струи $D_0=48$ мм. Степень закрутки $S=0.67$.

Были проведены 3d измерения методом PIV на осевом срезе струи. Измерялись на осевом разрезе струи 3 компоненты скорости и пульсаций, также были посчитаны осредненные λ и Q критерии при расстоянии от сопла до поверхности 0,79 и 1,67. Линии тока при 2 разных расстояниях рисуют 2 различных режима – трехвихревой (рис. 1а) и двухвихревой (рис. 1б). Неравномерности и нестандартная

расстановка вихрей на срезе наблюдалась также в работах Vanierschot и Yang [1–2]. Vanierschot провел трехмерный анализ кольцевой закрученной струи и обнаружил, что эта (в нашем случае трехвихревая структура) является единой спиралевидной рециркуляционной зоной, притом направление спирали противоположно направлению закрутки. Более того, эта структура наблюдается как в турбулентном, так и в ламинарном режимах.

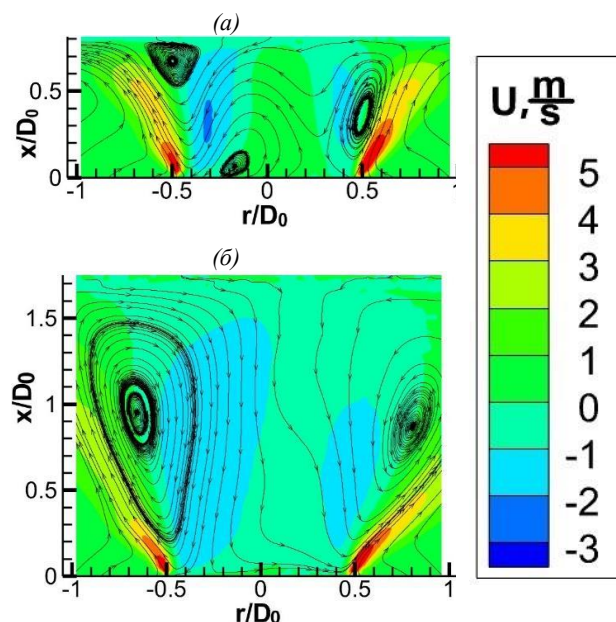


Рис.1. Поле скорости V_x при $v_b=7.76$ m/s, $Re_b=1552$, $Re_{D_0}=24832$ (а) $\frac{H}{D_0}=0,79$, (б) $\frac{H}{D_0}=1,67$

Также был изучен теплообмен при разных расстояниях между соплом и поверхностью и разных расходах. Наблюдалась асимметрия теплообмена вдоль сопла, также наблюдалось довольно равномерное распределение коэффициента теплоотдачи при небольших расстояниях от сопла до поверхности H/D_0 .

Список литературы

1. H.Q. Yang, T. Kim, T.J. Lu, K. Ichimiya. Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling // International Journal of Heat and Mass Transfer 2010. V. 53 P. 4092–4100.
2. M. Vanierschot, G. Ogun. Experimental investigation of the precessing vortex core in annular swirling jet flows in the transitional regime// Experimental Thermal and Fluid Science 2019. V. 106 P. 148–158.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 20-58-26003)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В КОЛЬЦЕВОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И., Ян Лун Н.

e-mail: mfilippov181096@gmail.com

Поиск путей создания систем охлаждения с равномерным теплообменом и большей эффективностью поверхностей по сравнению с круглыми струями представляет одну из ключевых задач современной аэромеханики и теплофизики. Одним из решений являются кольцевые импактные струи, широко используемые в последние годы во многих современных промышленных приложениях, таких как процессы нагрева, охлаждения и сушки [1]. Многочисленные исследования характеристик теплопередачи кольцевой импактной струи в различных конфигурациях проводились на протяжении многих лет. Эти исследования выявили основные характеристики потока и теплопередачи кольцевых струй. Теплопередача импактной кольцевой струи зависит от числа Рейнольдса, геометрии сопла и расстояния от него до поверхности. Следует отметить, что в ряде режимов наблюдаются явления бистабильности и гистерезиса, при которых теплопередача кольцевой импактной струи может быть различной при одних и тех же параметрах [2]. В связи с довольно сложным характером течения, до сих пор нет полного понимания течения кольцевых импактных струй, в связи с этим исследование кольцевой импактной струи является важным также и для построения фундаментальной теории.

Экспериментальный стенд для исследования характеристик давления представлял из себя кольцевое сопло, закрепленное на держателе, которое крепилось к однокомпонентному координатному устройству с шагом перемещения 0.16 мм. Напротив сопла крепилась квадратная плоскость с микроотверстием в центре. Давление измерялось с помощью дифференциального манометра ДМ-2. Точность измерения характеристик давления составляла 4 процента. Компрессор нагнетал поток воздуха через генератор аэрозоля на экспериментальный участок. Для тепловых измерений тепловизор testo с разрешением 1280×800 пикселей. Обработка данных происходила с помощью собственных программ, написанных на C++ и Python.

Экспериментальный участок представлял собой кольцевую импактную струю с шириной кольца равным, шириной струи $D_0=22$ мм. Расстояние до плоскости $\frac{h}{D_0}$ варьировалось от 0 до 2. Число Рейнольдса варьировалось Re_{D_0} от 2×10^3 до 12×10^3 .

Проведены измерения давления для кольцевой импактной струи при вариации расходных и геометрических характеристик. Выяснено, что при ширине щели $\frac{D_0-2b}{D_0} = 0.95$ образуется бистабильная зона (рис.1 – серый прямоугольник). Результаты неплохо коррелируют с Z.Trávníček, V.Tesař (2013) [2]. Более

того, бистабильная зона уменьшается с увеличением Re уменьшается зона бистабильности и при $Re_{D_0}=13580$, 2 режима течения образуются только при одном расстоянии от струи до поверхности $\frac{h}{D_0} \approx 1.15$. Для первого режима $\frac{p_1}{q} \approx 0.1$, для второго $\frac{p_2}{q} \approx 0.2 - 0.3$, где $q = \frac{\rho U^2}{2}$ – динамический напор. Из этого следует, что $\frac{p_2}{p_1} \approx 2-3$. При переходе из режима в режим происходит кратное увеличение давления в точке торможения.

Были получены новые данные по измерению давления в точке торможения для других ширин щели. Выявлено, что максимальный размер разомкнутого режима наблюдается при площади вдува кольцевой струи равной половине площади вдува центральной струи.

Также были измерены тепловые характеристики струи. Показано, что переключение режимов оказывает существенное влияние на коэффициент теплопередачи.

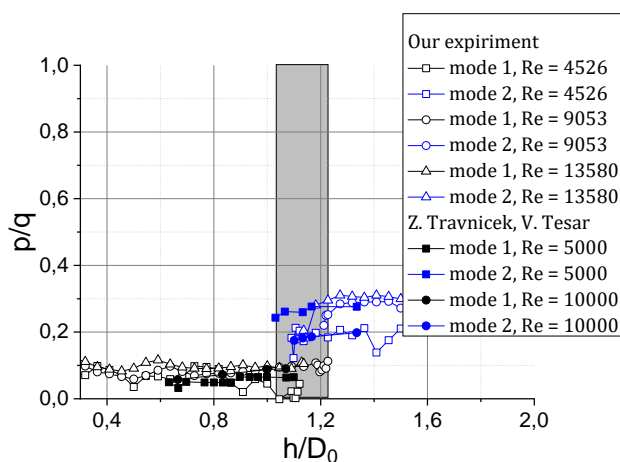


Рис. 1. Отношение давления к динамическому напору в точке торможения при $\frac{D_0-2b}{D_0} = 0.95$: \square – $v_b=3.1$ м/с, $Re_b=123$, $Re_{D_0}=4526$; \circ – $v_b=6.2$ м/с, $Re_{D_0}=247$, $Re_{D_0}=9053$; \triangle – $v_b=6.2$ м/с, $Re_b=247$, $Re_{D_0}=13580$; \blacksquare – Z.Trávníček, V.Tesař (2013), $Re_{D_0}=5000$; \bullet – Z.Trávníček, V.Tesař (2013), $Re_{D_0}=10000$.

Список литературы

- В. И. Терехов, С. В. Калинина, К. А. Шаров, Конвективный теплообмен при натекании кольцевой струи на плоскую преграду, ТВТ, 2018, том 56, выпуск 2, 229–234.
- Z. Trávníček, V. Tesař. Hysteresis in Annular Impinging Jets // Exp. Thermal and Fluid Science. 2013. V. 44. P. 565–570.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКОНА РАСХОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В КАНАЛЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Хазов Д.Е.

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

e-mail: dkhazov@mail.ru

Под энергоразделением понимается самопроизвольное разделение газового потока на два потока с температурами торможения выше и ниже начальной («горячий» и «холодный»). Одним из самых известных устройств, использующих явление энергоразделения является вихревая труба Ранка-Хилша. Рассматриваемый в данной работе метод основан на известном эффекте искривления профиля температуры торможения по толщине пограничного слоя, возникающего при обтекании высокоскоростным газом адиабатической поверхности. Известно, что чем выше скорость течения и чем больше число Прандтля отличается от единицы, тем выше энергоразделение в пограничном слое. В канале с проницаемой стенкой часть высокоскоростного потока может быть отсосана через стенку за счет естественного перепада давления. В результате температуры торможения потока на выходе из канала и потока, отсасываемого через стенку, различны: один горячее, другой холоднее по сравнению с начальной температурой торможения.

Первые результаты исследования подобного метода представлены в работе [1]. В работе [2] проведено экспериментальное исследование течения в устройстве, состоящем из сопла и пористой (проницаемой) трубки.

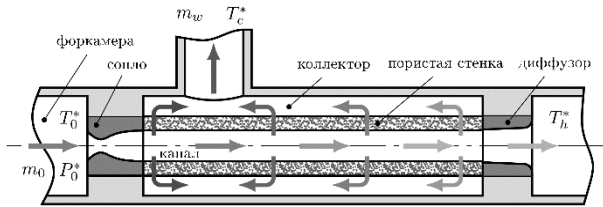


Рис. 1. Схема устройства энергоразделения с проницаемой стенкой.

В предыдущей работе авторов [3] рассмотрено устройство энергоразделения состоящее из сверхзвукового сопла и проницаемой трубки (см. рис. 1). Там же проведена валидация разработанной математической модели устройства. При этом массовая скорость через боковую поверхность трубки определялась из уравнения Дарси-Форхгеймера. Соответственно расход через боковую поверхность трубки варьировался посредством изменения давления торможения в форкамере. В этом случае давление торможения достигало высоких значений, вплоть до 100 атм, что является весьма сложным в физической реализации.

В данной работе рассматривался отсос, равномерно распределённый по длине канала по закону:

$$\bar{j}_w^0 = (\rho u)_w / (\rho u)_\infty \Big|_{x=0} \quad (1)$$

где ρ — плотность, кг/м³; u — скорость, м/с; индексы w и ∞ относятся к параметрам на стенке, и на оси канала, соответственно.

Давление торможения в форкамере подбиралось исходя из того, что сверхзвуковое истечение будет происходить в атмосферу, а также, что в выходном сечении трубки реализуется прямой скачок уплотнения, после которого давление достигает уровня атмосферного. Параметр отсоса варьировался в пределах $\bar{j}_w^0 = -0.05K - 5 \times 10^{-3}$. Давление торможения в форкамере для случая $\bar{j}_w^0 = -5 \times 10^{-3}$ составило $P_0^* = 9$ атм.

На рис. 2 показаны результаты двумерного моделирования: нагрев ΔT_h^* и охлаждение ΔT_c^* потока в зависимости от соотношения расходов m_w/m_0 (см. рис. 1). Пунктирной линией показан результат расчёта с привлечением уравнения Дарси-Форхгеймера для определения массовой скорости через боковую поверхность трубки.

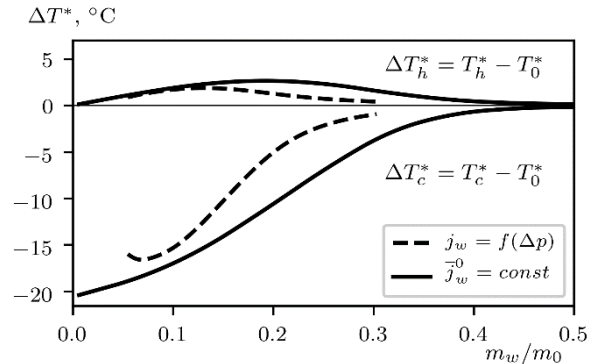


Рис. 2. Нагрев и охлаждение потока при течении в канале с проницаемыми стенками. $M_{is} = 3.0$; $T_0^* = 15^\circ\text{C}$; $L/d_h = 30$.

Сплошной линией показан результат при использовании уравнения (1). Как видно из рисунка, использование закона отсоса постоянного по длине даёт некоторое преимущество. Это связано с меньшим уровнем абсолютного давления в трубке.

Список литературы

1. Здитовец А. Г., Виноградов Ю. А., Стронгин М. М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2013. № 5. С. 134–145.
2. A. I. Leontiev, A. G. Zditovets, N. A. Kiselev et al. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 105. Pp. 206–215.
3. D.E. Khazov, A.I. Leontiev, A.G. Zditovets, N.A. Kiselev, Yu.A. Vinogradov. Energy separation in a channel with permeable wall // Energy. 2022. V. 239, Part E, 122427.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛОТДАЧА В ПЛОСКИХ ДИФFUЗОРНЫХ И КОНFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ

Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А., Михеев Н.И.

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

e-mail: radiffshakirov@mail.ru

Особое внимание к градиентным течениям вызвано их широким распространением в технике. Течения с продольным градиентом давления, реализуются в каналах с переменной по длине площадью поперечного сечения [1]. Экспериментальные исследования градиентных течений эффективнее всего реализовать на основе плоских диффузоров и конфузоров, которые и стали объектами данных исследований. В работе экспериментально исследована кинематическая структура потока в каналах оптическим способом. Выполнены измерения теплоотдачи нагретой стенки в условиях продольного градиента давления и проведено сопоставление результатов с характеристиками потока. В ходе экспериментов варьировалась величина и знак градиента давления.

Практический интерес в таких течениях представляют процессы связанные, прежде всего с изменением интегральных характеристик (теплотдача, гидравлическое сопротивление). Воздействуя на поток продольным градиентом давления различного знака и интенсивности можно как снизить трение вплоть до потери устойчивости пограничного слоя (положительный градиент давления) или же, стабилизировать его (отрицательный градиент давления). Сильный положительный градиент давления может привести к возникновению полного отрыва пограничного слоя от стенок, а отрицательный, напротив, к затуханию турбулентности – реламинаризации. Несмотря на множество исследований, интерес к изучению градиентных течений с каждым годом растет, во многом, благодаря развитию экспериментальных методик измерения мелкомасштабной турбулентности. Прогнозирование характеристик потока в условиях градиента давления по-прежнему вызывает множество трудностей. Получить пограничный слой, обладающий самоподобием возможно лишь в редких случаях, когда возникает динамическое равновесие сил. [2].

Исследуемый участок представлял собой плоский канал длиной $L=1800$ мм (см. рис. 1). Канал имел прямоугольное сечение с постоянной шириной и регулируемой по высоте верхней стенкой 2, позволявшей задавать необходимый угол отклонения φ .

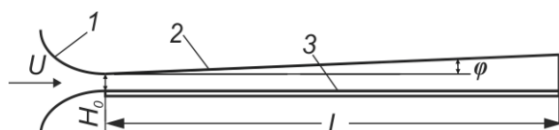


Рис. 1. Схема канала в диффузорном исполнении:
1 – входное устройство; 2 – верхняя регулируемая стенка;
3 – нижняя нагретая стенка.

Воздушный поток U на входе H_0 формировался при помощи входного устройства 1 и компрессора установленного после рабочего участка с блоком

критических сопел. При помощи сопел задавалось необходимое количество объемного расхода рабочей среды с неопределенностью в 0,25%. Что обеспечивало высокую повторяемость экспериментов.

Все измерения характеристик потока производились относительно нижней стенки. Методика измерений теплоотдачи [3] основана на стационарном нагреве одной из стенок при помощи электрического тока. При обтекании стенки 3 теплоносителем реализуется тепловое граничное условие II рода на границе раздела двух сред с постоянным тепловым потоком $q=\text{const}$.

Исследования гидродинамической картины течения были проведены с применением оптического метода измерения мгновенных векторов скорости SIV (Smoke Image Velocimetry) [4]. В методе SIV скорость потока оценивается по перемещению засеянных в поток групп частиц-трассеров, подсвечиваемых лазером с постоянным действием, за промежуток времени между двумя последовательными кадрами, отснятыми высокоскоростной видеокамерой.

В ходе оптических измерений получены профили осредненных скоростей, и компоненты тензора Рейнольдсовых напряжений в двумерной плоскости и их эволюция вдоль роста пограничного слоя. На основе известных характеристик безградиентных течений проведен сравнительный анализ распределения энергии турбулентности в диффузорах и конфузорах. В плане количественной взаимосвязи локальных параметров гидродинамических и тепловых процессов в исследуемых течениях были получены распределения теплоотдачи в виде числа Стэнтона.

Показано что в условиях продольного градиента давления на турбулентную структуру потока при положительном градиенте давления могут влиять не только локальные условия обтекания стенки, но и конвективные и диффузионные процессы переноса турбулентности. Представленные результаты иллюстрируют качественные механизмы формирования турбулентности в конфузорных и диффузорных каналах.

Список литературы

1. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин, М., «Энергия», 1970. 384 с. с илл.
2. Devenport, W. J., & Lowe, K. T. (2022). Equilibrium and non-equilibrium turbulent boundary layers. *Progress in Aerospace Sciences*, 131, 100807.
3. Davletshin I.A., Mikheev A.N., Mikheev N.I., Shakirov R.R. Heat transfer and structure of pulsating flow behind a rib. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020. Vol.160 120173.
4. Mikheev, N.I., Dushin, N.S. A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos. *Instrum Exp Tech* 59, 882–889 (2016).

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00507)

ТРЕХМЕРНАЯ ВИХРЕВАЯ СТРУКТУРА СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

Шестаков М.В., Маркович Д.М.

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

e-mail: maximvsh@gmail.com, mvsh@itp.nsc.ru

Квазидвумерные турбулентные сдвиговые течения представляют особый класс течений, в которых движение происходит преимущественно в двух направлениях в слое жидкости малой толщины, ограниченном двумя стенками или стенкой и свободной поверхностью. Данный класс течений реализуется во многих геофизических системах, а также в широком диапазоне энергетических установок. Главной особенностью квазидвумерных сдвиговых течений являются крупномасштабные квазидвумерные вихревые структуры, формирующиеся вследствие развития поперечной сдвиговой неустойчивости. Квазидвумерные вихревые структуры в настоящее время хорошо исследованы в двумерной постановке как численными, так и экспериментальными методами. Трехмерная структура квазидвумерных сдвиговых течений остается малоизученной. Сложность обусловлена необходимостью одновременного разрешения широкого диапазона пространственно-временных масштабов в условиях сильной анизотропии течения. Результаты работ по исследованию пространственной структуры квазидвумерной турбулентной струи и следа указывают на сложный трехмерный характер течения [1–3]. В частности, в дальнейшем поле квазидвумерной турбулентной струи были обнаружены крупномасштабные продольные вихревые структуры [3]. В настоящее время механизм формирования продольных вихревых структур до конца не исследован. Данная работа направлена на исследование процессов формирования продольных вихревых структур в квазидвумерных сдвиговых течениях. В работе экспериментально исследовалась пространственная структура трех различных сдвиговых турбулентных течений, формирующаяся при истечении турбулентной струи, турбулентного следа и колеблющейся струи в вертикальный щелевой канал. Высота канала во всех случаях равнялась $H = 4$ мм. Щелевой канал встраивался в гидродинамический контур с баком постоянного уровня, системой термостабилизации и системой контроля расхода жидкости. Измерения трехмерных трёхкомпонентных распределений скорости проводились при помощи Tomographic PIV метода с высоким временным разрешением. Динамика вихревых структур в потоке анализировалась на основе временных последовательностей трехмерных распределений Q -критерия, рассчитанных по экспериментальным данным. Идентификация продольных вихревых структур проводилась по изоповерхностям Q -критерия, соответствующим максимальным значениям продольной завихренности.

Анализ мгновенных 3D распределений скорости и Q -критерия показал, что во всех исследуемых сдвиговых турбулентных течениях формируются продольные вихревые структуры.

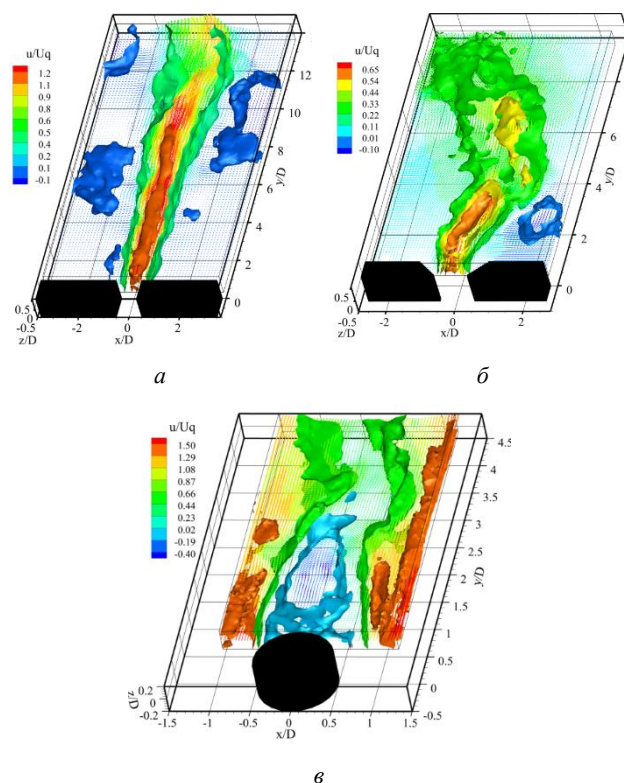


Рис. 1. Изоповерхности продольной компоненты мгновенной скорости в щелевом канале (а) турбулентной струи, (б) колеблющаяся струи и (в) след за цилиндром.

Разрешенные во времени 3D экспериментальные данные позволили на количественном уровне провести анализ динамики продольных вихревых структур. Формирование продольных вихревых структур связано с генерацией и развитием сдвиговых вихревых структур Кельвина – Гельмгольца, а также с поперечными колебаниями основного течения. Полученные данные о пространственной вихревой структуре показывают, что процесс образования продольных вихревых структур в ближнем и дальнем поле квазидвумерных турбулентных сдвиговых течений имеет разную природу.

Список литературы:

1. Shestakov M.V., Markovich D. M., Tokarev M. P., Dulin V.M., Sikovsky D.Ph. PIV study of large-scale flow organization in slot jets // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2015. V.51. P. 335–352.
2. Шестаков М.В., Маркович Д.М. Трехмерная структура потока в ближнем следе за цилиндром в щелевом канале // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28, № 6. С. 807–812.
3. Shestakov M.V., Mullyadzhyanov R.I., Tokarev M.P., Markovich D.M. Modulation of large-scale meandering and three-dimensional flows in turbulent slot jets // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2016. V.25, №2. P. 159–165.

Работа поддержана грантом РФФ (грант № 19-79-30075)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СТРУЙНЫМ ОСЦИЛЛЯТОРОМ В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Шестаков М.В., Маркович Д.М.

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

e-mail: maximvsh@gmail.com, mvsh@itp.nsc.ru

Методы управления с обратной связью, реагирующее на доминирующие структуры потока в реальном времени, являются перспективными для управления турбулентными течениями. Таким образом, определение пространственно-временных характеристик доминирующих структур потока, вносящих основной вклад в процессы тепло- и массопереноса, является важной задачей для развития методов управления турбулентными потоками.

В настоящее время наиболее распространённым элементом активного управления потоком является струйный осциллятор. Струйный осциллятор создает колеблющуюся струю, с частотой колебания пропорциональной расходу жидкости, подаваемому на вход струйного осциллятора [1]. Данная характеристика позволяет использовать струйный осциллятор в широком классе технических устройств в качестве элемента управления. Струйные осцилляторы применяются для управления отрывом потока [2], уменьшения сопротивления трения [3], а также интенсификации теплообмена [4]. Большинство работ, касающихся интенсификации теплообмена при помощи струйного осциллятора, выполнены в импактной постановке, когда колеблющаяся струя натекает под прямым углом на преграду. В данной работе мы исследуем структуру течения колеблющейся струи в щелевом канале, при котором колебания струи происходят в плоскости параллельной ограничивающим стенкам канала.

Исследования проводилось на гидродинамическом контуре, состоящем из бака постоянного уровня, системы термостабилизации, системы контроля расхода жидкости и рабочего участка. Рабочим участком являлся вертикальный щелевой канал размером $67h \times 52h$ и высотой $h = 4$ мм. В экспериментах использовалась форма струйного осциллятора с двумя каналами обратной связи [1]. Профилированная форма осциллятора устанавливалась таким образом, что стенки щелевого канала являлись стенками струйного осциллятора. Горло осциллятора имело квадратное сечение $D \times D$, где $D = h$. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по D и среднерасходной скорости U_0 на выходе из осциллятора, варьировалось в диапазоне от 1450 до 8120. Измерения мгновенных полей скорости проводились при помощи высокоскоростной PIV системы с максимальной частотой съемки 5 000 кадр/сек. Расчет мгновенных полей скорости проводился при помощи программного обеспечения «ActualFlow». Метод POD использовался в качестве пространственной фильтрации данных с целью определения доминирующих пространственных характеристик поля скорости. Анализ динамики вихревых структур

проводился на основании распределений Q -критерия.

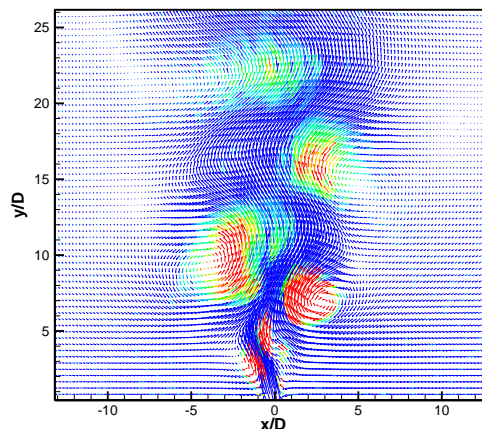


Рис. 1. Мгновенное поле скорости и Q -критерия.

Анализ мгновенных полей скорости показал, что истечение колеблющейся струи в щелевой канал сопровождается генерацией интенсивных крупномасштабных вихревых структур. Колебания струи приводят к поочередной генерации крупномасштабных вихревых структур справа и слева от оси струи, в результате вихревые структуры выстраиваются в шахматном порядке, наподобие вихревой дорожки Кармана (Рис. 1). Метод POD позволил выделить наиболее энергосодержащие вихревые структуры и определить их характерные частоты генерации. Высокоскоростные измерения показали, что частота формирования крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур коррелирует с частотой колебания струйного осциллятора. Наличие ограничивающих стенок щелевого канала в исследуемом диапазоне чисел Re не изменяют линейную зависимость частоты колебания струи от расхода жидкости подаваемого на вход осциллятора.

Список литературы:

1. Sieber M., Ostermann F., Woszidlo R. et al. Lagrangian coherent structures in the flow field of a fluidic oscillator // Phys. Rev. Fluids. 2016. N.1. P. 5–6
2. Schmidt, H.J., Woszidlo, R., Nayeri, C.N. et al. Separation control with fluidic oscillators in water. // Exp Fluids. 2017. No. 58. 106.
3. Schmidt, H.J., Woszidlo, R., Nayeri, C.N. et al. Fluidic oscillators for bluff body drag reduction in water Proc. 54th AIAA Aerosp. Sci. Meet. San Diego, California, USA. 2016. P. 1–12
4. Zhou W., Yuan L., Liu Y. et al. Heat transfer of a sweeping jet impinging at narrow spacings // Exp. Therm. Fluid Sci. 2019. V.103. P. 89-98
5. Wieneke B. Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2008. V.45. P. 549–456.

*Работа поддержана грантом РФФ
(грант № 19-79-30075)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ АТТРАКТОРОВ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ ЦИЛИНДРЕ

Ширяева М.А., Субботин С.В.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

e-mail: shiryayeva_ma@pspu.ru, subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуется движение жидкости в неравномерно вращающемся (либрирующем) неосесимметричном цилиндре, торцы которого симметрично наклонены относительно плоскости поперечного сечения. Скорость вращения полости в лабораторной системе отсчета изменяется по гармоническому закону $\Omega(t) = \Omega[1 + \varepsilon \sin(\Omega_{lib}t)]$. В качестве безразмерной характеристики частоты либраций используется параметр $\sigma = \Omega_{lib} / \Omega$.

Благодаря либрациям в полости поддерживаются инерционные волны, которые при определенных частотах на доле периода либраций в осевом сечении полости фокусируются на замкнутую траекторию, называемую волновым аттрактором. Результаты наблюдений поля скорости согласуются с предсказаниями двумерной лучевой модели, которая подтверждает возможность фокусировки волн после серии отражений на предельный цикл. Основное внимание уделено диапазону частот либраций, соответствующему аттрактору (1,1) (рис. 1). Изменение частоты либраций приводит к изменению соотношения сторон аттрактора. Так, при увеличении σ аттрактор сужается в поперечном размере и ориентируется вдоль меньшей диагонали осевого сечения. Обнаружено, в линейном режиме аттрактора отражение инерционных волн от границ полости сопровождается генерацией осреднённого течения в виде вытянутых вдоль оси вращения валов. Азимутальное и радиальное положение валов не меняется со временем и полностью определяется безразмерной частотой σ .

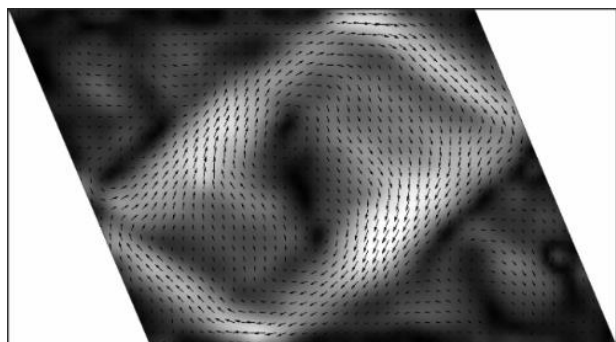


Рис.1. Мгновенное поле скорости в осевом сечении полости при частоте $\sigma = 1.10$ и числе Экмана $E = 1.2 \cdot 10^{-4}$ в фазе либраций $\Omega_{lib}t = 0$.

При повышении амплитуды либраций ε осреднённое течение пороговым образом становится неустойчивым. Докритическое течение в виде валов разрушается, при этом вблизи боковой границы спонтанным образом возникают очаги осреднённой

завихренности. Фурье-анализ пульсационного поля скорости показывает, что в надкритическом режиме в спектре возмущений всегда можно выделить несколько наиболее сильных гармоник (рис. 2), одна из которых совпадает с частотой вращения полости ($\omega_0 / \Omega = 1$), а вторая с частотой либраций σ . Дополнительно в спектре присутствуют две частоты ω_1 / Ω и ω_2 / Ω , сумма которых равна σ . Детальное исследование поля скорости показывает, что последним двум частотам соответствуют системы азимутальных вихрей с волновыми числами m и $m + 1$. Таким образом, неустойчивость удовлетворяет условию триадного резонанса в виде пары инерционных мод и одной моды с фундаментальной частотой [1]. В работе анализируются спектры возмущений в линейном и нелинейном режимах аттрактора инерционных волн, полученные при различных значениях σ ; исследуется взаимосвязь между триадными резонансами инерционных мод и потерей устойчивости осреднённого течения.

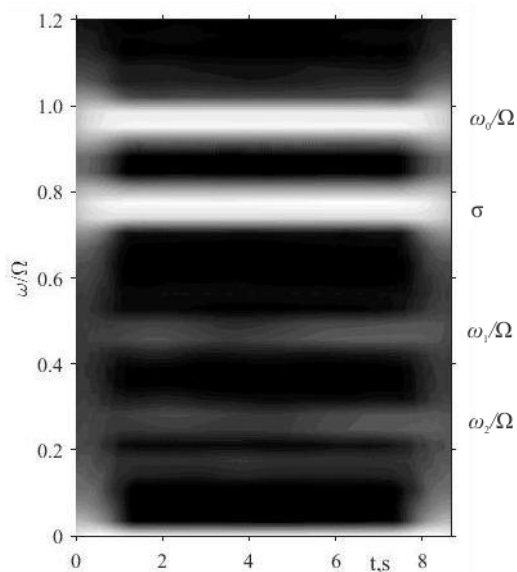


Рис.2. Спектрограмма азимутального поля скорости в надкритическом режиме при частоте $\sigma = 0.80$ и амплитуде $\varepsilon = 0.12$ и $E = 4.4 \cdot 10^{-5}$

Список литературы

1. Lagrange R., Eloy C., Nadal F., Meunier P. Instability of a fluid inside a precessing cylinder // Phys. Fluids. 2008. V. 20. P. 081701.

*Работа выполнена при поддержке
Гранта Президента Российской Федерации
(проект МК-1779.2021.1.1)
и Правительства Пермского края
(грант для ведущей научной школы С-26/1191)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКОЙ

Ян Лун Н.^{1,2}, Чохар И.А.¹, Терехов В.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет

e-mail: yln1999@mail.ru

Экспериментальные и численные исследования в области интенсификации теплообмена продолжают оставаться актуальными в течение длительного периода времени. Поиски новых эффективных форм теплообменных поверхностей интенсивно проводятся во всем мире. Высокими теплогидравлическими показателями, согласно численным исследованиям [1], обладают овално-траншейные лунки, представляющие собой цилиндрическую канавку с полусферическими закруглениями на краях. При этом траншея может располагаться под различными углами к оси канала.

Однако экспериментальных исследований аэродинамики овално-траншейных лунок до настоящего времени практически не проводилось. Первыми исследованиями были измерения полей статического давления, с результаты которых можно ознакомиться в статьях [2, 3].

В работе представлены результаты опытного исследования распределения скорости в канале с одиночной овално-траншейной лункой. Лунка в поперечном сечении представляет собой цилиндрический сегмент на одной из стенок. Плоский канал имел размеры $20 \times 150 \times 410$ мм. Глубина лунки были равна 3,3 мм, ширина 16 мм и длина 105 мм, а ее радиус 19 мм. Измерение производилось лазерно-доплеровским анемометром. Неопределенность при измерении скорости составила $\pm 0.5\%$, при измерении пульсаций скорости $\pm 2.0\%$. Эксперименты проведены при неизменном числе Рейнольдса $Re_D = 1.76 \times 10^4$ и двух углах наклона оси лунки относительно набегающего потока: 0° и 45° .

В качестве примера на рис. 1 демонстрируются распределения осевой скорости и пульсаций скорости при ориентации лунки под углом 45° к направлению потока в центральном сечении канала. В отличие от сферических лунок [4], а также для траншей, расположенных перпендикулярно направлению течения, для наклонной траншеи внутри нее не наблюдается рециркуляционного течения. Видно, что лунка не оказывает заметного деформирующего влияния на поток, так как профили до и после лунки практически идентичны. В лунке заметно возрастают пульсации скорости – если в ядре потока они порядка 5%, то на границе раздела $Y/H=0$ уже 20%. Увеличение пульсаций может положительно сказаться на теплообмене в облуженном канале.

В центральном сечении канала при наклоне лунки 0° построено поле скоростей и линии тока (рис. 2). За передней кромкой зона рециркуляции, видна точка присоединения потока у задней кромки. Виден один большой вихрь внутри лунки. Его размер примерно равен глубине лунки. Картина течения внутри овално-траншейной лунки при ориентации поперек канала (0°) очень схожа с течением в сферической лунке

[4]. Это можно объяснить симметрией обтекаемой поверхности, а также малыми значениями поперечной скорости, из-за чего течение можно считать двумерным.

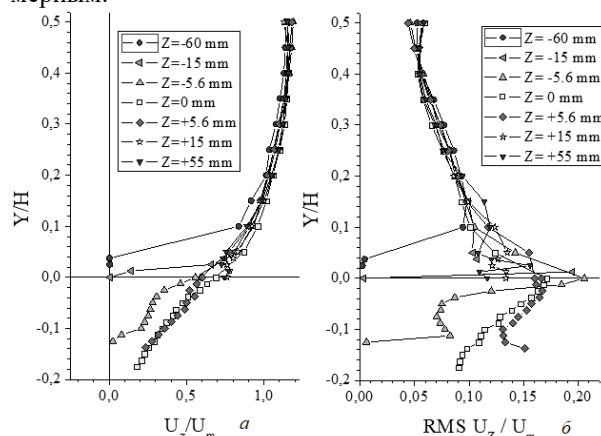


Рис. 1. Профиль осевой скорости U_z (а) и ее пульсаций (б), в центральном сечении при наклоне лунки 45°

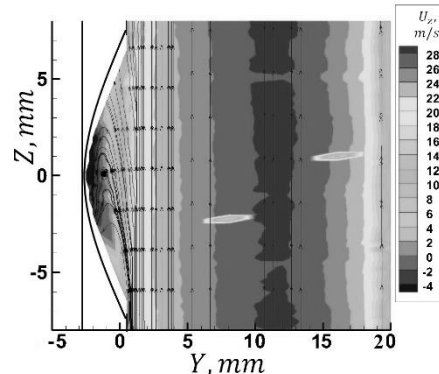


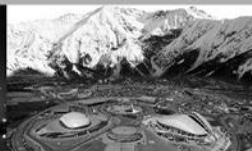
Рис. 2. Поле осевой скорости U_z в центральном сечении канала при наклоне лунки 0° (перпендикулярно потоку)

В работе представлен подробный анализ структуры осредненного течения и турбулентных характеристик в продолговатой траншее цилиндрической формы.

Список литературы

1. Исаев С.А. и др. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овално-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019 57 (5) 797-800.
2. N Yan Lun et al. Experimental investigation of pressure fields in a single trench dimple // 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2119 012033
3. Зубин М.А., Зубков А.Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // МЖГ. 2022 (1) 81-89
4. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M. Heat Transfer Coefficient and Aerodynamic Resistance on a Surface with a Single Dimple//J. Enhanc. Heat Transf. 1997. No. 2. P. 131-145.

Работа поддержана РНФ (грант № 21-19-00162)



СЕКЦИЯ 2

Гидродинамика и теплообмен в многофазных системах



МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РОСТА МАГМАТИЧЕСКОЙ ДАЙКИ

Абдуллин Р.Ф.^{1,2}, Мельник О.Э.³, Головин С.В.^{1,2}, Льготина Е.В.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: afaritovich@mail.ru

Образование даек (вулканических трещин) являются одним из основных способов подъема магмы в земной коре из магматических камер (очагов). Внедрение даек может приводить как к образованию интрузивных тел из застывшей магмы на небольшой глубине, так и вулканическим извержениям, если магма достигает поверхности. Динамика подъема магмы зависит от многих факторов, таких как состав магмы, ее водонасыщенность и температура, мощность и глубина залегания очага магмы, свойств окружающих пород, их плотности и напряженного состояния. Физическая постановка данной задачи связана с описанием течения многофазной жидкости внутри дайки, упругой реакцией стенок трещины и разрушением породы на фронте трещины. При этом необходимо учитывать и тепловые эффекты, такие как перенос тепла при подъеме горячей магмы из очага, ее остывание за счет теплообмена с окружающей породой, вязкая диссипация энергии, работа сил давления, а также выделение энергии в виде скрытой теплоты кристаллизации. Компьютерное моделирование комбинации этих физических эффектов представляет собой комплексную сложную математическую задачу.

В данной работе представлена математическая модель для оценки скорости подъема и физических параметров дайки, основанная на решении сопряженной задачи о динамике плоской вертикальной трещины гидроразрыва породы и транспорта магмы в ней. Предполагается, что рост дайки в хрупкой упругой породе вызван давлением магмы на стенки трещины. Подъем магмы осуществляется за счет подпитки из очага, а также действия сил плавучести, обусловленных разностью плотностей окружающей породы и магмы. Течение сжимаемой магмы внутри дайки считается ламинарным и описывается многофазной односкоростной моделью, в которой плотность и вязкость магмы зависят от давления, температуры, водонасыщенности и химического состава расплава.

Для численного моделирования роста трещины гидроразрыва породы используется метод разрывных смещений [1], основанный на точном решении уравнений линейной теории упругости. Отслеживание фронта дайки осуществляется за счет применения специальных концевых элементов, основанных на известном асимптотическом решении уравнений модели для окрестности кончика трещины [2]. Течение магмы в трещине считается ламинарным, для его описания используется приближение тонкого слоя и методом конечных объемов решается закон сохранения массы. Температура магмы определяется из численного решения уравнения, описывающего закон

сохранения энергии, в котором учитывается охлаждение магмы за счет теплообмена с породой через стенки трещины, вязкая диссипация, вызванная течением магмы, работа сил давления при изменении плотности магмы и выделение скрытой теплоты кристаллизации.

Для определения плотности магмы и объемных концентраций кристаллов, газа и растворенного газа в ней решаются уравнения состояния. Вязкость магмы находится как вязкость жидкого раствора [3] с поправочными коэффициентами на объемные концентрации кристаллов и выделенного газа. Для аппроксимации производных по времени используется неявная схема. Полученная система уравнений является нелинейной, поэтому для решения используются итерационные методы. Представленный алгоритм был протестирован на численную сходимость и устойчивость.

На основе численных экспериментов проведен анализ чувствительности динамики подъема дайки к параметрам модели. Показано, что характерное время подъема до остановки составляет от дня до недели и сильно зависит от содержания воды в магме, начальной температуры магмы в очаге и его мощности, величины коэффициента теплообмена с породой. Скорость дайки снижается по мере ее подъема в результате снижения давления и температуры, что приводит к повышению вязкости магмы на несколько порядков до полной остановки. В частности, низкое содержание воды в магме приводит к увеличению глубины остановки дайки, что связано с ростом температуры кристаллизации входящих в нее оксидов. Это приводит к повышенной объемной концентрации кристаллов на раннем этапе и соответственно большей вязкости магмы. Подобный результат наблюдается и при увеличении эффективного теплообмена с породой.

Список литературы

1. Crouch, Steven L, Starfield, Antony M, Rizzo, FJ. Boundary element methods in solid mechanics, Journal of Applied Mechanics, 1983.
2. E.V. Dontsov and A.P. Peirce. A multiscale Implicit Level Set Algorithm (ILSA) to model hydraulic fracture propagation incorporating combined viscous, toughness, and leak-off asymptotics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017.
3. Daniele Giordano, James K. Russell, Donald B. Dingwell, Viscosity of magmatic liquids: A model, Earth and Planetary Science Letters, 2008.

Работа выполнена при поддержке научно-технического центра Газпромнефти

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА И ПОСЛЕДУЮЩЕГО КОЛЛАПСА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА, ОБРАЗОВАННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕДОГРЕТУЮ ЖИДКОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Адамова Т.П.^{1,2,4}, Левин А.А.^{1,3}, Чернов А.А.^{1,4}

¹ Новосибирский государственный университет

² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

³ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

⁴ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: adamova@niic.nsc.ru

Процесс кипения локально перегретой жидкости сопровождается ростом паровых пузырьков, а также последующим их коллапсом. В зависимости от геометрической формы таких пузырьков, в некоторых случаях возможно формирование высокоскоростных струй жидкости, что представляет, как академический, так и большой практический интерес в различных сферах [1–4]. Так, несомненна важность применения теплового воздействия лазерного излучения на биологические ткани в рамках малоинвазивного хирургического воздействия на широкий круг патологий и заболеваний [5–9].

Проведены экспериментальные исследования элементарного акта вскипания недогретой жидкости, инициированный ее локальным нагревом в результате действия лазерного излучения, передаваемого в рабочий объем по тонкому оптоволокну.

В экспериментах использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 1,94 мкм (ИРЭ-Полус, Россия) мощностью до 10 Вт, непрерывное излучение которого подавалось по вертикально ориентированному кварц–кварц полимерному волокну с диаметром 600 мкм в оптическую кювету (стекло марки К-8), с внутренними размерами 16,5×37×20 мм (ширина×высота×глубина) и толщиной стенки 3 мм, заполненную дистиллированной водой. Торец оптоволокну был погружен на глубину 15 мм и зафиксирован специальным держателем. Эксперименты проводились при нормальных условиях. Мощность излучения в экспериментах варьировалась в пределах от 3 до 10 Вт.

Обнаружено, что в процессе схлопывания образующегося в результате нагрева парового пузырька формируется горячая затопленная струя, направленная от торца оптоволокну вглубь жидкости. Экспериментально обнаружен эффект вторичного вскипания, возникающий при распространении горячей затопленной струи, сгенерированной при схлопывании парового пузырька. Рассмотрен значительный вклад такого явления на динамику распространения струи. Жидкость струи, формирующейся при коллапсе первичного парового пузырька, обладает значительно более высокой температурой по сравнению с начальной. Мы предполагаем, что струя уносит существенную долю тепловой энергии, запасенной на стадии нагрева до момента образования парового зародыша. Пульсации давления, которые появляются в системе при развитии паровой фазы, также постепенно затухают. Следовательно, образующееся после «отскока» паровое включение имеет меньшие размеры, чем

размеры первичного пузырька. Дальнейшее рассеяние тепловой энергии ведет к полному прекращению циклических фазовых превращений. Мы предложили кинетическую модель для нахождения момента времени, при котором происходит зародышеобразование. Для нахождения основных параметров, определяющих рассматриваемый процесс, были проведены необходимые численные расчеты. К этим параметрам относится энергия перегрева жидкости, определяющая последующий фазовый переход. Показано, что при описании теплообмена в рассматриваемом диапазоне рабочих параметров необходимо учитывать теплопроводность. Исследовано влияние мощности излучения и начальной температуры жидкости на рассматриваемый процесс. Выявлено, что этот эффект пренебрежимо мал, так как пузырьки, возникающие в результате нагрева жидкости при разных мощностях излучения, растут в одинаковых температурных условиях, что обусловлено особенностями кинетики нуклеации.

Список литературы

1. Ohl C.-D., Arora M., Dijkink R., Janve V., Lohse D. Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 89. No 7. P. 074102.
2. Cui P., Zhang A.-M., Wang S., Khoo B.C. Ice breaking by a collapsing bubble // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. V. 841. P. 287–309.
3. Gonzalez Avila S.R., Ohl C.-D. Fragmentation of acoustically levitating droplets by laser-induced cavitation bubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. V. 805. P. 551–576.
4. Serra P., Piqué A. Laser-Induced Forward Transfer: Fundamentals and Applications // *Advanced Materials Technologies*. 2019. V. 4. No 1. P. 1800099.
5. Vogel A., Venugopalan V. Mechanisms of Pulsed Laser Ablation of Biological Tissues // *Chemical Reviews*. 2003. V. 103. No 2. P. 577–644.
6. Zhang X., Chen C., Chen F., Zhan Z., Xie S., Ye Q. In vitro investigation on Ho:YAG laser-assisted bone ablation underwater // *Lasers in Medical Science*. 2016. V. 31. No 5. P. 891–898.
7. George S.D., Chidangil S., Mathur D. Minireview: Laser-Induced Formation of Microbubbles—Biomedical Implications // *Langmuir*. 2019. V. 35. No 31. P. 10139–10150.
8. Robles V., Gutierrez-Herrera E., Devia-Cruz L.F., Banks D., Camacho-Lopez S., Aguilar G. Soft material perforation via double-bubble laser-induced cavitation microjets // *Physics of Fluids*. 2020. V. 32. No 4. P. 042005.
9. Beck R.J., Bitharas I., Hand D.P., Maisey T., Moore A.J., Shires M., Thomson R.R., West N.P., Jayne D.G., Shephard J.D. Dynamics of picosecond laser ablation for surgical treatment of colorectal cancer // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. No 1. P. 20261.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00092)*

ТЕЧЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ В КАНАЛАХ С РАЗВЕТВЛЕНИЯМИ

Антонов А.Н., Шелухин В.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Контроль за расходом пропанта через перфорацию в стволе скважины важен в технологии гидроразрыва пласта. Это мотивирует разработку компьютерных моделей для течений суспензий частиц в канале с разветвлениями. Если учитывать не-ньютоновскую реологию потоков, то спектр применения таких моделей становится более широким и включает медицину, биотехнологию и микрофлюидные течения. Например, в настоящее время наиболее дешевой технология создания микрофлюидных приборов основана на микро-формовке с помощью закачки термопластических полимеров в разветвляющиеся каналы.

Разработана термодинамически согласованная двухскоростная модель гранулированной жидкости с учетом различия реологий несущей жидкости и твердой фазы, состоящей из частиц. Нет предположений о малости концентрации частиц, и модель позволяет описывать такие процессы как осаждение частиц. Валидация модели проводилась на бенчмарк эксперименте, известном как эффект Бойкотта [1]. Эффект заключается в том, что седиментация в наклонном сосуде проходит более интенсивно, чем в вертикальном. Исторически суспензии рассматривались в рамках однофазной сплошной среды с вязкостью, зависящей от концентрации частиц. В настоящее время все больше применяется двухфазный подход. Они, как правило основаны на методах усреднения либо по объему, либо по ансамблю частиц. В данной работе при выводе уравнений мы следуем другому методу, который первоначально был разработан Халатниковым и Ландау для построения термодинамики сверхтекучего гелия ^2He . По этому методу сначала однозначной определяются силы межфазного взаимодействия для обратимых процессов, поскольку закон сохранения энергии делает всю систему законов сохранения переопределенной. Затем определяются диссипативные силы взаимодействия фаз путем согласования законов сохранения с общими принципами необратимой термодинамики де Гроот-Мазура.

В ряде работ по двухфазным течениям в уравнения импульсов вводятся дополнительные силы такие как сила Архимеда, Стокса, Саффмана, Магнуса. Даже используются силы, зависящие явно от времени (сила Basset-Boussinesq). В настоящей работе вместо дополнительных сил используется обобщенный диффузионный закон Фика для вектора потока массовой концентрации частиц. Такой подход согласован с термодинамикой и оказался успешным в зада-

чах седиментации, если в законе Фика учесть гравитационную составляющую. В обобщенном законе Фика учитывается не только градиент концентрации, но и градиенты температуры, давления и модуля разности скоростей фаз. Сила сопротивления Стокса учитывается через коэффициент межфазного трения, удовлетворяющего известным корреляциям. Используемый нами диффузионный подход накладывает ограничения на область применимости. Частицы должны быть достаточно малого размера.

Исследована задача о течении, когда в главном канале имеется ответвление. Детально изучен пульсирующий процесс, когда закачка частиц чередуется с закачкой чистой жидкости. Применительно к полимерам, фаза из частиц представлена в реологии вязкопластической жидкости Бингама. Установлено, что потери частиц в ответвляющийся канал тем меньше, чем больше угол ответвления от направления главного канала. Исследована зависимость течения от вязкости и предельного напряжения сдвига гранулированной фазы.

В последнее время интерес к потоку суспензий через бифуркации каналов возрастает в микрофлюидике и биологии в связи с проблемой разделения частиц разного размера. Разделение эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов на стыках сосудов играет важную роль в определении микрососудистых гематокритов и имеет важные физиологические последствия.

Одно из преимуществ континуальных моделей состоит в том, что к ним могут быть применены решатели, известные в вычислительной механике жидкостей. Кроме того, эти решатели могут быть легко адаптированы к течениям со сложной геометрией областей и для не-ньютоновской реологии жидкостей. В данной работе численный алгоритм разработан в рамках пакета FreeFem++. В несжимаемом случае с целью обеспечения условия бездивергентности среднеобъемной скорости был применен модифицированный метод SIMPLE. Проверка устойчивости проводилась путем сгущения сетки.

Список литературы

1. Shelukhin V.V., Neverov V.V. Dense suspension flows: a mathematical model consistent with thermodynamics *J. Fluids Eng.* ASME. February 2022; 144(2): 021402 1–13. <https://doi.org/10.1115/1.4051857> Published online: August 18, 2021.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-19-00058)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА НАД ВОЛНИСТОЙ ПЛЕНКОЙ ЖИДКОСТИ

Апостол Ю.С.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: y.apostol@g.nsu.ru

Газожидкостные течения широко распространены в теплообменниках, системах охлаждения, химической, атомной, нефтегазовой промышленности. Наличие газового потока, увлекающего слой жидкости, приводит к возникновению волн на его поверхности. В зависимости от характеристик потока и геометрических параметров канала могут реализовываться различные режимы течения от почти невозмущенного стратифицированного, до кольцевого режима течения с диспергированной жидкой фазой. В зависимости от режима течения интегральные параметры потока, таких как перепад давления, тепломассообмен и др. лежат в очень широких пределах.

Волны на пленке жидкости имеют значительное разнообразие форм, но при достаточно малых амплитудах возмущения можно считать, что каждая Фурье гармоника оказывает линейное влияние на параметры течения и может быть исследована независимо от других. Течения вдоль волнистых стенок также важны как с научной, так и с практической точки зрения. Они обладают своеобразными характеристиками, не наблюдаемыми при обтекании плоской поверхности пластины [1]. В случае течения в канале с волнистой стенкой периодические изменения градиента давления и кривизны линии тока создают структуру турбулентности, отличную от течения в канале с плоской стенкой. Кроме того, если амплитуда возмущения поверхности и число Рейнольдса увеличиваются, возникают отрывные течения, что значительно увеличивает интенсивность турбулентности потока.

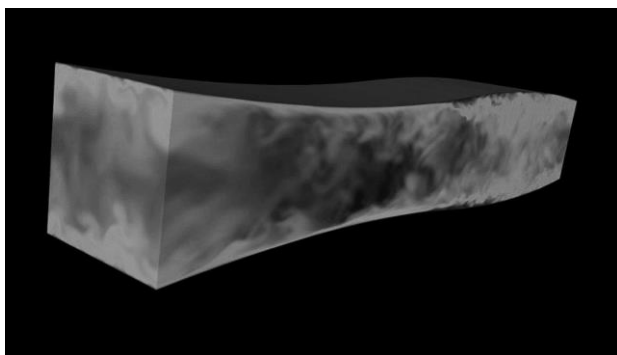


Рис. 1. Визуализация поля скорости в расчетной области.

В настоящей работе выполнено численное исследование характеристик турбулентного газового потока над волнистой поверхностью с использованием моделирования крупных вихрей (LES). Расчетная область представляла собой участок канала с искривленными стенками на верхней и нижней поверхностях (рисунок 1). На боковых поверхностях, а также на входе и выходе, поставлены периодические граничные условия. Моделирование проводилось с ис-

пользованием пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM решателем PIMPLE.

Расчеты выполнены для различных значений амплитуды и длины волны возмущения поверхности. Определены границы применимости модели линейного отклика потока. Получены поля скоростей, турбулентной вязкости, значения касательных напряжений на стенке (рисунок 2), а также набег фазы напряжений относительно возмущения поверхности. При дальнейшем увеличении амплитуды возмущения наблюдаются сильные отклонения от синусоидальной формы, что в конечном итоге приводит к отрыву потока от поверхности в области за максимумом амплитуды возмущения.

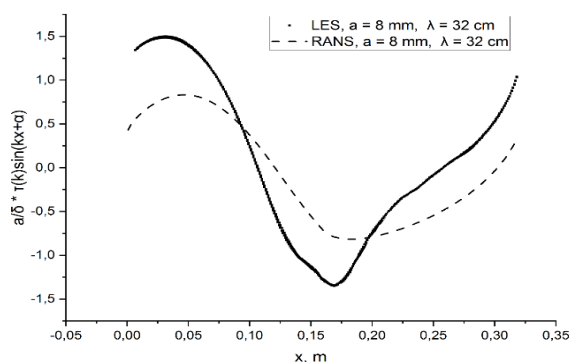


Рис. 2. Отклонение коэффициента трения, вызванное волнистостью стенки, в зависимости от положения вдоль направления течения.

Другим вопросом, не являющимся широко освещенным в литературе, является влияние турбулентного газового потока на теплообмен пленки жидкости со стенкой [2]. В различных теплообменных устройствах усиление теплопередачи стенок является ключевым требованием для того, чтобы сделать устройства компактными или эффективными. Одним из типичных методов улучшения теплопередачи в таких устройствах является введение волнистости стенок для теплоотдающих поверхностей. В этой части работы получены значения коэффициента теплоотдачи и локального числа Нуссельта. Проведен анализ зависимости коэффициента теплоотдачи от положения на возмущенной стенке. Получены осредненные значения температуры газового потока в расчетной области.

Список литературы

1. Zilker D. P., Cook G. W., Hanratty T. J. Influence of the amplitude of a solid wavy wall on a turbulent flow. Part 1. Non-separated flows //Journal of Fluid Mechanics. – 1977. – Т. 82. – №. 1. – С. 29-51.
2. Choi H. S., Suzuki K. Large eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel with one wavy wall //International journal of heat and fluid flow. – 2005. – Т. 26. – №. 5. – С. 681-694.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОРОШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ ЖИДКО-КАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ

Архипов В.А., Матвиенко О.В., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

e-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

В настоящее время одной из важнейших мировых экологических проблем являются крупные пожары природного и техногенного характера [1–3]. С увеличением числа и интенсивности пожаров отмечается и увеличение научных работ связанных с данной тематикой, в частности, проводится подготовка кадров, разработка методов и способов тушения пожаров, мониторинг и прогнозирование, совершенствование экспериментальной и учебно-материальной базы научно-исследовательских учреждений и т.д. Однако, несмотря на большое количество выполняемых работ по повышению уровня пожарной безопасности, показатели возникновения крупных пожаров ежегодно остаются на высоком уровне.

Одним из распространенных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс хладагента в очаг пожара с борта летательного аппарата с помощью различных видов водосливных устройств (ВСУ). При взаимодействии тонкораспыленной воды с пламенем, происходит охлаждение области горения и за счет испарения; при этом пары жидкости блокируют доступ кислорода к горящим элементам. Эффективное использование этого способа базируется на закономерностях осаждения жидко-капельного аэрозольного облака и его взаимодействия со средой вблизи очага пожара. Данные закономерности являются фундаментальной основой для определения оптимальных параметров сброса хладагента из сливного устройства летательного аппарата в очаг пожара с учетом реальных условий, обеспечивающих повышение эффективности технологии авиационного пожаротушения.

В настоящей работе представлена математическая модель для расчета плотности орошения поверхности при гравитационном осаждении жидко-капельного аэрозоля в очаг пожара. Динамика аэрозольного облака рассматривается как движение полидисперсного кластера капель в поле высоких температур с учетом их деформации, дробления, испарения, силы и направления ветра, а также конвективной колонки, расположенной над очагом горения.

Данная модель в декартовой системе координат включает уравнения движения капель каждой фракции, их теплообмена с окружающей средой и изменения радиуса за счет испарения. В уравнения движения капель входят значения коэффициента аэродинамического сопротивления, для определения которых рассматриваются все три режима обтекания (стоксовский, переходный и автомодельный).

Условия дробления капель в потоке характеризуются двумя механизмами потери устойчивости: неустойчивостью Рэлея–Тейлора (сила тяжести превышает силу поверхностного натяжения) и Неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца (сила динамического

напора превышает силу поверхностного натяжения). В качестве критерия дробления капель за счет неустойчивости Рэлея–Тейлора принималось критическое значение числа Бонда $Bo_* = \rho_l g D_p^2 / \sigma = 90$, за счет неустойчивости Кельвина–Гельмгольца – критическое значение числа Вебера $We_* = \rho_g u_p^2 D_p / \sigma = 17$ [4]. Процесс испарения моделировался в соответствие с моделями приведенной пленки [4] и диффузионной модели [5, 6].

Проведена оценка динамики гравитационного осаждения, нагрева и испарения полидисперсного кластера капель при сбросе хладагента с борта летательного аппарата и определена плотность орошения смоченной полосы. Показано, что длина смоченной поверхности определяется, в большей степени, длиной первичного жидко-капельного облака и, в меньшей степени, начальной скоростью капель и распределением скорости ветра в атмосфере. Превышение скорости летательного аппарата над скоростью ветра приводит к тому, что с увеличением размеров капель их осаждение происходит на большем удалении от места формирования первичного жидко-капельного аэрозольного облака. Капли первоначально крупных фракций осаждаются примерно в одной и той же области, так как в результате серии дроблений происходит выравнивание их размеров. Определено, что высокая начальная скорость капель позволяет быстро преодолеть область конвективной колонки, и способствует неполному испарению капель крупных фракций. Показано, что с увеличением скорости ветра значительно увеличивается дальность полета капель мелких и средних фракций, что приводит к повышению плотности орошения за счет попадания в зону горения капель крупных и средних фракций.

Список литературы

1. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., et al. The wildland-urban interface fire problem – Current approaches and research needs // *Int. J. Wildland Fire*. 2010. V. 19, No. 2. P. 238–251.
2. Filkov A., Kasymov D., Zima V., et al. Experimental investigation of surface litter ignition by bark firebrands // *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1698, No. 1. Paper 060004.
3. Matvienko O.V., Kasymov D.P., Filkov A.I., et al. Simulation of fuel bed ignition by wildland firebrands // *Int. J. Wildland Fire*. 2018. V. 27, No. 8. P. 550–561.
4. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
5. Архипов В.А., Матвиенко О.В., Трофимов В.Ф. Горение распрыленного жидкого топлива в закрученном потоке // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 2. С. 26–37.
6. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S., Zhavorova I.K. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere // *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. V. 9, No. 2. Paper 114.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00307)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ ЖИДКО-КАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

e-mail: usaninaanna@mail.ru

Гравитационное осаждение жидко-капельного аэрозольного облака в воздушной среде является ключевым процессом в целом ряде задач, связанных с двухфазными течениями. В частности, к ним относятся моделирование процесса сброса хладагента в очаг пожара при авиационном пожаротушении с целью повышения экономической эффективности технологии процесса [1], оценка и прогнозирование экологических последствий при аварийном сбросе авиационного керосина и жидкого ракетного топлива при отделении отработанных ступеней ракет-носителей [2-4], а также моделирование процесса получения и движения частиц в плазменном потоке [5].

В настоящее время не разработано общей теории эволюции и диспергирования массива жидкости на мелкие фракции под действием сил тяжести, инерции, вязкости и поверхностного натяжения жидкости с учетом перепада температур, силы и направления ветра. Ввиду сложности данного процесса, включающего большое количество определяющих параметров, теоретическое описание не позволяет получить приемлемых для практики рекомендаций по высоте образования и характеристикам первичного облака капель. Перспективным подходом является моделирование на основе экспериментальных исследований.

Разработанная на основе комплекса экспериментальных исследований математическая модель, предназначена, в частности, для повышения эффективности авиационного пожаротушения. Эта модель позволит оперативно определять параметры сброса хладагента из водосливного устройства летательного аппарата, то есть позволит пилоту в режиме реального времени «вслепую» (в условиях отсутствия видимости из-за задымления горячей территории) рассчитать оптимальные параметры сброса жидкого хладагента. Использование данной модели повысит безопасность летательного аппарата и эффективности технологии авиатушения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования динамики осаждения кластера капель с заранее заданным дисперсным составом в зависимости от скорости внешнего воздушного потока.

Для исследования закономерностей гравитационного осаждения кластера капель была разработана экспериментальная установка. Устройство включает систему подачи жидкости, безопасной вентилятор и систему визуализации процесса. Система подачи состоит из мерной емкости с исследуемой жидкостью. Мерная емкость выполнена, в виде полого цилиндра, на торцевой поверхности которого установлены равноудаленно капилляры, который позволяет получить первичное облако равномерно расположен-

ных в пространстве капель. Внутренняя полость мерной емкости соединена с воздушным микрокомпрессором через электропневмоклапан, управляемый низкочастотным генератором напряжения. Визуализацию процесса гравитационного осаждения кластера капель проводили двумя скоростными цифровыми видеокамерами.

В ходе эксперимента мерную емкость заполняли исследуемой жидкостью. После включали безопасной вентилятор и с помощью анемометра определяли скорость обдувающего кластер потока газа. Затем включали видеокамеры и воздушный микрокомпрессор. Подавая импульсы напряжения от генератора на электропневмоклапан внутри полости мерной емкости, создавались импульсы давления, которые приводили к одновременному отрыву капель от срезов капилляров и последующему образованию первичного облака капель. Многократное производство импульсов давления внутри мерной емкости, позволяло получать последовательно идентичные кластеры капель. В качестве жидкости в экспериментах использовалась дистиллированная вода.

Представлены новые экспериментальные данные по влиянию скорости внешнего воздушного потока, а также начальной объемной концентрации капель в кластере на закономерности его осаждения в поле силы тяжести. Получены новые эмпирические зависимости для скорости и коэффициента аэродинамического сопротивления кластера капель в зависимости от параметров обдувающего воздушного потока.

Список литературы

1. Кудров М.А. Динамика объема жидкости в газовом потоке с учетом деформации, дробления и срыва капель // Научный вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2010. № 151. С. 163–168.
2. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S., Zharova I.K. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere / Arabian Journal of Geosciences. 2016. V. 9, No. 2. Paper 114.
3. Maslov E., Badmaev A., Zharova I. Dynamics and Heat and Mass Transfer of Liquid-Droplet Cloud in the Emergency Discharge of Aviation Fuel into the Atmosphere / MATEC Web of Conferences. 2017. V. 110, No. 19. Paper 01007.
4. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, №1. С. 89–93.
5. Pfender E., Lee Y.C. Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part I. The motion of a single particle without thermal effects // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1985. V. 5, No. 3. P. 211–237.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 22-19-00307)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ В КАВИТИРУЮЩЕЙ СТРУЕ

Бирюков Д.А., Перетьяко В.В.

ОИВТ(РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

В 2021 г. Хитоши Саяма в [1] исследовал кавитацию, вызывающую свечение – гидролюминесценцию (ГЛ), в трубе Вентури, используя метод высокоскоростной съёмки. Автор заметил, что поведение кавитационной струи непостоянно. Сначала край струи разрушается, а затем рассеивается вниз по потоку, причём скорость рассеивающейся области выше, чем скорость основной струи. Нахождение скорости потока и распределения скоростей важно для определения граничных условий, в которых находится схлопывающийся пузырек, излучающий свет. Результаты исследования скорости необходимы для определения параметров внутри пузырька. В качестве метода оценки распределения скорости в кавитирующей струе глицерина использовался метод цифровой трассерной визуализации. Суть метода заключается в определении перемещения взвешенных в потоке частиц, выступающих в качестве маркера скорости, за заданный интервал времени.

Для визуализации поля скорости при гидролюминесценции использовалась установка, показанная на рис. 1.

Рабочий участок (8) представляет собой сопло, выполненное из оргстекла, с узким проходным отверстием в центре диаметр и длина которого равны 1 мм. Сечение в рабочем участке освещается лазером Beamteach Vlite 200 (3). Управление лазером осуществляется системным блоком (1). Изображение области получается при помощи камеры Imrexh Bobcat GEV (6), расположенной над рабочим участком. Камера и лазер соединены с синхронизатором (2).

Давление на входе задается плунжерным насосом, частота вращения которого регулируется преобразователем частоты E3-9100 (4). Давление на выходе из рабочего участка равно атмосферному и остаётся постоянным. Из-за перепада давлений осуществляется движение глицерина через рабочий участок. При прохождении жидкостью узкого сечения начинают образовываться кавитационные пузырьки, выступающие в качестве трассеров.

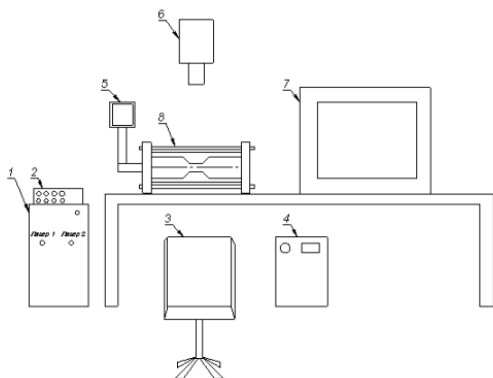


Рис. 1. Определение скорости при гидролюминесценции. 1 – системный блок лазера, 2 – синхронизатор, 3 – двойной импульсный лазер Beamteach Vlite 200, 4 – частотный преобразователь E3-9100, 5 – манометр, 6 – камера Imrexh Bobcat GEV, 7 – компьютер, 8 – рабочий участок.

Построение поля скорости проводилось с использованием ПО ActualFlow, разработанное компанией ООО «Сигма-Про». На рис. 2 показан результат обработки. Съёмка проводилась для пяти разных сечений, а затем результат усреднялся. Интервал времени между кадрами равен 150 мкс, а перепад давлений 19 атм.

По полученному полю скорости была найдена средняя скорость глицерина - 0.19 м/с. Также можно оценить поведение жидкости - пузырьки из центра протекают слева-направо в левой части сопла, дойдя до конца сопла поток разворачивается и пузырьки летят в обратном направлении в правой части. Экспериментально получены распределения скоростей в кавитирующей струе глицерина.

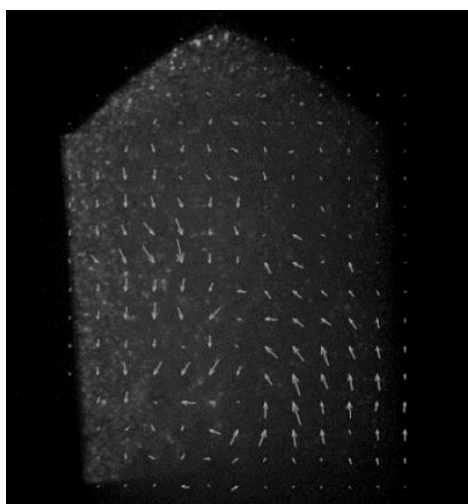


Рис. 2. Поле скорости при гидролюминесценции глицерина.

Список литературы

1. Hitoshi Soyama. Luminescence intensity of vortex cavitation in a Venturi tube changing with cavitation number // URL: <https://www.elsevier.com/>. - March 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАССЛОЕНИЯ МИКРОЭМУЛЬСИИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ

Валиуллина В.И., Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет

e-mail: valiullina.vilena@mail.ru

Проблема разрушения стойких эмульсий типа «вода в масле» остается актуальной во многих отраслях промышленности. Количество накапливаемых отходов зависит от успешного разделения эмульсий на отдельные фазы.

В настоящей работе проведено исследование процесса осаждения капель устойчивой микроэмульсии в условиях тепловой конвекции методами экспериментального и математического моделирования. Экспериментальное изучение естественной конвекции эмульсионной системы производилось в ячейке, с возможностью нагрева и охлаждения границ [1]. Математическая модель построена в одножидкостном приближении и включает в себя уравнения сохранения количества движения, уравнение теплопроводности для эмульсии в целом и уравнение сохранения массы дисперсной фазы. Относительная скорость между фазами записана в предположении малости чисел Стокса и Рейнольдса и с учетом формулы Рыбчинского-Адамара. Для учета влияния поверхностно-активных веществ, которые образуют на поверхности капель воды структурно-механический барьер, вводится поправка Левича на эффективную вязкость поверхности капель эмульсии. Сила межфазного сопротивления задается в виде степенной зависимости. Напряжения, возникающие при межфазном взаимодействии задаются эмпирической формулой. Зависимость вязкости эмульсии от температуры и от концентрации задается эмпирической формулой.

Решение уравнений математической модели в трехмерной постановке по неявной схеме методом контрольных объемов реализовано в программном комплексе OpenFOAM на основе модифицированного решателя pimpleFoam. Рассматривается динамика эмульсионной системы в прямоугольной полости, геометрические размеры которой заданы в соответствии с размерами экспериментальной ячейки. Теплофизические параметры объекта исследования и краевые условия задачи заданы в соответствии с экспериментальными данными и условиями проведения экспериментов.

Исследовалось влияние режимов конвективных течений на расслоение эмульсии в зависимости от перепада температур, размера капель и от объемного содержания воды в эмульсии при различных направлениях теплового потока.

В частности, на рис. 1 представлены результаты моделирования динамики 5% эмульсии со средним размером капель 10 мкм при направлении теплового потока снизу вверх ($\Delta T=5^\circ\text{C}$). Видно формирование двух симметричных вихрей, приводящих к искажению изолиний в распределении концентрации. Эмульсия вдоль боковых стенок движется вверх и спускается по центру, ускоряя при этом осаждение капель в центральной части и препятствуя осаждению капель в яд-

рах потока. В центральном вертикальном сечении ячейки и в верхней части формируется зона пониженной концентрации, в нижней части концентрация капель увеличивается вследствие их частичного осаждения. С увеличением перепада температур интенсивность перемешивания эмульсии возрастает, количество вихревых структур увеличивается.

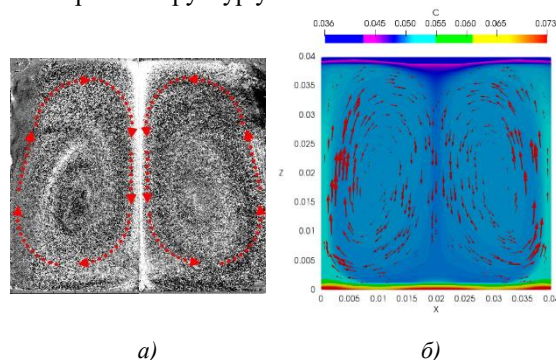


Рис. 1. Распределение концентрации капель 5% эмульсии и векторное поле скорости при подогреве эмульсии снизу ($\Delta T=5^\circ\text{C}$): а) эксперимент; б) модель.

Исследования динамики роста слоя осевших капель эмульсии показали, что для мелкодисперсной эмульсии нагрев ячейки снизу приводит к замедлению процесса разделения эмульсии (см. рис. 2). С повышением перепада температур скорость осаждения капель микроэмульсии уменьшается.

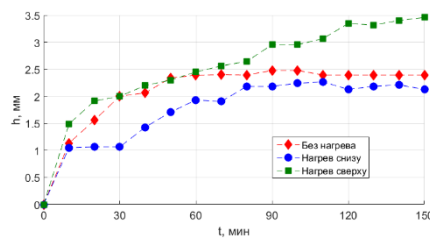


Рис. 2. Динамика роста слоя осевшей дисперсной фазы при различных направлениях теплового потока.

Это объясняется тем, что с увеличением числа Рэлея увеличивается скорость конвективного перемешивания жидкости и часть капель эмульсии уносится потоком жидкости и не успевает сразу осесть, что приводит к некоторому замедлению процесса расслоения эмульсии, а происходящие процессы коагуляции капель не приводят к образованию достаточно больших агломератов.

Список литературы:

1. Valiullina V. I. et al. Experimental study of the stratification of polydisperse emulsions in a cell with heated walls // JOP: Conf. Series. 2021. V. 2057, No. 1. Paper 012041.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЗРАЧНОЙ ИМПАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПРЕЙНОГО ОРОШЕНИЯ

Владыко И.В.^{1,2}, Сердюков В.С.^{1,2}, Суртаев А.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

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

e-mail: i.vladyko@g.nsu.ru

Спрейное орошение является одним из наиболее эффективных и востребованных режимов охлаждения и термостабилизации теплонапряженных устройств. Сегодня данный процесс применяется в целом ряде различных промышленных циклов и технологий. Помимо традиционной закалки металла в металлургии, спрейное охлаждение также применяется в электронной, медицинской и аэрокосмической технологиях, а также в системах пожаробезопасности и безопасности ядерных реакторов [1]. По этой причине разработка методов интенсификации теплообмена при спрейном охлаждении является крайне актуальной задачей, требующей в том числе проведения комплексных экспериментальных исследований.

Настоящая работа демонстрирует преимущества и перспективы использования прозрачной импактной поверхности из сапфира с напыленным тонкопленочным нагревателем из оксида индия-олова. Такая конструкция позволяет одновременно изучить как гидродинамические, так и тепловые характеристики спрейного охлаждения. В частности, высокоскоростная видео съёмка с обратной стороны такой поверхности позволяет идентифицировать отдельные капли до их попадания на формирующуюся пленку жидкости, что позволяет измерить их размеры с высоким пространственным разрешением. Кроме того, такой формат позволяет оценить количество капель, попадающих на охлаждаемую поверхность, и изучить особенности эволюции границы раздела фаз при их попаданиях. Также была исследована плотность потока капель при различных объёмных расходах жидкости. Было показано, что этот параметр может существенно отличаться для различных областей импактной поверхности. Это позволяет оценить степень неравномерности орошения даже в случае полного распыления (рис. 1а).

С помощью высокоскоростной инфракрасной термографии было исследовано нестационарное температурное поле в режиме однофазного спрейного охлаждения. Исходя из полученных данных, была проанализирована интенсивность теплопередачи для различных плотностей теплового потока и расходов жидкости. Показано, что для исследуемых режимов коэффициент теплопередачи слабо зависит от плотности теплового потока и в первую очередь определяется объёмным расходом жидкости (рис. 1б).

Также проведено сравнение полученных экспериментальных данных по интенсивности однофазного теплообмена при спрейном охлаждении с существующими моделями. На основе сравнительного анализа была показана аналогия с механизмами, определяющих интенсивность теплопередачи при пузырьковом кипении.

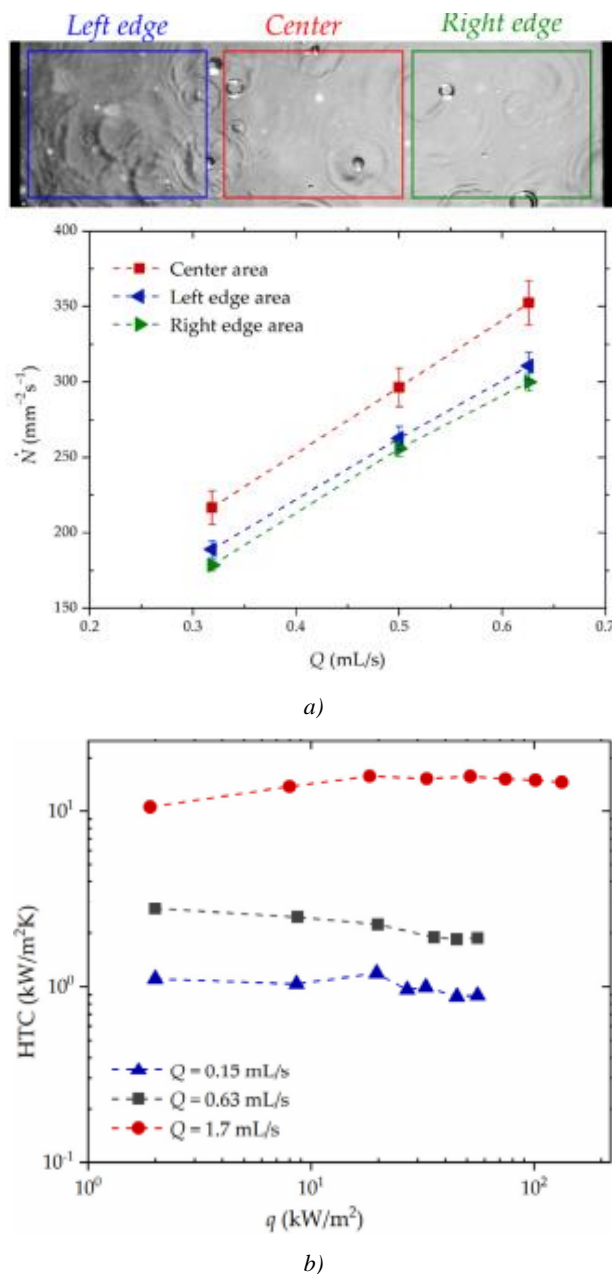


Рис. 1. (а) Зависимость плотности потока капель от объёмного расхода жидкости для различных областей импактной поверхности; (б) Зависимость коэффициента теплопередачи при спрейном охлаждении от плотности теплового потока.

Список литературы

1. G. Liang, I. Mudawar Review of Spray Cooling—Part 1: Single-Phase and Nucleate Boiling Regimes, and Critical Heat Flux // Int. J. Heat Mass Transf. 2017, 115, 1174.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 22-19-00581).

ПОДЪЕМНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА СФЕРУ ВБЛИЗИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СТЕНКИ

Власова О.А.

Лаборатория вибрационной гидромеханики,
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

e-mail: vlasova_oa@pspu.ru

Экспериментально исследуется динамика сферического тела вблизи границы цилиндрической полости, заполненной жидкостью и совершающей вращательные колебания вокруг своей оси. Ось кюветы установлена вертикально или отклонена от вертикали на определенный угол. Легкое сферическое тело удерживается в средней по длине части полости невесомой и нерастяжимой нитью, закрепленной на дне кюветы. Такое положение тела необходимо для исключения влияния на динамику тела стационарных тороидальных вихрей, генерируемых вблизи концов осциллирующей полости [1]. При этом в начале эксперимента тело находится вблизи цилиндрической стенки.

Колебательное движение стенки полости вызывает поступательно-вращательные колебания сферы в жидкости за счет вязкого взаимодействия тела со стенкой. На рис. 1 при помощи наложения фотографий показаны крайние положения сферического тела 1 в ходе колебаний. Видеокамера располагается таким образом, чтобы было видно отражение тела 2 на цилиндрической стенке полости.

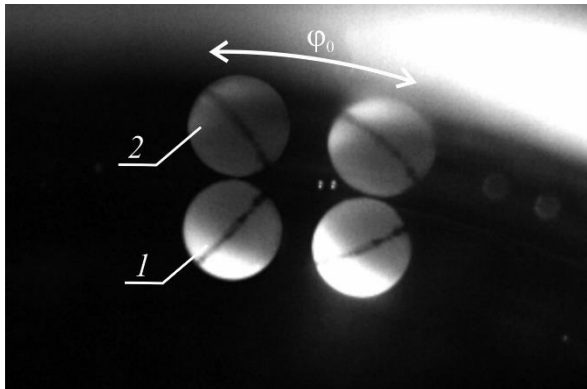


Рис. 1. Крайние положения тела в ходе колебаний.

В результате осциллирующего движения тела возникает осредненная подъемная сила [2]: тело удаляется от стенки и переходит в квазистационарное состояние на некотором расстоянии от нее при достижении порогового значения амплитуды колебаний на заданной частоте. Измеряемое на фотографии расстояние от сферы до его отражения соответствует удвоенному расстоянию до стенки полости. С дальнейшим увеличением амплитуды колебаний полости зазор между телом и стенкой растет (рис. 2). Пороговое значение амплитуды колебаний уменьшается с увеличением частоты колебаний.

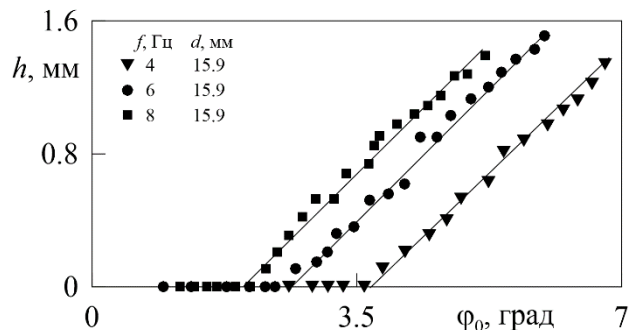


Рис. 2. Зависимость величины зазора h между телом и стенкой полости от амплитуды колебаний полости ϕ_0 .

Осредненная подъемная сила вибрационного характера измеряется методом квазистационарного подвеса тела в статическом гравитационном поле. В квазистационарном состоянии архимедова сила уравнивает подъемную силу. Вязкость жидкости, относительная плотность и диаметр тела в эксперименте варьируются. Экспериментальные результаты обобщены на плоскости управляющих безразмерных параметров. Обращается внимание на область умеренных и низких безразмерных частот, когда размер тела сравним с толщиной пограничного слоя Стокса. Показано, что осредненная подъемная сила, действующая на тело вблизи границы, совершающей тангенциальные колебания, экспоненциально убывает с расстоянием между стенкой и телом. При этом безразмерная сила растет монотонно с безразмерной частотой в исследованном диапазоне параметров.

Список литературы

1. Lim, T. G., and Hyun, J. M. (March 1, 1997). Flow Driven by a Torsionally-Oscillating Shrouded Endwall Disk. // ASME. J. Fluids Eng. 1997. V. 119, No. 1. P. 115–121.
2. Ivanova A. A., Kozlov V. G. Lift force acting on body in liquid in the vicinity of boundary executing tangential oscillations // Microgravity Science and Technology. 2014. V. 26, No. 3. P. 179-187.

Работа поддержана
Советом по грантам Президента Российской
Федерации (грант № МК-4536.2021.1.1)
и правительством Пермского края
(Научная школа № С-26/1191)

ДВУХФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В КАПИЛЛЯРНОЙ ТРУБКЕ

Вожаков И.С.^{1,2}, Пещенюк Ю.А.^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

e-mail: vozhakov@gmail.com

В современном мире наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению масштабов технологических процессов в различных областях техники. Вместе с этим повышается интенсивность локального тепловыделения электронных устройств. При их охлаждении целесообразно использовать двухфазные теплообменники, такие как тепловые трубы, микроканалы, спрейные системы. Пульсационные тепловые трубы (ПТТ), в отличие от остальных, являются пассивными теплоотводящими элементами, а значит, гораздо проще в производстве и практически не содержат элементов, которые могут выйти из строя во время работы. Кроме того, они используют пленочный режим испарения в Тейлоровских пузырях, а именно при таком режиме наблюдается максимальный теплоотвод. Поэтому пульсационные тепловые трубы являются одним из самых эффективных способов отвода тепла.

Повышение тепловых потоков приводит к истончению пленки жидкости вокруг пузыря вплоть до осушения стенки, что значительно снижает коэффициент теплоотдачи от обогреваемой стенки. Более быстрому осушению способствуют в том числе силы Марангони, которые вызваны зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры. В работе [1] было обнаружено, что водный раствор SLS в некотором диапазоне температур (в зависимости от концентрации раствора) обладает эффектом самосмачиваемой жидкости благодаря положительной производной поверхностного натяжения по температуре. В этом случае жидкость под действием сил Марангони стремится к более горячей точке межфазной поверхности, что как ожидается переместит момент осушения стенки в область более высоких тепловых потоков.

Для исследования кипения жидкости в капиллярной трубке был разработан и собран рабочий участок, схематичное изображение которого представлено на рисунке 1. Для визуализации использовалась стеклянная трубка с внутренним диаметром 2 мм и длиной 10 см. Ко входу стеклянной трубки подсоединена металлическая трубка такого же диаметра с электрическим нагревателем, к выходу – металлическая трубка с теплообменником.

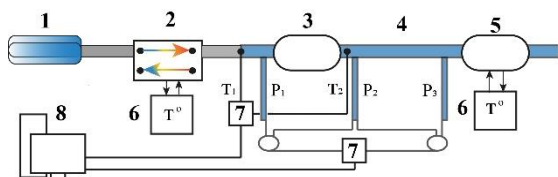


Рис. 1. Схематичное изображение рабочего участка.
1 – шприцевой насос, 2 – теплообменник, 3 – нагреватель,
4 – стеклянная трубка, 5 – конденсатор, 6 – термостат,
7 – АЦП, 8 – компьютер.

Жидкость (вода Milli-Q® и водной раствор SLS) подавалась при помощи шприцевого жидкостного насоса Cole-Parmer®. Чистота рабочей жидкости контролировалась путем измерения поверхностного натяжения жидкости тензиометром KRUSS K100. Визуализация двухфазного течения в трубке осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Vision Research Phantom® v.7.0 со скоростью съемки 1000 кадров в секунду. Приведенная скорость жидкости варьировалась в диапазоне от 0.005 до 0.1 м/с. На рисунке 2 показаны паровые пузыри в капиллярной трубке.



Рис. 2. Характерное изображение паровых пузырей в капиллярной трубке.

На рисунке 3 показана зависимость температуры стенки трубы в зоне нагревателя. В ходе эксперимента тепловой поток постепенно увеличивался со временем, а расход жидкости оставался постоянным – 1 мл/мин. Можно видеть, что при достижении определенного теплового потока начинаются пульсации температуры. Это связано с периодическим осушением стенки и последующим смачиванием. При росте теплового потока амплитуда и частота пульсаций возрастает.

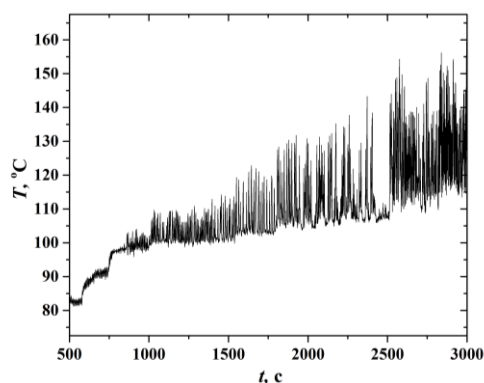


Рис. 3. Температура обогреваемой стенки при увеличивающемся тепловом потоке.
Расход жидкости – 1 мл/мин.
Тепловой поток – до 33 Вт.

Список литературы

1. Semenov A. A., Peschenyuk Y. A., Vozhakov I. S. Application of Aqueous Solutions of Surfactants in Pulsating Heat Pipe //Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Т. 30. – №. 1. – С. 58–63.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФ № 20-79-10096

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МЕЖФАЗНОГО МАССООБМЕНА ПРИ ВСПЛЫТИИ ОДИНОЧНОГО ПУЗЫРЬКА

Воробьев М.А.^{1,2}, Кашинский О.Н.²

¹ Новосибирский государственный университет

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

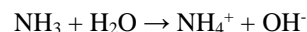
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Интерес к пузырьковым течениям связан, с одной стороны, с повсеместным присутствием этого типа двухфазных потоков в различных технических приложениях, и огромным разнообразием физических эффектов, с другой. Тепловые насосы абсорбционного типа представляют собой одну из таких технологий, в которой двухфазные потоки играют ключевую роль. Существует несколько способов интенсифицировать массообмен в абсорбере теплового насоса, один из них – максимизировать площадь межфазной поверхности, введя газовую фазу в виде пузырей. Такие тепловые насосы имеют ряд преимуществ перед аппаратами, в которых иначе организована структура межфазной границы [1]. В работе [2] было проведено сравнение коэффициентов тепло- и массоотдачи для пузырькового абсорбера по сравнению с пленочным. Было показано, что пузырьковые абсорберы показывают существенно большую эффективность (позволяющую сократить объем теплообменника на 50% при той же мощности). В монографии В.Е. Накорякова и Н.И. Григорьевой [3] приведено обобщение многолетних исследований. При этом до сих пор не существует достаточно точных методов описания пузырьковой абсорбции и при анализе работы пузырькового абсорбера во многих исследованиях используются упрощенные интегральные методы расчета. А любого рода численные модели требуют для верификации надежные экспериментальные данные.

Таким образом, настоящая работа посвящена детальному исследованию процесса абсорбции одиночного пузырька в потоке жидкости.

Установка представляет собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу контур. Из насоса рабочая жидкость подается в канал. В нижней части канала установлен инжектор газа, генерирующий пузырьки заданного размера. Расход жидкости контролируется краном и изменяется по перепаду давления на расходомерной диафрагме. Расход газа контролируется редуктором и натекателем, и измеряется по перепаду давления на калиброванном капилляре. Газожидкостная смесь с выхода рабочего канала попадает в бак-сепаратор, где происходит разделение фаз. Далее жидкость сливается в основной бак по возвратной трубе. При помощи системы термостабилизации, состоящей из клапана, змеевика, термопары и измерителя-регулятора, температура жидкости в баке поддерживается постоянной.

В вертикальный канал из оптически прозрачного материала, по которому движется рабочая жидкость, инжектировался одиночный пузырек заданного размера. Дистиллированная вода использовалась как рабочая жидкость, в роли газа выступал аммиак. Растворимость аммиака в воде составляет примерно 700 объемов на объем воды (при температуре 20 °С), что позволило обеспечить достаточно высокую скорость массообменного процесса. Для визуализации диффузионного следа за пузырьком в рабочую жидкость был добавлен фенолфталеин. Водный раствор аммиака («нашатырный спирт») имеет слабощелочную реакцию из-за протекания процесса:



Фенолфталеин является индикатором кислотности и окрашивает щелочную среду в диффузионном следе пузырька в красный цвет. Аналогичный метод применялся в работах академика В.Е. Накорякова [4].

Всплытие пузырька фиксировалось видеокамерой. Полученные теневые изображения обрабатывались в автоматическом режиме. В результате обработки изображений была получена информация о скорости всплытия пузырька, его траектории, о скорости изменения его объема, а так же получены картины диффузного следа. Получены зависимости скорости абсорбции пузырька от его диаметра и от скорости жидкости.

Результаты исследования будут использованы для валидации модели абсорбции/десорбции парового пузырька, движущегося в потоке жидкости.

Список литературы

1. Jiang M. et al. Visual experimental research on the effect of nozzle orifice structure on R124–DMAC absorption process in a vertical bubble tube // *Int. J. Refrig.* 2016. Vol. 68. P. 107–117.
2. Tae Kang Y., Akisawa A., Kashiwagi T. Analytical investigation of two different absorption modes // *Int. J. Refrig.* 2000. Vol. 23, № 6. P. 430–443.
3. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. Новосибирск: Наука, 2010. 113 р.
4. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Петухов А.В. Абсорбция при снарядном течении в вертикальной трубе // *ИФЖ.* 1987. Vol. 52, № 4. P. 563–568.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00092)*

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОПУСКНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Воробьев М.А., Кашинский О.Н.

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

e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

В настоящее время разностороннее применение газожидкостных течений опережает процесс их детального исследования. Для моделирования пузырьковых течений необходимы эмпирические данные о локальной структуре газожидкостных потоков.

Структура двухфазных пузырьковых течений существенно зависит не только от расходов фаз, и их физических параметров, но и от ориентации канала и направления течения [1, 2]. В настоящее время восходящие пузырьковые потоки в каналах простой геометрии весьма хорошо изучены [3–5]. Также в последнее время в литературе появилось множество работ по спутным опускным турбулентным пузырьковым течениям [6, 7]. Существуют исследования опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса [8]. Но на сегодняшний день остаются слабоизученными опускные пузырьковые течения вблизи режима зависания газовой фазы, когда скорость всплытия пузырьков близка к скорости потока жидкости.

В связи с этим настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию локальных характеристик опускного пузырькового газожидкостного потока электродиффузионным методом при расходных параметрах фаз соответствующих течению вблизи режима зависания газовой фазы.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу контур. Роль рабочего участка выполняла вертикальная труба с внутренним диаметром 20 мм, изготовленная из оргстекла. Рабочий участок состоял из нескольких секций. На выходе рабочего участка устанавливался вентиль, который предотвращал разрыв опускного потока. Газ вводился в поток через систему нержавеющих капилляров с внутренним диаметром 0.2 мм, установленных в форкамере. Образование газовых пузырей производилась в восходящем течении. Затем газожидкостная смесь подавалась в рабочий участок через U-образную трубку.

Измерение гидродинамических характеристик течения проводилось электродиффузионным методом [9]. Определение гидродинамических характеристик потока данным методом основано на измерении скорости диффузии активных ионов к поверхности электрода-датчика, которая зависит от градиента скорости потока жидкости на поверхности датчика. Данный метод позволяет исследовать гидродинамику пристенной зоны каналов, при этом, не внося никаких возмущений в поток жидкости. В качестве рабочей жидкости ис-

пользовался специальный электролит, состоящий из водного раствора ферри- и ферроцианида калия ($K_3Fe(CN)_6$ и $K_4Fe(CN)_6$) и карбоната натрия (Na_2CO_3). Датчик напряжения трения на стенке представлял собой платиновую пластинку сечением 0.05×0.6 мм, которая клеивалась в стенку измерительного участка и зашлифовывалась заподлицо со стенкой. Ток датчика усиливался широкополосным усилителем постоянного тока и подавался на АЦП. Обработка сигнала датчиков производилась численно.

Для определения дисперсности газовой фазы пузырьковое течение снималось на видеокамеру. Обработка полученных в ходе эксперимента изображений производилась в автоматическом режиме.

В результате исследования были получены экспериментальные данные о зависимости напряжения трения на стенке и пульсаций напряжения трения от расхода жидкости, истинного газосодержания и дисперсности газовой фазы.

Полученные результаты могут быть использованы для валидации расчетных кодов.

Список литературы

1. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas–liquid flow in a vertical pipe // *Int. J. Multiph. Flow*. 1999. Vol. 25, № 1. P. 109–138.
2. Chinak A.V. et al. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 118. P. 785–801.
3. Субботин В.И. et al. Структура турбулентного газо-водяного потока в каналах // *Докл. АН СССР*. 1971. Vol. 197, № 1. P. 52–55.
4. Inoue A. et al. Void fraction, bubble and liquid velocity profiles of two-phase bubbly flow in a vertical pipe // *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*. 1976. Vol. 42, № 360. P. 2521–2531.
5. Бурдуков А.П., Козьменко Б.К., Накаряков В.Е. Распределение профилей скорости жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях // *ЖПМТФ*. 1975. Vol. 6. P. 29–32.
6. Hibiki T. et al. Structure of vertical downward bubbly flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* Elsevier Ltd, 2004. Vol. 47, № 8–9. P. 1847–1862.
7. Lokanathan M., Hibiki T. Flow regime, void fraction and interfacial area transport and characteristics of co-current downward two-phase flow // *Nucl. Eng. Des.* Elsevier B.V., 2016. Vol. 307, № May 2016. P. 39–63.
8. Vorobyev M.A., Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward Bubbly Flow in a Pipe at Subcritical Reynolds Numbers // *Fluid Dyn.* 2019. Vol. 54, № 2.
9. Kashinsky O.N., Timkin L.S., Cartellier A. Experiments in Fluids Experimental study of “laminar” bubbly flows in a vertical pipe // *Experiments in Fluids*. 1993. Vol. 14. 308–314 p.

*Работа выполнена в рамках
Государственного задания ИТ СО РАН*

**ДОСТОИНСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
БИНАРНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Гогонин И.И.

ФГБУН институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе г. Новосибирск

Использование тонкопленочных парогенераторов позволит существенно снизить количество дорогостоящего холодильного агента в контуре геотермальной электростанции. При спутном потоке пара и жидкости исключается попадание крупных капель на поверхность труб пароперегревателя. Применение оребренных труб в пучке с оптимальными парамет-

рами оребрения обеспечивает равномерное орошение. Искусственные центры парообразования оребренной трубы многократно интенсифицирует теплообмен при кипении пленки, что в конечном итоге приводит к снижению веса и габаритов парогенератора.

РЕГУЛЯРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ СТЕНКИ В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Голубкина И.В., Осипцов А.Н.

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

e-mail: giv-mm@mail.ru

Рассматривается стационарное регулярное отражение ударной волны от плоской стенки в газокапельном потоке с испаряющимися каплями. Мотивацией для данного исследования послужил поиск нового способа «безмашинного газодинамического энергоразделения» – такой схемы течения, где происходит разделение исходного однородного газового потока на две части, температуры торможения которых существенно различаются, без совершения работы и в отсутствие внешнего теплообмена. Одной из таких схем течения является «труба Леонтьева», в которой энергоразделение осуществляется за счет теплообмена между сверх- и дозвуковыми газовыми потоками, разделенными тонкой теплопроводной перегородкой [1]. Одним из способов повышения эффективности этой схемы энергоразделения является добавление в поток мелких капель жидкости, что позволяет снизить температуру восстановления стенки со стороны сверхзвукового потока. В экспериментальной работе [2] в сверхзвуковой газокапельный поток было помещено центральное тело, генерирующее косую ударную волну, которая, отражаясь от стенки канала, приводит к более интенсивному теплообмену на стенке благодаря осаждающимся каплям. Интерпретация полученных результатов ставит вопросы о структуре течения, формирующегося при столкновении наклонной ударной волны со стенкой в газокапельном потоке, и о параметрах отраженной волны.

Когда идет речь об ударных волнах в газодисперсных средах, обычно предполагается, что капли, обладающие некоторой инерционностью, не «видят» поверхность газодинамического разрыва и проходят сквозь неё без изменений, далее следует зона релаксации, в которой происходит выравнивание скоростей и температур фаз, в результате чего фазы приходят к новому состоянию равновесия. В зоне релаксации происходит испарение капель, и новое равновесное состояние достигается в тот момент, когда все капли полностью испарятся, или когда прекратится межфазный теплообмен, поскольку температуры фаз придут к одному значению. Ударная волна вместе с зоной релаксации в литературе часто называется волной с частичной дисперсией [3]. В гетерогенных средах могут возникать и волны с полной дисперсией – структуры, в которых газодинамический разрыв отсутствует, а плотность и другие параметры газа и частиц изменяются непрерывно, проходя стадии рассогласования и последующего выравнивания скоростей и температур фаз. Волны с полной дисперсией возникают, если по суммарным параметрам газодисперсной смеси поток сверхзвуковой, тогда как по параметрам несущей фазы он является дозвуковым.

Для определения связи равновесных параметров фаз перед волной уплотнения и за ней получены

обобщенные соотношения Рэнкина-Гюгонио для газодисперсных сред с испаряющимися каплями:

$$[\rho u(1 + \alpha)] = 0$$

$$[p + (1 + \alpha)\rho u^2] = 0$$

$$\left[\frac{u^2}{2} + c_p T - \frac{\alpha H}{1 + \alpha} \right] = 0$$

Здесь u – нормальная к волне скорость фаз, T , ρ , p – температура, плотность и давление газа, α – относительная массовая концентрация капель, H – скрытая удельная теплота парообразования.

С использованием обобщенных соотношений Рэнкина-Гюгонио проведено параметрическое исследование одномерных и двумерных течений смеси воздуха с каплями воды как при наличии одиночной волны с полной или частичной дисперсией, так и в области регулярного отражения таких волн от стенки. В случае одиночной волны найдены диапазоны безразмерных определяющих параметров – числа Маха волны и относительной массовой концентрации капель, соответствующие полному и неполному испарению капель за волной, а также волнам с полной или частичной дисперсией. При исследовании взаимодействия волны уплотнения с твердой стенкой в газокапельном потоке установлено, что возможны десять различных конфигураций симметричного регулярного отражения с различным сочетанием волн с полной/частичной дисперсией и различными состояниями среды (одно- или двухфазное) в областях за приходящей и отраженной волной. Для каждой из десяти конфигураций найдены соответствующие диапазоны определяющих параметров (числа Маха, массовой концентрации капель и угла между стенкой и падающей волной).

В рамках двухконтинуальной модели газокапельной среды [4] проведены численные расчеты структуры течения «внутри» прямой волны с полной и частичной дисперсией, получены распределения параметров фаз в зоне релаксации для случаев полного и неполного испарения капель за волной.

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 157–159.
2. Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Киселев Н.А. и др. Измерение адиабатической температуры стенки плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком // Изв. РАН, МЖГ. 2020. №5. С. 130–136.
3. Young J.B., Guha A. Normal Shock-Wave Structure in Two-Phase Vapor-Droplet Flow // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 228. P. 243–274.
4. Marble F.E. Dynamics of dusty gases // Annu. Rev. Fluid Mech. 1970. Vol. 2. P. 397–446.

*Работа выполнена за счет средств гранта
Российского Научного Фонда
(проект №19-19-00234)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ВОДО-СПИРТОВЫХ СМЕСЕЙ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ И КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Горбачев М.В.¹, Макаров М.С.^{1,2}, Терехов В.И.^{1,2}, Сюзаев А.И.¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

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

e-mail: max_friend@ngs.ru

В последние годы необычайно возрос интерес к возможностям использования модифицирования поверхностей для интенсификации или подавления тепломассообменных характеристик. Эта проблема представляется чрезвычайно сложной и многофакторной. Поведение жидкости на твердой поверхности определяется смачиваемостью, для улучшения которой используется микро- и наноструктурирование поверхностей. Данная задача рассматривалась в большом числе расчетных и экспериментальных работ, таких как [1–4].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование процесса испарения водо-спиртовых смесей, при условии свободной конвекции на капиллярно-пористых поверхностях, выполненных из алюминия и титана.

Проведена серия экспериментов по исследованию динамики изменения высоты подъема жидкости известного состава на модифицированной поверхности, при различных температурах окружающей среды. Рабочая жидкость представляла собой смесь дистиллированной воды и этилового спирта. Объемная концентрация спирта в смеси варьировалась в пределах 0–95,5% об.

На рисунке 1 приведены типичные фотографии фронта смачивания поверхности модифицированной пластины, изготовленной из титана, в различные промежутки времени τ от начала процесса. Пунктирной линией обозначена средняя высота фронта жидкости.

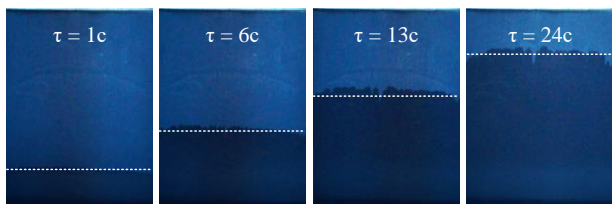


Рис. 1. Смачивание модифицированной поверхности титановой пластины ($T_v=15^\circ\text{C}$, $T_0=21^\circ\text{C}$, $\varphi_0=28\%$, $K=57,3\%$ об).

На рисунке 2 показаны результаты обработки экспериментальных данных, полученных на модифицированной поверхности, изготовленной из титана (результаты получены при температуре жидкости $T_v=15^\circ\text{C}$). На рисунке обозначены: T_0 – температура окружающей среды; φ_0 – относительная влажность среды; K – объемная концентрация этилового спирта в смеси.

Из полученных результатов видно, что увеличение массовой доли этилового спирта в смеси приводит к увеличению времени подъема столба жидкости по модифицированной поверхности (как следствие, к уменьшению скорости смачивания). Такое поведение можно объяснить физическими свойствами жидкостей: капиллярная постоянная для воды 3,8 мм, эти-

лового спирта 2,4. Т.е. при условии полной смачиваемости стенок и водой и спиртом столб воды в капилляре модифицированной поверхности выше, а значит и заполняться он будет быстрее.

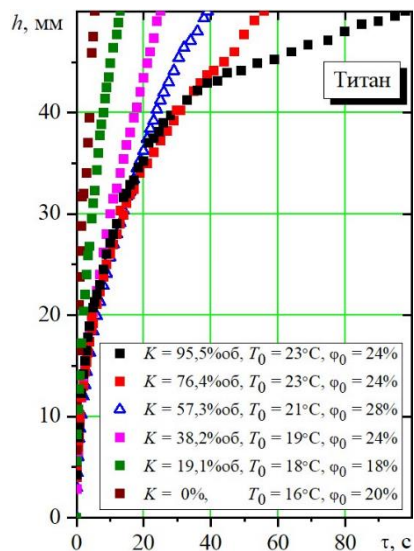


Рис. 2. Динамика изменения высоты подъема смеси жидкости на модифицированной поверхности.

Зависимости на рисунке 2, показывают наличие следующих режимов изменения высоты смачивания поверхностей:

1. $h : \tau^1$ – высота линейно зависит от времени (начальные моменты времени);
2. $h : \tau^{1/2}$ – универсальный закон капиллярного потока, при котором капиллярная сила уравновешивается вязким сопротивлением;
3. $h : \tau^{1/3}$ – менее интенсивное изменение высоты подъема.

Указанные режимы смачивания вертикальных модифицированных поверхностей были отмечены в работах [5, 6].

Список литературы

1. Vorobyev A.Y., Guo C. Metal pumps liquid uphill // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 94. – No. 224102.
2. Vorobyev A.Y., Guo C. Water sprints uphill on glass // Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 108. – No. 123512.
3. Hsieh C.C., Yao S.C. Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces // ИЖМТ. – 2006. – V. 49. – P. 962-974.
4. Liu Y.Y., Chen X.Q., Xin J.H. Can superhydrophobic surfaces repel hot water? // J. Mater. Chem. – 2009. – V. 19. – P. 5602-5611.
5. Deng D. et al. Int. J. Heat and Mass Transfer 2013. V. 56, 283-293.
6. Tang H. et al. Int. J. Heat and Mass Transfer 2018, V. 129, P. 907-915.

Работа поддержана РФФИ
(грант № 20-08-00717 А)

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА СКОРОСТЬ И ДИАМЕТР ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е.^{1,2}, Рандин В.В.^{1,2}, Чинак А.В.¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

e-mail: gorelikova.a@gmail.com

Газовые пузырьки, всплывающие в неподвижной или движущейся жидкости, могут оказывать значительное влияние на теплообмен за счет перемешивания пристенных слоев жидкости. Наиболее распространены работы по исследованию вертикальных труб и каналов [1]. Значительно меньшее внимание уделяется наклонным трубам и каналам, несмотря на то что угол наклона может вносить существенный вклад в характер течения газожидкостных потоков и оказывать влияние на пузырьки, всплывающие в неподвижной жидкости.

Основное внимание в работах по всплытию пузырей в наклонных трубах и каналах уделяется геометриям, с углами наклона, не превышающими 10° [2], меньше представлено работ, где рассматривается геометрия с углами, близкими к 30° [3]. При этом для газожидкостных течений в плоских каналах было показано, что при угле наклона в диапазоне от 30° до 60° наблюдается значительное усиление трения и теплообмена в верхней стенке канала [4].

В работе представлено экспериментальное исследование распределения скоростей и диаметров воздушных пузырьков в неподвижной жидкости в наклонной трубе при вариации углов наклона трубы при отсутствии межфазного теплообмена. Для экспериментов использовался стенд, представленный на рис. 1. Газ (воздух) подавался с помощью измерителя-регулятора расхода газа (1) через капилляр (2) с известными геометрическими параметрами в жидкость. Рабочим участком служила стеклянная труба (3) внутренним диаметром 36 мм и длиной 500 мм. Угол наклона варьировался от 0° , что соответствовало вертикальному положению, до 90° , при котором рабочий участок принимал горизонтальное положение. Съемка пузырей проводилась на камеру (4) при освещении светодиодной матрицей (5).

Скорость пузырей вычислялась из покадрового сдвига, диаметр рассчитывался из площади, занимаемой пузырьком на снимке, как диаметр эквивалентной сферы. Скорость съемки составляла 120 кадров/с, разрешение 720×1280 точек. Точность определения диаметров пузырей составляла $0,01 \pm 0,1$ в зависимости от размеров пузыря.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода и раствор ферри- и ферроцианида калия и углекислого натрия в дистиллированной воде. Присутствующие в рабочей жидкости компоненты не вносят значительного вклада в ее теплофизические свойства. Расход гада варьировался в диапазоне до 10 мл/мин.

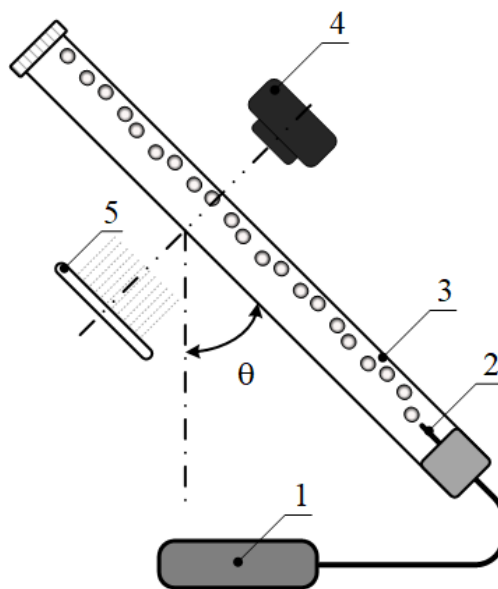


Рис. 1: Схема экспериментальной установки:
1 – измеритель-регулятор расхода газа, 2 – капилляр,
3 – рабочий участок, 4 – камера,
5 – светодиодная матрица.

Получены экспериментальные данные о скорости движения одиночных пузырей в неподвижной жидкости в зависимости от диаметра пузыря и от угла наклона рабочего участка. Получены распределения диаметров газовых пузырей для различных углов наклона канала и различных значений расхода газа.

Полученные данные будут использованы для анализа диаметров газовых пузырей в газожидкостных турбулентных потоках в наклонных трубах и каналах.

Список литературы

1. Houston S.D.; Cornwell K. Heat transfer to sliding bubbles on a tube under evaporating and non-evaporating conditions // Int. J. Heat Mass Transfer. 1996. Vol. 39 p. 211–214.
2. Zenit R. et al. Shear flow of a suspension of bubbles rising in an inclined channel // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 515. P. 261–292.
3. Donnelly B., O'Reilly Meehan R., Nolan K., Murray D. B. The dynamics of sliding air bubbles and the effects on surface heat transfer // Int. J. Heat Mass Transfer 2015, Vol. 91 p. 532 – 542.
4. Гореликова А.Е., О. Н. Кашинский О.Н., Пахомов М.А., В. В. Рандин В.В., Терехов В.И., Чинак А.В. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование. Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2017, № 1. с. 117–129.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН по программе № 121032200034-4

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ФАЗОВОГО ПОЛЯ, СВЯЗАННЫЕ С ШИРИНОЙ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ

Гурин А.М.^{1,2}, Скопинцев А.М.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: guralisk@mail.ru

Метод фазового поля позволяет моделировать течение многофазной жидкости. В основе метода лежит некоторый функционал энергии, минимизация которого формирует стационарное распределение фаз. Существуют варианты метода с функционалом, построенным на параметре порядка, плотности всей смеси и плотности отдельных компонент. Все эти варианты имеют общие свойства, которые проще всего продемонстрировать на методе с функционалом, зависящим от параметра порядка [1].

Минимизация функционала выполняется через решение уравнения Кана-Хиллиарда, которое сохраняет количество каждой фазы или уравнения Аллена-Кана, которое преобразовывает одну фазу в другую. Уравнение Кана-Хиллиарда работает как уравнение диффузии для параметра порядка с потоком, который локально уменьшает энергию, определяемую функционалом. В случае плоской межфазной границы уравнение Кана-Хиллиарда имеет точное решение в виде гиперболического тангенса, из которого определяется связь параметров уравнения с поверхностным натяжением и шириной межфазной границы. Уравнение имеет четвертую производную по пространству и для удобства счета обычно разбивается на два уравнения, связанных с параметром порядка и химическим потенциалом. В отличие от других способов аппроксимации межфазной границы, например VOF или Level set, метод фазового поля явно задает ширину межфазной границы и имеет хорошую сходимость относительно длины ребра расчетной сетки. Уравнение Кана-Хиллиарда дополняется несжимаемыми уравнениями Навье-Стокса, которые моделируют перенос фаз и распределение давления в расчетной области.

Метод имеет доказанную сходимость к прямому решению задачи Стефана о движении межфазной границы, в случае стремления ширины межфазной границы к нулю [2]. Несмотря на это, у метода есть несколько нежелательных для моделирования несмешивающейся многофазной среды свойств. Метод консервативен и интеграл от параметра порядка по замкнутой области неизменен, но в расчетах наблюдается изменение объема капель и более того, параметр порядка в расчетной области выходит за пределы, соответствующие чистым фазам [3]. Такой нефизичный эффект приводит к исчезновению мелких капель с перемещением их фазы в более крупные капли. Эффект усугубляется в случае непрерывного течения фазы через расчетную область. Поток чистой фазы вымывает избыток или недостаток фазы, вызванный выходом параметра порядка за пределы, и обеспечивает непрерывный рост или наоборот испарение другой фазы. Такой эффект легко продемон-

стрировать на тестовой задаче с Т-образным тройником, в ответвлении которого заперта капля одной фазы, а другая фаза непрерывно течет по прямолинейной части тройника. В зависимости от того является ли запертая фаза смачивающей стенки канала или несмачивающей, наблюдается рост или уменьшение объема капли со временем как показано на рис. 1.

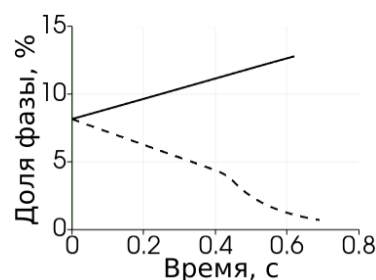


Рис. 1. Зависимость объемной доли запертой фазы от времени. Штрихованная линия — доля несмачивающей фазы, сплошная линия — доля смачивающей фазы.

Нефизичные эффекты, связанные с испарением, усиливаются с ростом произведения ширины межфазной границы на её кривизну. Простой способ борьбы с нефизичными эффектами, это уменьшение ширины межфазной границы. С уменьшением ширины необходимо мельчить расчетную сетку, чтобы обеспечить достаточное разрешение межфазной границы. В случае сложной геометрии с большим количеством межфазных границ такой подход может значительно увеличить длительность расчета. Автором предложена коррекция, подавляющая эффект испарения или роста капель связанного с наличием сквозного течения. Коррекция основана на смещении исходного потенциала, чтобы устранить выход параметра порядка за пределы, соответствующие стабильным фазам.

Список литературы

1. Florian Frank et al., Direct Numerical Simulation of Flow on Pore-Scale Images Using the Phase-Field Method // SPE J. 2018. V. 23, No. 5. P. 1833–1850.
2. K. R. Elder, Martin Grant, Nikolas Provatas, J. M. Kosterlitz, Sharp interface limits of phase-field models // Phys. Rev. E, 2001. V. 64, No. 2.
3. Pengtao Yue, Chunfeng Zhou, James J. Feng, Spontaneous shrinkage of drops and mass conservation in phase-field simulations // J. Comput. Phys. 2007. V. 223. N 1. P. 1–9.

Работа выполнена при поддержке
Научно-технического центра Газпромнефти
и финансовой поддержке по проекту
ГЗ_FWGG-2019-0002

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С ЖИДКОСТЬЮ И СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ

Дьякова В.В.¹, Полежаев Д.А.²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

² Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

e-mail: polezhaev@pspu.ru

Экспериментально исследуется устойчивость межфазной границы между жидкостью и сыпучей средой во вращающемся горизонтальном цилиндре. Рассматривается случай умеренного вращения цилиндра, когда тяжелые (легкие) частицы сыпучей среды образуют кольцевой (цилиндрический) слой вблизи цилиндрической стенки (в центре) полости. В быстро вращающемся цилиндре сыпучая среда и жидкость под действием центробежной силы инерции образуют невозмущенную межфазную границу. При уменьшении скорости вращения влияние силы тяжести увеличивается, и на поверхности сыпучей среды возникает рельеф в виде холмов с гребнями, ориентированными параллельно оси вращения. Обнаружено, что рельеф на поверхности сыпучей среды существует только в узком диапазоне скоростей вращения: при очень медленном вращении межфазная граница разрушается, и все частицы сыпучей среды переходят во взвешенное состояние.

Эксперименты по изучению устойчивости межфазной границы проведены в зависимости от скорости вращения, диаметра частиц и вязкости жидкости.

В [1] показано, что холмы на поверхности тяжелой сыпучей среды возникают в результате неустойчивости Кельвина – Гельмгольца: под действием силы тяжести частицы на поверхности кольцевого слоя сыпучей среды на опускающейся (поднимающейся) стенке цилиндра двигаются быстрее (медленнее) жидкости около межфазной границы. Таким образом, поверхностный слой сыпучей среды совершает азимутальные колебания относительно равномерно вращающейся (в лабораторной системе отсчета) жидкости.

Условием для возникновения неустойчивости данного типа является ожигение поверхностного слоя сыпучей среды. В пороге возникновения неустойчивости ожигение происходит вблизи верхней точки цилиндра, где центробежная сила инерции и сила тяжести противоположно направлены. В этом случае межфазная граница разделяет находящуюся сверху более плотную сыпучую среду и находящуюся снизу менее плотную чистую жидкость. Такое расположение гидродинамических сред провоцирует

развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора: частицы на поверхности сыпучей среды становятся подвижными, а сама сыпучая среда ожигается. Данные рассуждения подтверждаются наблюдениями за регулярным рельефом: в пороге его возникновения отношение силы тяжести к центробежной силе инерции $\Gamma \approx 1$ во всех экспериментах.

Эксперименты с частицами легкой сыпучей среды показывают, что на межфазной границе возникают пространственные структуры нескольких типов. При быстром вращении цилиндра поперечное сечение слоя сыпучей среды имеет круглую форму. При понижении скорости вращения основание столба сыпучей среды приобретает форму почти правильного многоугольника: в различных экспериментах наблюдались многоугольники с числом сторон от 3 до 10. Причина возникновения данного типа неустойчивости пока остается не выясненной. Одновременно с изменением формы сыпучей среды на ее поверхности возникает рельеф, пространственный период которого хорошо согласуется с данными о размере холмов, возникающих в результате неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на поверхности тяжелой сыпучей среды.

Данные о пространственном периоде холмов, возникающих на поверхности легкой или тяжелой сыпучей среды вследствие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, хорошо согласуются на плоскости безразмерных управляющих параметров $(\Gamma d/\delta, \lambda)$, здесь d – диаметр частиц, δ – толщина вязкого пограничного слоя Стокса, возникающего вследствие неравномерного вращения ожигенного слоя сыпучей среды, λ – угловой размер холмов. Согласно измерениям, азимутальный размер λ линейно возрастает с увеличением безразмерного параметра $\Gamma d/\delta$.

Список литературы

1. Dyakova V, Polezhaev D. Pattern formation on the surface of the granular medium in a horizontal rotating cylinder filled with fluid // Phys. Rev. Fluids. 2022. V. 7 (4). P. 044302.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 18-71-10053)*

ТРАНСПОРТ ПРИМЕСИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ПУЛЬСАЦИОННОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Евграфова А.В., Марышев Б.С.

Институт механики сплошных сред, Пермь

e-mail: eav@icmm.ru

Фильтрация жидкостей в пористых средах является важным процессом во многих природных и технологических системах [1]. Актуальным на сегодняшний день остается вопрос о способах управления процессом фильтрации и повышении эффективности выноса примесей из массива пористого материала. Как показывает множество примеров, введение пульсаций параметра есть наиболее простой способ управления поведением механической системы [2]. При этом лабораторный эксперимент является необходимым инструментом получения ряда входных параметров для численных моделей.

В данной работе представлены результаты лабораторного исследования транспорта примеси в горизонтальной пористой колонне. В качестве пористой среды был использован стеклянный гранулят с размером фракций 0.8–1.2 мм (пористость среды 0.365). Пористый материал был помещен в трубу длиной $L=500$ мм и диаметром $D=16.0$ мм. В трубу подавалась вода под постоянным давлением, создававшимся с помощью поднятого на определенную высоту сосуда Мариотта. На конце трубы давление можно было варьировать по гармоническому закону, создавая тем самым гармонические изменения расхода. Период колебаний T выбирался относительно времени, которое потребуется для продавливания через среду одного порового объема жидкости в отсутствие пульсаций – τ . На рис. 1 представлены кривые расхода для $T=\tau$, $T=0.85\tau$ и $T=0.65\tau$. Амплитуда колебаний составляет около 38% от начального расхода жидкости Q_0 .

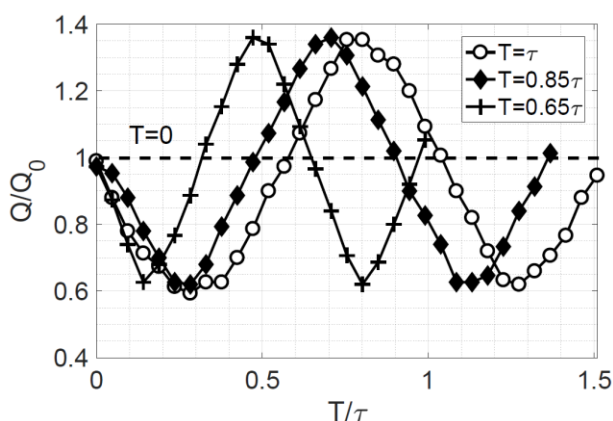


Рис. 1 Кривые расхода для различных периодов колебания в отсутствие примеси.

В качестве примеси были использованы водные растворы NaCl различной концентрации. Объем вводимого в среду раствора равен одному объему порового пространства колонны. На рис. 2 представлены кривые выхода примеси для различных периодов пульсаций расхода. Кривые получены для массовой концентрации примеси $C_0=20\%$. Раствор вводился на третьем полупериоде колебаний.

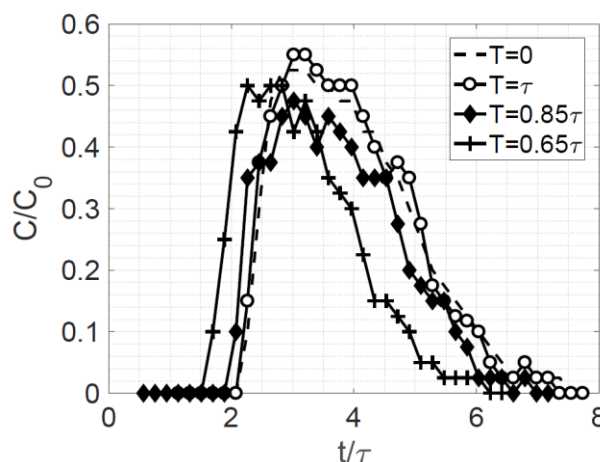


Рис. 2 Кривые выхода примеси для различных периодов колебания и $C_0=20\%$.

Уменьшение периода пульсаций приводит к ускорению выхода примеси из пористого массива. При этом степень асимметрии кривой, которая является следствием сорбционных процессов, уменьшается. Однако, для определения наиболее эффективного механизма управления процессом фильтрации, важно также учитывать влияние амплитуды пульсаций.

Все полученные данные использованы для идентификации параметров математической модели явления.

Список литературы

1. Gouze P. et al Non-Fickian dispersion in porous media: 1. Multiscale measurements using single-well injection withdrawal tracer tests. Water Resources Research. 2007. 44. W06426
2. Maryshev B. S. The effect of sorption on linear stability for the solutal Horton–Rogers–Lapwood problem. Transport in Porous Media. 2015.109. 747-764.

*Работа выполнена за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 20-11-20125)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХФАЗНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ СО СТЕПЕНЬЮ РАСШИРЕНИЯ 1.25 С ПОМОЩЬЮ PIV/PLIF

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Движение двухфазных потоков в элементах реакторных установок, встречается в штатных и аварийных ситуациях при кипении теплоносителя, повторной заливке тепловыделяющих сборок, введении дисперсной фазы в технологических целях и других процессах. При этом пузырьковый режим течения можно считать базовым, и анализ его поведения важен для понимания особенностей механики дисперсных сред.

В последние годы наряду с подходами вычислительной гидродинамики активно разрабатываются методы гидродинамики многофазных потоков (Multiphase Computational Fluid Dynamics). Наиболее точные методы расчета: прямое численное моделирование и метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation) – имеют значительную вычислительную стоимость. В настоящее время методы прямого численного вычисления позволяют учитывать ограниченное количество пузырей, одновременно находящихся в потоке (десятки и сотни), что существенно отличается от реальных масштабов. Для разработки и тестирования менее требовательных к системным ресурсам компьютеров моделей, например, осредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier Stokes, RANS), требуется экспериментальная информация, уточняющая замыкающие соотношения.

На структуру и теплообмен таких течений, даже в нереагирующих течениях и при отсутствии фазовых переходов, могут оказывать влияние следующие определяющие факторы:

- расход жидкости и газа/пара;
- режим течения (ламинарный, переходный, турбулентный);
- модификация турбулентности (интенсификация и подавление);
- размер дисперсных включений (пузырей);
- геометрия стенов и промышленных аппаратов;
- направление течения (восходящее, горизонтальное, наклонное, нисходящее)
- процессы дробления и коалесценции пузырей;
- наличие отрывных областей и т.д.

Может происходить миграция дисперсной фазы в поперечном сечении потока, что приводит к перестройке локальной гидродинамической структуры течения несущей фазы и изменению параметров теплообмена. Возникают дополнительные требования к результатам экспериментальных исследований. Например, приведение данных только о среднем диаметре пузырей в потоке не является достаточным для успешной верификации расчетных кодов, т.к. развиваются подходы, аналогичные уравнениям баланса популяций (Population balance equations, PBEs).

Необходимо представление информации о распределении размеров пузырей в потоке. Подобные данные могут быть получены с помощью различных современных методов (многоконтактные резистивные датчики, сетчатые датчики и др.). Для потоков с относительно малыми газосодержаниями наиболее актуальным является применение современных методов машинного видения к изображениям потока (теневая съемка, лазерно-индуцированная флуоресценция, PIV, PFBV).

Таким образом, изучение движения пузырьковых потоков в каналах со сложной геометрией является актуальной научной задачей.

Данная работа посвящена изучению локальных гидродинамических параметров, в различных сечениях в канале с обратным уступом с высотой 4 мм и степенью расширения равной пяти. Ширина канала – 200 мм. Измерения проведены в однофазном и двухфазном (при относительном расходе газосодержания 2%) режимах течения при числе Рейнольдса, построенного по жидкой фазе $Re=5000$.

Для проведения измерений была использована система PIV/PLIF, состоящая из лазера постоянного свечения с максимальной мощностью 1 Вт и скоростной камеры JET 19. Частота съемки во время проведения экспериментов составляла 1000 кадров в секунду. Для проведения экспериментов в жидкость были добавлены частицы с родаминовой окраской и размером до 20 мкм [1].

Проведена компьютерная обработка полученных изображений. Был использован оригинальный подход, позволяющий выделять образы существенно несферических пузырей на изображениях, содержащих большое количество трассеров. Получены данные о размерах пузырей в потоке, их положении, скорости движения.

Данные о пространственном распределении параметров движения жидкой фазы были получены с помощью стандартных алгоритмов метода PIV. Получены данные об особенностях распределения скорости жидкой фазы в различных областях за уступом.

Полученные данные могут быть использованы для верификации вычислительных методов, описывающих движение дисперсных сред в каналах со сложной геометрией.

Список литературы

1. Bogatko, T.V. et al. The Effect of a Backward-Facing Step on Flow and Heat Transfer in a Polydispersed Upward Bubbly Duct Flow // Water. 2021. V. 13. Paper 2318.

*Работа проведена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ РАСШИРЯЮЩЕЕСЯ СОПЛО

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

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail:levmobile@mail.ru

Мелкодисперсный распыл перегретых жидкостей составляет основу ряда технологических процессов [1]. Диаметр капель распыла холодной воды при использовании центробежных форсунок обычно лежит в пределах 15–20 мкм. Для получения более тонкого распыла оптимальным является фрагментация метастабильной перегретой жидкости, вскипающей при снижении давления в распыливающем устройстве и дробящей исходную структуру на тонкие фрагменты. Процессы фрагментации перегретой воды исследовались и ранее, при этом в наших работах акцент делался на исследования условий достижения тонкой фрагментации, анализе дисперсного состава и структуры факела распыла.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1.

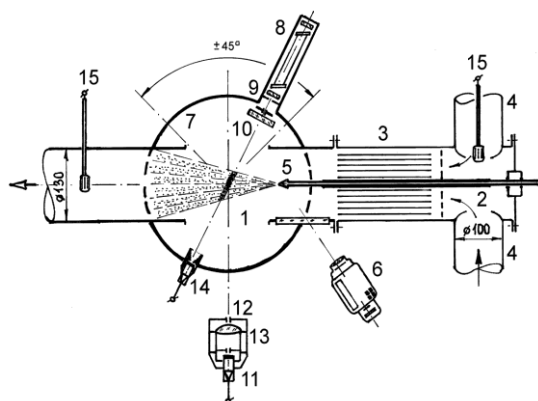


Рис. 1. Схема рабочего участка и системы регистрации излучения: 1 – рабочий участок – труба диаметром 130 мм и длиной 1500 мм; 2 – входное устройство; 3 – хонейкомб для спрямления воздушного потока; 4 – патрубки для подвода воздуха; 5 – форсунка (сопло); 6 – видеокамера; 7 – поворотный стол; 8 – источник монохроматического излучения 532 нм; 9 – ограничительная диафрагма; 10 – ослабляющий нейтральный светофильтр; 11 – устройство регистрации интенсивности рассеянного излучения; 12 – апертурная диафрагма; 13 – объектив; 14 – регистрирующее устройство ослабленного прямого излучения; 15 – датчики влажности и температуры.

Исследовался распыл перегретой воды при температурах до 260°C через конфузorno-диффузорное сопло в условиях сносящего воздушного потока со скоростью до 35 м/с. Параметры сопла: конфузор – угол 60°, критическое сечение сопла $d_{кр}=0,7$ мм, угол раскрытия диффузора 12°, выходное сечение сопла $D_{вых}=8,0$ мм. Для определения дисперсионного состава образующегося факела капель воды использовался метод рассеяния факелом монохроматического излучения 532 нм (твердотельный одномодовый лазер с диодной накачкой с регулируемой мощностью излучения до 20 мВт и выходным диаметром пучка излучения 1,5 мм). Индикатрисы рассеяния регистрировались в диапазоне углов $\pm 45^\circ$. В основе методики обработки индикатрис рассея-

ния лежало решение обратной задачи рассеяния света, базирующееся на положениях теории Ми [2].

Исследовался распыл перегретой воды при температуре на входе в сопло 240 и 260°C и давлениях 4,0 до 6,0 МПа, соответственно, с выраженным бимодальным дисперсионным распределением.

Анализ полученных данных показал ярко выраженное бимодальное дисперсионное распределение и весьма значимые особенности эволюции рассматриваемых факелов распыла по их длине. Это значительное снижение доли субмикронной моды по длине факелов уже в конце начального участка их смешения со спутным потоком воздуха. Как видно из рис. 2, доля субмикронной моды капель (при их радиусе менее 1 мкм) при 240 и 260 °C падает от 0,83 и 0,9 при $L=50$ мм до 0,4 и 0,52 при $L=120$ мм. Особенно заметное падение имеет место в начале основного участка смешения факела распыла со спутным потоком воздуха со скоростью 35 м/с. Далее доля эта продолжает снижаться, хотя и менее быстро до 0,27 и 0,29 при $L=220$ мм.

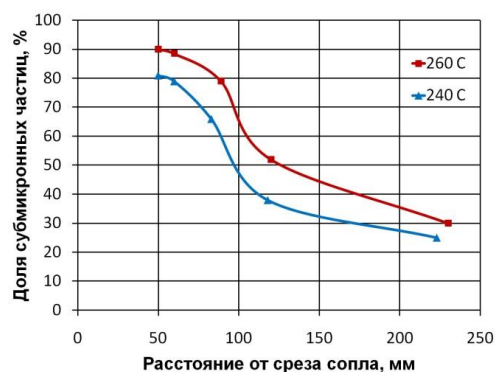


Рис. 2. Изменение доли субмикронной моды капель с увеличением расстояния L от среза сопла для $T_0=240^\circ\text{C}$ ($P_0=4,0$ МПа) и $T_0=260^\circ\text{C}$ ($P_0=6,0$ МПа); сопло $d_{кр}=0,7$ мм, угол раскрытия сопла 12°, $D_{вых}=8,0$ мм.

Причинами такого поведения дисперсионного распределения по длине факела распыла могут быть следующие процессы: испарение мелкодисперсной составляющей и турбулентная, или инерционная коагуляция капель [3].

Список литературы

1. Фаворский О.Н., Алексеев В.Б., Залкин В.И., Зейгарник Ю.А., Иванов П.П., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. / Экспериментальное исследование характеристик газотурбинной установки ТВ3-117 при впрыске перегретой воды в компрессор / Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 60–68.
2. Домбровский Л.А., Залкин В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Оксман А.А., Ходаков К.А. / Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований / Теплоэнергетика 2009, №3, С. 1–20.
3. Zalkind V.I., Zeigarnik Yu.A., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Schigel S.S. / Specific features of evolution of dense atomized superheated water plumes and peculiarities of its diagnostics / Journal of Physics: Conference Series 2057 (2021) 012045.

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ ПРИ ВСКИПАНИИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В КОНФУЗОРНО-ДИФFUЗОРНОМ СОПЛЕ

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

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail:levmobile@mail.ru

Проведено сравнение двух подходов к расчетному описанию гетерогенной нуклеации при «взрывном» вскипании перегретой воды в конфузоре-диффузоре сопла. Сравнение с опытными данными проведено по дисперсионному распределению капель в факеле распыла.

При расчете движения потока перегретой воды в конфузоре-диффузоре сопла, содержащей пузырьки газа, который после взрывного вскипания переходит в паро-капельный поток, решалась система уравнений неразрывности (с переменной плотностью) и уравнений движения и энергии. Причем на каждом шаге по времени рассматривался процесс образования и роста паро-газовых пузырьков в соответствии с принятой моделью гетерогенной нуклеации.

Расчет нуклеации при распылении перегретой воды через конфузоре-диффузорное сопло (см. рис. 1), в рамках классической теории гомогенной нуклеации (КТН) с использованием фактора гетерогенности [1] был выполнен нами в работе [2].



Рис. 1. Параметры диффузорной части сопла.

Однако использование теории гомогенной нуклеации для описания вскипания перегретой жидкости в сопле подразумевает включение в расчет фактора гетерогенности, значение которого заметно влияет на скорость нуклеации, при этом разброс его экспериментальных значений входящий под знак экспоненты в КНТ вносит серьезную неопределенность в результаты расчетов.

В качестве альтернативы был рассмотрен вариант расчета, основанный на следующих соображениях: при геометрических параметрах сопел, рассматриваемых в данной работе, образование пузырей в потоке жидкости определяется главным образом объемной гетерогенной нуклеацией (при перегревах, где нуклеация играет главную роль при диспергировании), для описания которой в [1] предложена модель с распределением центров нуклеации по размерам на основании экспериментальной работы [3]. Характерные размеры центров (на основании экспериментальных

данных) имеют порядок $\sim 0,1$ мкм, при давлениях, соответствующих проведенным экспериментам. При этом, в процессе движения перегретой жидкости в сопле при падении давления происходит процесс десорбции растворенных в ней газов. При температурах выше 100°C коэффициент Генри понижается, что приводит к повышению растворимости двухатомных газов в воде. С учетом данных [4] были проведены расчеты, позволившие оценить объем выделившихся газов и, соответственно, рассчитать количество центров гетерогенной нуклеации. Из расчетов следует, во-первых, что дегазация перегретой воды в процессе ее движения в сопле может являться одной из главных причин гетерогенной нуклеации в диффузоре конфузоре-диффузорного сопла, во-вторых, из приведенной выше оценки следует также, что объема образующихся гетерогенных зародышей недостаточно для распада пелены, и необходимо рассмотреть рост паровых пузырьков на имеющихся гетерогенных центрах, для чего используется подход, изложенный в работе [5].

Опираясь на рассчитанное количество образовавшихся паровых зародышей на выходе из конфузоре-диффузорной части сопла, далее на каждом Лагранжевом этапе рассчитывается их рост во времени до достижения отношения объемов паровой и жидкостной фазы ~ 1.5 . Далее определяется распределение капель по размерам, опираясь на Гауссову упаковку шаров (пузырей). Затем, после учета испарения капель в процессе их дальнейшего движения по диффузору, определяется распределение капель по размерам на выходе из сопла, которое сравнивается с экспериментальным распределением, полученным на основании анализа индикатрис рассеяния лазерного излучения в факеле распыла под различными углами.

Список литературы

1. Кумзерова Е.Ю. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Численное исследование образования и роста пузырей пара в условиях падения давления жидкости.
2. Zalkind V. I., Zeigarnik Yu. A., Nizovskiy V. L., Nizovskiy L.V., Schigel S.S. // Journal of Physics: Conference Series, 1359 (2019) 012034.
3. Chahine G.L., Kalumuck K.M., Cheng J.Y., Frederick G.S., // Validation of bubble distribution measurements of ABS acoustic bubble spectrometer with high speed videophotography // Pasadena, USA, 2001.
4. Руководящие указания по проектированию термических дезаэрационных установок питательной воды котлов // «Энергия», 1961 (ВНИИ им. Ф.Э. Дзержинского и ЦКТИ им. И.И. Ползунова).
5. Намиот А.Ю./ Растворимость газов в воде//М., «Недра», 1991, 167с.

ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ВОДЫ ПРИ РАСШИРЕНИИ ПОТОКА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ НА АДИБАТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СТЕНКИ

Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С.

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

e-mail: zditovets@mail.ru

Процессы конденсации компонент из высокоскоростных газовых потоков сопровождаются скачкообразным изменением параметров потока, что, в свою очередь, должно оказывать существенное влияние на теплогидравлические характеристики обтекаемых поверхностей. Подавляющее большинство работ по исследованию конденсации в высокоскоростных потоках посвящено определению параметров начала конденсации и характеристик образующегося газокпельного потока в широкой окрестности области конденсации [1–3]. Авторам известно лишь несколько работ, в которых упор делается на исследование параметров, характеризующих теплообмен между высокоскоростным потоком с конденсирующимися компонентами и обтекаемой поверхностью [4–7]. Одним из таких параметров является адиабатная температура стенки T_{aw} , т.к. в случае теплообмена между высокоскоростным газовым потоком и обтекаемой поверхностью с температурой T_w удельный тепловой поток q определяется выражением:

$$q = \alpha(T_w - T_{aw})$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(К \cdot м^2)$.

В то же время известно, что чем выше число Маха (M) потока и чем больше число Прандтля (Pr) отличается от единицы, тем больше температура торможения пристенных слоев (температура адиабатной стенки) отличается от температуры торможения основного потока. Для большинства газов $Pr \approx 0.7$, что не позволяет получить существенную разность между указанными температурами даже при высоких числах Маха. Например, для воздуха ($Pr \approx 0.72$) при числе Маха $M=3$ температура адиабатной стенки при турбулентном режиме течения составляет 0.935 от величины начальной температуры торможения потока. Во многих областях, таких как тепловая защита, безмашинное энергоразделение и т.п., снижение адиабатной температуры стенки при прочих равных условиях приводит к существенному положительному эффекту. Известны способы, позволяющие снизить адиабатную температуру стенки, такие как: нанесение на обтекаемую поверхность рельефа определенной формы; реламинаризация пограничного слоя; создание зон отрыва потока, например, в области взаимодействия с падающей ударной волной или при обтекании препятствия.

Конденсация компонент из высокоскоростного потока может существенно повлиять на соотношение между температурой торможения и адиабатной температурой стенки. Например, в работах [7] и [8] на основе численного расчета показано, что мелкие кап-

ли (диаметром несколько микрон), образовавшиеся во внешнем течении и мигрирующие под действием силы Сэфмана в пограничный слой, испаряясь, могут существенно изменить величину T_{aw} , по сравнению с начальной температурой торможения. С другой стороны, при образовании мелких капель в результате конденсации происходит выделение теплоты фазового перехода, что приводит к росту температуры торможения и, следовательно, к росту T_{aw} . Очевидно, что два эти процесса – испарение капель в пограничном слое и рост температуры торможения за счет выделения теплоты фазового перехода при конденсации разнонаправленно влияют на величину T_{aw} .

В настоящей работе экспериментально показано, что конденсация паров воды из сверхзвукового потока влажного воздуха существенно влияет на значение адиабатной температуры стенки. Получено, что для канала фиксированной геометрии положение области начала конденсации зависит от значения начальной относительной влажности, а поведение адиабатной температуры стенки (рост/снижение по сравнению с режимом «сухого» воздуха) от величины начального влагосодержания.

Список литературы

1. Campbell J. F., Chambers J. R. and Rumsey C. L. Observation of airplane flowfields by natural condensation effects // *J. Aircr.*, 1989. vol. 2, no. 7, pp. 593–604, doi: 10.2514/3.45809.
2. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филлипов. Москва.: Энергоиздат, 1981.
3. Wyslouzil B. E., Wölk J. // Overview: Homogeneous nucleation from the vapor phase—The experimental science. *J. Chem. Phys.* 2016, vol. 145, no. 21, p. 211702.
4. Салтанов Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения. Минск: Высшая школа, 1972.
5. Volchkov E. P., Terekhov V. V. and Terekhov V. I., A numerical study of boundary-layer heat and mass transfer in a forced flow of humid air with surface steam condensation // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2004. vol. 47, no. 6–7, pp. 1473–1481. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.09.018.
6. Azanov G. M., Osipov A. N. The effect of fine evaporating droplets on the adiabatic-wall temperature in a compressible two-phase boundary layer // *Fluid Dyn.*, 2016. vol. 51, no. 4, pp. 498–506, doi: 10.1134/S0015462816040098.
7. Голубкина И. В., Осипов А. Н. Влияние примеси неиспаряющихся капель на структуру течения и температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* 2019, no. 3, pp. 58–69, doi: 10.1134/S0568528119030046.
8. Леонтьев А. И., Осипов А. Н., и Рыбдылова О. Д. Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокпельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // *Теплофизика высоких температур*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 910–917, doi: 10.7868/S0040364415060162.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №19-19-00234

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ЦЕЛЮ ПОДАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИИ

Иващенко Е.И.^{1,2}, Иващенко В.А.¹, Плохих И.А.², Мулляджанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: edauengauer@mail.ru

Регулирующие клапаны, задачей которых является обеспечение определенного режима течения (перепада давления и расхода), являются неотъемлемой частью многих промышленных устройств. К примеру, такие клапаны устанавливаются на атомных и тепловых станциях, где необходимо плавно снижать высокое входное давление. Основными действующими частями клапана являются золотник и клетка. Золотник регулирует сечение клетки, через которое проходит поток жидкости, а сама клетка (см. рис. 1) является сопротивлением для потока. На характеристики потока можно влиять как с помощью изменения геометрии клетки, так и с помощью изменения эффективного сечения клетки опусканием или поднятием золотника. Основной проблемой в таких клапанах является возникновение кавитации вследствие сильного локального падения давления в областях клетки, что приводит к ее механическому разрушению и непрогнозируемым характеристикам течения внутри. В рамках данной работы предлагается с помощью методов вычислительной гидродинамики и машинного обучения решить параметрическую задачу по поиску оптимальной геометрии клетки клапана, позволяющей поддерживать докавитационные режимы течения в рабочем диапазоне входного давления и расхода скорости.

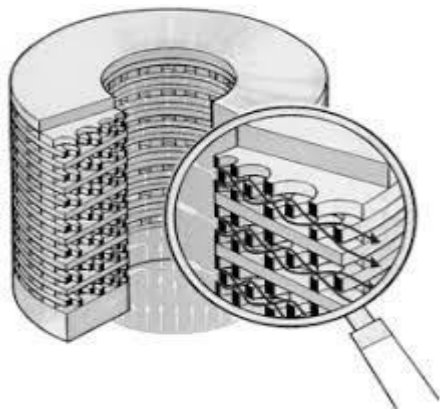


Рис. 1 Характерный внешний вид клетки клапана.

Рассматривается влияние геометрии клетки клапана на характеристики течения на примере некоторой модельной задачи (см. рис. 2), которая является прототипом структуры реальной клетки клапана и представляет собой круглую трубу, через которую подается поток воды при заданной разнице давлений, и попадает в область, состоящую из двух рядов цилиндров различного радиуса. В результате выполнения проекта будет получена база данных численного моделирования для различных параметров геометрии, которая далее будет использоваться для обучения нейросети, выступающей в роли суррогатной модели.

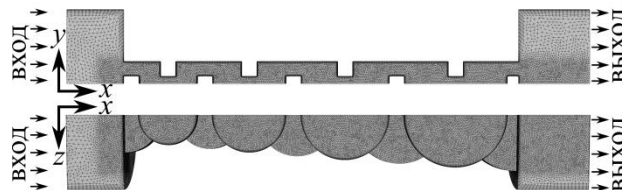


Рис. 2 Геометрия модельной задачи

Для создания базы данных для обучения нейросети решаются уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS, от англ. “Reynolds-Averaged Navier-Stokes”), вместе с транспортным уравнением на коэффициент объемного паросодержания (при помощи модели Шнеллера-Сауэра [1]) и уравнением неразрывности. Все вычисления проводятся с помощью открытого кода OpenFOAM, основанного на методе конечных объемов (FVM, от англ. Finite volume method). Для подготовки суррогатной модели будет подобрана архитектура нейронной сети, которая позволит с хорошей точностью предсказывать по параметрам численного эксперимента необходимые показатели. Т.к. входные и выходные данные представляют собой набор независимых параметров, то для этой задачи подойдет полносвязная нейронная сеть или ее модификация, например, самонормирующаяся нейронная сеть [3]. Для решения задачи оптимизации параметров будет проведена проверка работы нескольких алгоритмов глубокого обучения с подкреплением (DRL), например, Proximal Policy Optimization [4] или Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient [5], а также алгоритмов, не использующих нейронные сети, таких как SNOPT [6], и проведено сравнение получаемых результатов.

Список литературы

1. Schnerr G. H., Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics // Fourth international conference on multiphase flow. ICMF New Orleans. 2001. Т. 1.
2. Сайт проекта OpenFOAM. Available at <http://www.openfoam.com>, 2004.
3. Klambauer G., Unterthiner T., Mayr A., Hochreiter S. Self-Normalizing Neural Networks // NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. 2017 С. 972–981
4. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal Policy Optimization Algorithms // arXiv - 2017.
5. Fujimoto S., van Hoof H., Meger D. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods // arXiv - 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.09477>
6. Gill P. E., Murray W., Saunders M. A. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization // Society for Industrial and Applied Mathematics 2006. Т. 47 №. 1. СС. 99-131.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

РАСПЫЛ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ И НЕГОРЮЧИХ ЖИДКОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА

Калтаев А.Ж.¹, Ларионов К.Б.^{1,2}, Губин В.Е.¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

e-mail: kaltaevalbert@gmail.com

В связи с ростом цен на газовые и жидкие теплоносители возрастает интерес к объектам малой и средней энергетики на угле и нетрадиционных топливах [1]. К нетрадиционным топливам можно отнести продукты термической конверсии углеродосодержащих материалов. В частности, в процессе пиролиза образуются жидкие отходы. Эти отходы представляют из себя негорючие продукты пиролиза, называемые подсмольной водой. Сжигание подсмольной воды является эффективным решением ввиду относительной простоты и отсутствию токсичных или загрязняющих жидких веществ [2]. Однако ее прямое сжигание является экономически нецелесообразным решением ввиду малой теплотворной способности [2]. Утилизируют подсмольную воду в составе с жидким или твердым топливом. В качестве твердого топлива применяются различные марки каменных, бурых углей и их отходов [3,4]. Отходы угля, называемые фильтр-кек получают в процессе флотации углей [5]. Фильтр-кек и подсмольную воду можно утилизировать как водоугольную суспензию (ВУС) для большей эффективности. Важно отметить, что такая смесь практически не будет иметь стоимости, что хорошо подходит для объектов малой энергетики. Для таких суспензий важными являются ряд характеристик таких как гранулометрический состав, содержание твердой фазы, вязкость, стабильность и водородный показатель из-за наличия подсмольной воды. Для получения наибольшей теплотворной способности стремятся к увеличению твердой фазы, что значительно увеличивает вязкость. Высокое значение вязкости приводит к ухудшению распыления, образования крупных агломератов топлива и появлению отложений на устройстве распыления в камере сгорания [6]. Следовательно, вязкость топлива напрямую влияет на качество его распыления и на эффективность сжигания [7].

Целью работы является обоснование эффективно-го использования водоугольных суспензий на основе отходов угля – фильтр-кек - и негорючих продуктов пиролиза по результатам экспериментальных исследований характеристик распыления.

Распыление проводилось на лабораторном стенде цилиндрической формы диаметром 2 м и длиной 6 м (рис.1). Подача водоугольной суспензии осуществлялась из бака запаса топлива при помощи насоса с пневматическим приводом Yamada NDP15. Распыляющий агент (воздух) подавался компрессором на пневматическую форсунку с внутренним смешением и диаметром канала сопла 3 мм. Расход смеси составил 0,015 кг/с при давлении 0,3 МПа.

Подсветка распыляемого потока топлива выполнялась лазерным ножом, ориентированным по оси факела. Регистрация структуры установившегося потока распыляемых топливных суспензий и скорости капель выполнялась методом PIV (Particle Image

Velocimetry, метод цифровой трассерной визуализации). Принцип данного метода заключается в том, что происходит захват двух изображений с определенной задержкой. Скорость капель определяется путем деления полученного смещения на известное время движения. Так же определялась плотность, динамическая вязкость и стабильность смесей.



Рис. 1. Лабораторный стенд.

Концентрация подсмольной воды изменялась от 5 до 50% т.е. до полного замещения технической воды. Для каждого состава была проведена серия из 5 экспериментов. Обработка осуществлялась с использованием общего распределения капель на всех изображениях, нормализованного к общему количеству идентифицированных капель. Стоит отметить отсутствие относительно больших капель свыше 400 мкм и преобладание мелких капель в диапазоне от 100 до 200 мкм. Так же стоит отметить, что значительная замена технической воды на подсмольную значительно увеличивает динамическую вязкость и затрудняет её распыление.

Список литературы

1. Edianto A., Trencher G., Matsubae K. Why do some countries receive more international financing for coal-fired power plants than renewables? Influencing factors in 23 countries // *Energy Sustain. Dev.* 2022. Vol. 66. P. 177–188.
2. Lariонов К.Б. et al. Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel // *Int. J. Energy Res.* 2021. Vol. 45, № 10. P. 14895–14909.
3. Valiullin T.R. et al. Ignition of fuel based on filter cake // *Coke Chem.* 2017. Vol. 60, № 3. P. 127–132.
4. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A. V. The effect of water phase content in coal-water fuel on regularities of the fuel ignition and combustion // *Fuel Process. Technol.* Elsevier, 2019. Vol. 191. P. 129–137.
5. Novak V.I. Cake issue in coal preparation plants. who is to blame and what to do? // *Ugol'*. 2016. № 10. P. 70–73.
6. Kalam M., Masjuki H. Biodiesel from palmoil—an analysis of its properties and potential // *Biomass and Bioenergy.* 2002. Vol. 23, № 6. P. 471–479.
7. Rahimi S., Durban D., Khosid S. Wall friction effects and viscosity reduction of gel propellants in conical extrusion // *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 2010. Vol. 165, № 13–14. P. 782–792.

Работа выполнена в рамках проекта № FZES-2021-0008

ВНУТРЕННЯЯ КОНВЕКЦИЯ В МУЛЬТИСЛОЙНОЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ТОНКИМИ ПРОСЛОЙКАМИ ВОЗДУХА

Колчанова Е.А., Колчанов Н.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: kolchanovaea@gmail.com

В работе изучается возбуждение внутренней тепловой конвекции в многослойной пористой системе с воздушными прослойками, находящейся в поле силы тяжести. Система состоит в общем случае из N тепло выделяющих пористых субслоев, разделенных $(N-1)$ тонкими воздушными субслоями. Внешние границы системы являются непроницаемыми и идеально теплопроводными. Они имеют одинаковые температуры. Объемная мощность тепло выделения линейно зависит от доли твердой фазы. Пористые субслои имеют одинаковую эффективную теплопроводность, долю твердой фазы и толщину. Проницаемость верхнего пористого субслоя K_N отличается от проницаемости K_1 остальных, расположенных ниже, субслоев в меру параметра $K_{rN}=K_N/K_1$. Фундаментальная проблема в такой постановке, насколько известно авторам, исследуется впервые [1–4]. Она имеет широкий спектр приложений в различных технологических и природных процессах, в том числе и сельском хозяйстве. Для предотвращения перегрева биологически активной продукции, способной выделять тепло, необходимо управлять теплопереносом. Эффективным механизмом управления является конвекция. В исследовании мы определяем, как добавление прослоек воздуха может повлиять на порог возбуждения конвективного движения в пористой среде.

Рассматривается случай тонких воздушных прослоек, когда численно находится решение уравнений конвекции в приближении Буссинеска в каждом из N пористых субслоев с учетом эффективных условий на границе раздела воздух–пористая среда. Эти условия содержат два параметра: $\varepsilon=d^3/(12Da)$ и $\zeta=kd$, где d – толщина воздушной прослойки, Da – число Дарси, k – отношение теплопроводности пористого субслоя к теплопроводности воздуха. На рис. 1 представлены зависимости порогового внутреннего числа Рэлея–Дарси Ra_{m*} и критического волнового числа k_* конвективных структур, формирующихся вблизи порога устойчивости равновесия воздуха в системе, от отношения проницаемостей K_{rN} при $\zeta=0.1$ и различном значении параметра ε . Численные данные приводятся для числа пористых субслоев $N=5$ (штриховые линии) и $N=10$ (сплошные линии). Видно, что при фиксированном N рост параметра прослойки ε понижает порог возбуждения конвекции. Зависимости $Ra_{m*}(K_{rN})$ и $k_*(K_{rN})$ имеют изломы, связанные со сменой вида конвективного режима: с крупномасштабного на локальный. Крупномасштабное течение охватывает всю верхнюю половину системы, где воздух неустойчиво стратифицирован по плотности. Такая стратификация образуется при наличии внутреннего тепло выделения в пористых субслоях. Локальное конвективное течение возникает в пределах верхнего высокопроницаемого пористого субслоя, слабо проникая в нижние субслои.

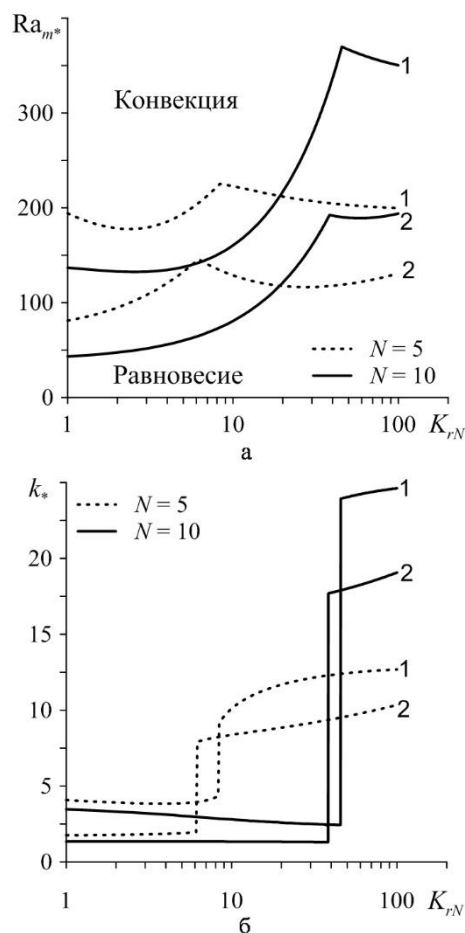


Рис. 1. Зависимости порогового внутреннего числа Рэлея–Дарси (а) и критического волнового числа (б) от отношения проницаемостей при значении параметра ε : 1 – 0,1; 2 – 10, для разного числа пористых субслоев N .

Список литературы

- Shalbf S., Noghrehabadi A., Assari M.R., Dezfuli A.D. Linear stability of natural convection in a multilayer system of fluid and porous layers with internal heat sources // *Acta Mech.* 2013. V. 224. P. 1103–1114.
- Kuznetsov A.V., Nield D.A. The effect of strong heterogeneity on the onset of convection induced by internal heating in a porous medium: A layered model // *Transp. Porous Med.* 2013. V. 99. P. 85–100.
- Lisboa K.M., Su J., Cotta R.M. Single domain integral transform analysis of natural convection in cavities partially filled with heat generating porous medium // *Numerical heat transfer. Part A.* 2018. <https://doi.org/10.1080/10407782.2018.1511141>
- Kolchanova E., Kolchanov N. Onset of internal convection in superposed air-porous layer with heat source depending on solid volume fraction: influence of different modeling // *Acta Mech.* 2022. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03204-8>

Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЕЙ ТЕЙЛОРА В КВАДРАТНОМ МИНИКАНАЛЕ

Лукьянов А.А.^{1,2}, Роньшин Ф.В.^{1,2}, Вожаков И.С.^{1,2}¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск²Новосибирский государственный университет

e-mail: a.lukyanov1@g.nsu.ru

В современном мире нарастает потребность в эффективном рассеивании более высоких тепловых потоков, что стимулирует развитие новых подходов к охлаждению. В настоящее время одним из эффективных теплоотводящих устройств является пульсационная тепловая трубка (РНР), разработанная в начале 1990-х годов как альтернативная модель тепловой трубы [1]. РНР стала многообещающим началом развития миниатюрных охлаждающих систем.

В пульсационной трубе тепло переносится от испарителя к конденсатору с помощью паровых пузырей или пузырей Тейлора. Режим Тейлора характеризуется движением пузырьков газа, диаметр которых сравним с диаметром канала, а длина превышает его. Пузырьки отделены друг от друга жидкостными пробками, а от стенки тонкой пленкой жидкости.

В литературе имеется множество исследований, в которых изучается поведение потока Тейлора, состоящего не из паровых пузырей, а из газовых [2]. Таким образом моделируется структура потока РНР, но без тепловых эффектов. Исследование теплопередачи в потоке пузырьков Тейлора, состоящих из неконденсируемого газа, показало его способность улучшать теплопередачу. Пузырьки Тейлора возмущают поле скорости внутри пробок, вызывая рециркуляцию, что увеличивает локальный перенос массы, импульса и энергии по сравнению с однофазным потоком. Экспериментальное выполнение точных измерений в потоке затруднено. В этом случае численное моделирование дает возможность получить данные о тех параметрах, которые не поддаются измерению.

Численное моделирование пузырей Тейлора осложняется тем, что толщина пленки намного меньше характерных размеров пузыря. Тем не менее, достаточное разрешение пленки жидкости является необходимым условием к корректному моделированию [3]. Когда инерционные эффекты значительны, форма пузыря претерпевает значительные деформации. В это время тонкий слой жидкости также значительно деформируется и требования к сетке еще больше усиливаются.

В данной работе численное моделирование проводилось на основе открытого программного кода OpenFOAM с использованием одного из основных решателей compressibleInterFoam. Его можно применять для решения течений для несжимаемых сред при условии постоянного значения плотности фаз, что справедливо для рассматриваемых потоков. Кро-

ме того, использование этого решателя позволяет провести моделирование теплообмена со стенкой.

Проведено экспериментальное и численное исследование пузырей Тейлора в квадратном миниканале со стороной 1 мм и длиной 10 мм для различных расходных скоростей жидкости и газа, свойства которых соответствуют воде и воздуху. Расходная скорость жидкости варьируется от 0,05 до 0,5 м/с. Показано, что измеренные в эксперименте параметры соответствуют таковым, полученным при численном моделировании. Получены подробные характеристики течения при развитом движении серии пузырей Тейлора для чисел Рейнольдса и капиллярного числа в диапазонах 100–1200 и 6×10^{-4} – 8×10^{-3} соответственно.

Измерения толщины пленки жидкости в расчете проводились в той области, где наблюдается постоянная толщина пленки. При малых скоростях пузыря, эта область занимает почти всю длину пузыря. По мере того, как скорость увеличивается область постоянной толщины становится короче. Вблизи хвоста начинают проявляться колебания, амплитуда которых увеличивается с ростом скорости. В то же время длина переходной зоны между носом пузырька и пленкой постоянной толщины увеличивается с увеличением капиллярного числа, и этот эффект становится более заметным при высоких числах Рейнольдса.

Для подробного исследования течения в жидкой пленке была использована подробная сетка, которая сгущалась к стенке, тем самым позволяя разрешить мелкие детали в структуре течения. Показано, что измеренная толщина пленки жидкости вокруг пузыря согласуется с теоретическими предсказаниями теорий Бретертон и Аквила и Куера [4]. Размер ячеек в сетке таков, что в области наименьшей толщины пленки жидкости попадает до 10 ячеек.

Список литературы

1. H. Akachi, Pulsating heat pipes // in: Proceedings 5th International Heat Pipe Symp., 1996, 199
2. R. Gupta, D. Fletcher, B. Haynes, Taylor flow in microchannels: a review of experimental and computational work // The Journal of Computational Multiphase Flows 2 (1) (2010) 1–31.
3. R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes, On the cfd modelling of taylor flow in microchannels // Chemical Engineering Science 64 (12) (2009) 2941–2950
4. F. P. Bretherton, The motion of long bubbles in tubes // Journal of Fluid Mechanics 10 (2) (1961) 166–188

*Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-10357)*

УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОРОДНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЫНОСА ПРИМЕСИ ПУЛЬСАЦИОННЫМ ПОТОКОМ ИЗ ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИИ

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: bmaryshev@mail.ru, lyudmilaklimenko@gmail.com

Решена задача о выносе примеси пульсационным потоком из прямоугольной области пористой среды с учетом влияния гравитации. Перепад концентраций между верхней и нижней границами области предполагается постоянным. На боковых границах ставится условие свободного выхода примеси. Скорость фильтрации через верхнюю и нижнюю границы предполагается равной нулю. На боковых границах задается скорость фильтрации. Задача решается в приближении Дарси-Буссинеска [1] транспорт примеси описывается в рамках нелинейной МММ модели с учетом закупорки [2]. Такая постановка задачи в случае нулевого заданного потока полностью аналогична задаче о конвекции в горизонтальном слое пористой среды [3] поскольку граничные условия идентичны условиям на границе одной конвективной ячейки. С той разницей, что теперь в область должно попадать целое количество конвективных ячеек, т.е. зависимость критических параметров от волнового числа остается той же, но спектр волновых чисел становится дискретным. При наличии потока эта симметрия теряется. В бесконечном слое наличие колебательной неустойчивости в присутствии потока связано со сносом конвективных ячеек вдоль слоя. Поскольку структура периодична в пространстве и сносится с постоянной скоростью, то находясь в неподвижной системе отсчета, наблюдатель видит колебания концентрации в заданной точке. В ограниченной области такое явление невозможно ввиду наличия стенок и граничных условий на них.

Описанная выше особенность связана с возникновением конвективной неустойчивости в рассматриваемой задаче, основное состояние, описывающее однородную пульсационную фильтрацию, остается неизменным и дается решением, описанным в [3]. Эффективность выноса примеси в основном состоянии повышается, прежде всего, с увеличением интенсивности прокачки, так как равновесное распределение концентрации не зависит от скорости прокачки, а поток примеси пропорционален интенсивности.

Исследована устойчивость основного состояния. Построены нейтральные кривые и карты устойчивости режима однородной пульсационной фильтрации в пространстве параметров системы. Показано, что возникает две моды возмущений колебательная и монотонная. Для достаточно узких областей, где отношение вертикального размера рассматриваемой области к горизонтальному, меньше или порядка 10 наиболее опасной является монотонная мода неустойчивости, по причинам описанным выше. В случае длинной области наиболее опасной становится колебательная мода, поскольку для центральной части длинной области должен выполняться предельный переход к бесконечному слою.

Показано, что пульсации потока в случае узких областей приводят к повышению устойчивости, возмущающие возмущение всегда синхронны и возможность управления ими ограничена. В случае длинных областей наблюдается параметрическое возбуждение неустойчивости. Так зависимости критического значения числа Релея-Дарси от частоты представляют собой характерные «мешки». При этом у границы устойчивости выше порога всегда наблюдаются субгармонические или синхронные возмущения. Самый первый «мешок» соответствует субгармоническим колебаниям, тип возмущений чередуется. В этом случае возможности управления интенсивностью и частотой пульсаций концентрационного поля намного шире, чем в случае отсутствия пульсаций.

Список литературы

1. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. – New York: Springer, 2006. p.640.
2. Van Genuchten M. T., Wierenga P. J. Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions 1 //Soil science society of america journal. – 1976. – Т. 40. – №. 4. – С. 473–480.
3. Maryshev B. S., Klimenko L. S. Solutal convection in a horizontal porous layer with clogging at a high solute concentration //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1809. – №. 1. – С. 012009.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 20-11-20125)*

НЕУПРУГОЕ СТОЛКНОВЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СОЛИТОНОВ В ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЕ

Огородников И.А.

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

e-mail: igoro47@yandex.ru

Взаимодействие солитонов исследуются на базе нелинейных волновых уравнений Кортевега де Вриза (КдВ), нелинейного Шредингера и ряда других аналогичных уравнений [1]. Эти уравнения применимы к слабо нелинейным процессам. Взаимодействия солитонов в этих уравнениях являются упругими. Эти уравнения описывают только волновые поля и не описывают изменение параметров среды. Для процессов с большой интенсивностью полей в [2] предложена и верифицирована волновая модель, описывающая и волновые поля, и изменение параметров среды. Там же введено новое понятие «резонансный солитон». Сформулированы его отличия от солитонов КдВ.

Целью работы является определение характеристик взаимодействия резонансных солитонов большой амплитуды при встречном столкновении.

Постановка задачи. Часть пространства в воде заполнено пузырьками. Границы раздела пузырьковой среды и жидкости плоские. На эти границы из чистой воды падают два одинаковых звуковых импульса. Внутри пузырьковой среды формируются резонансные солитоны, которые движутся навстречу друг другу. Исследуются структуры волнового поля и среды.

Для расчетов использовалась нелинейная волновая система уравнений [2] в одномерной постановке. Амплитуда возбуждающих импульсов $P_0 = 0.3 \text{ МПа}$. В безразмерном виде амплитуда равна 1. Длительность импульсов выбиралась из условия, чтобы в пузырьковой среде сформировались два солитона, а энергетические параметры звуковых предвестников и динамического возбуждения пузырьковой среды около границ имели минимальное значение. Пространственный размер среды выбран так, чтобы столкновение солитонов произошло в невозмущенной зоне.

На рис. 1 в безразмерном виде приведена структура волнового поля в виде резонансного солитона (1), значений радиуса пузырьков в поле солитона (2) и зоны возбуждения (3) до перехода через границу раздела сред. Стрелки указывают направление движения солитона.

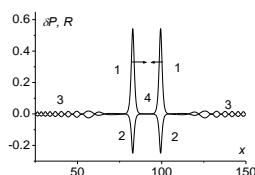


Рис.1. Пространственная структура волнового поля и радиусов пузырьков до столкновения солитонов.

Скорость движения фронта возбуждения составляет $0.72U$, где U скорость резонансного солитона. До взаимодействия амплитуда солитонов равна 0.58 . Минимальное значение радиуса в центре солитона равно $0.84R_0$. Энергия каждого солитона до взаимодействия $E = 0.18 \text{ J}$, а суммарная энергия звуковых предвестников в пространстве между ними (4) $E = 9.3e-08 \text{ J}$. Поэтому столкновение происходит в слабо возмущенной среде.

На рис. 2 а) представлена структура волнового поля в момент суперпозиции солитонов. Полная энергия объединения равна сумме энергий двух резонансных солитонов до столкновения 0.36 J . Его амплитуда равна 1.77 , что в 3 раза больше амплитуд солитонов до столкновения, а радиус при максимальном сжатии равен $0.62R_0$. На рис. 2 б) представлена структура волнового поля после взаимодействия, когда расстояние между солитонами равно ширине солитона в основании. В волновом поле возникают два дополнительных структурных элемента. Звуковые предвестники (4), излучаемые из зоны взаимодействия и пространство между солитонами (5), которое представляет собой динамический резонатор, границами которого являются солитоны. Когда солитоны расходятся на большое расстояние, амплитуды солитонов уменьшаются до 0.44 , радиус $0.89 R_0$. Энергия солитонов $E = 0.17 \text{ J}$.

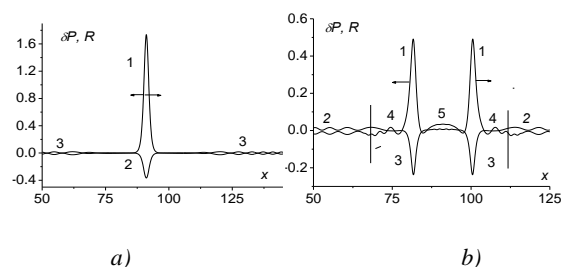


Рис.2. Пространственная структура волнового поля и радиусов пузырьков в момент столкновения а) и после столкновения солитонов б).

Список литературы

1. Е.Г. Диденкулова, А.В. Кокорина, А.В. Слюняев Численное моделирование газа солитонов в рамках уравнений типа Кортевега де Вриза // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 2. С. 52–66. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.2.005.
2. И.А. Огородников, В.Ю. Бородулин. Микроскопическая модель динамики гетерогенной среды. Взаимодействие акустических волн с пузырьковыми слоями// Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С.70–81.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО КОНДЕНСАТОРА

Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Гришаев Д.А., Кулагин В.А.

Сибирский федеральный университет

e-mail: ARadzyuk@sfu-kras.ru

В последние годы кавитационные технологии находят широкое применение в области интенсификации большого числа технологических процессов промышленных производств.

Несмотря на очевидность всех преимуществ использования кавитационных процессов для конденсации пара до настоящего времени отсутствуют аппараты, созданные на этой основе. Это связано в том числе с отсутствием достаточного количества исследований в данной области. Целью описываемых работ было определение факторов, ограничивающих производительность процесса конденсации пара в зоне замыкания кавитационной каверны.

Широкое применение кавитационных разработок сопровождается их всесторонним экспериментальным изучением.

Использованная экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур (см. рис. 1). Движение жидкости осуществляется центробежным насосом, поток выравнивается, проходя через хонейкомб длиной 300 мм, представляющий собой набор трубок меньшего диаметра, поступает в рабочий участок и далее снова в насос. Рабочий участок состоит из конфузора, прозрачной цилиндрической трубы ($d_{\text{внутр.}}=30$ мм, $l=450$ мм) с установленным в ней сопротивлением в виде усеченного конуса. В основании конуса имеется отверстие диаметром 5 мм, соединенное с выведенной наружу трубкой. Для управления температурой эксперимента установка имеет нагревательный элемент, установленный непосредственно в потоке, мощностью 9 кВт. Для поддержания заданной температуры нагревательный элемент подключен через термостат. Описываемые результаты получены при обтекании конуса диаметром 27,75 мм. Режим течения в установке обеспечивал формирования за конусом суперкаверны длиной 350 мм.

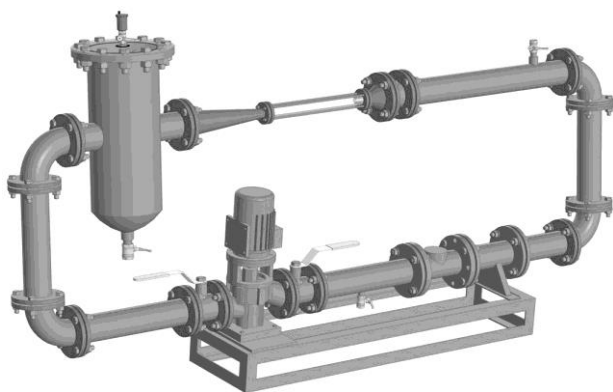


Рис. 1. Использованная экспериментальная гидродинамическая установка.

Для подтверждения предположения от том, что количество отбираемого из каверны пара должно быть равно количеству пара, передаваемого в каверну извне был поставлен соответствующий эксперимент. В качестве парогенератора использована емкость с водой, помещенная в термостат. Количество пара, сконденсировавшегося в каверне, определялось по убыли массы воды в емкости. В результате эксперимента получена зависимость количества пара, переданного из парогенератора в кавитационную каверну от температуры (см. рис. 2).

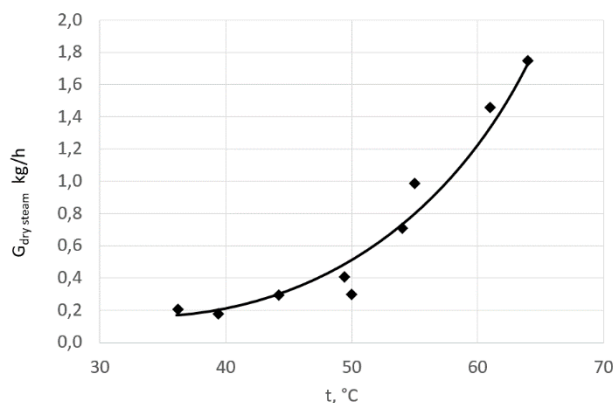


Рис. 2. Количество сконденсировавшегося в каверне пара через паропровод диаметром 5 мм.

Вычисленные скорости пара в паропроводе укладываются на прямую, параллельную зависимости скорости звука в паре от температуры (см. рис. 3).

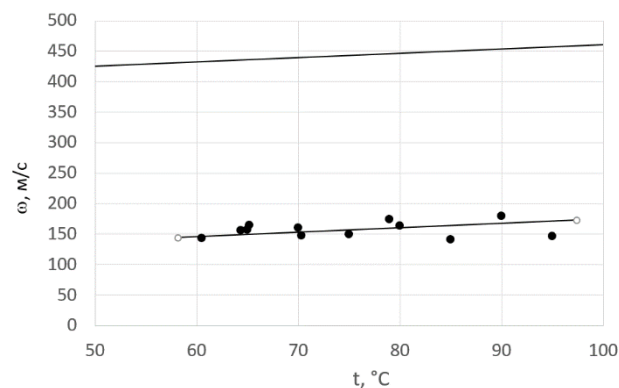


Рис. 3. Скорость пара в паропроводе: верхняя линия – скорость звука в паре.

Полученные результаты подтверждают возможность использовать кавитационные явления для организации процесса конденсации пара. Параметром, ограничивающим производительность кавитационного конденсатора в проведенных экспериментах, являлась скорость пара в паропроводе.

ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ НАСЫЩЕННОЙ МНОГОФАЗНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Роменский Е.И.¹, Решетова Г.В.², Пешков И.М.³

¹ Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

³ Университет Тренто, Тренто, Италия

e-mail: evrom@math.nsc.ru

Обсуждается новый подход для моделирования насыщенной деформируемой пористой среды, рассматриваемой как многофазная смесь, представленный в [1–5] и основанный на теории Симметрических Гиперболических Термодинамически Согласованных (СГТС) систем. Известно, что многие уравнения моделей механики сплошных сред входят в класс СГТС систем. Более того, теория СГТС уравнений может быть использована как инструмент для разработки новых корректных математических моделей сложных сред. Описание и приложения этой теории можно найти, в частности, в [6] и имеющихся там библиографических ссылках.

Представленная модель учитывает конечные деформации пористой среды, насыщенной смесью сжимаемых жидкостей и газов. Кроме этого, сформулированная СГТС модель позволяет учитывать вязкость насыщающих жидкостей и неупругие деформации пористого скелета. Определяющие дифференциальные уравнения удовлетворяют законам неравновесной термодинамики (закон сохранения энергии и закон возрастания энтропии) и могут быть приведены к виду симметрической гиперболической системы. Диссипативные процессы, такие как выравнивание давлений фаз к общему значению и межфазное трение, учитываются алгебраическими релаксационными членами уравнений.

Структура определяющих уравнений, включающих уравнения для объемных долей фаз, позволяет применять метод диффузных границ для моделирования процессов в области с включениями чистой упругой среды или чистой жидкости. В этом случае межфазная граница моделируется скачком объемной концентрации.

Сформулированы линеаризованные уравнения модели для расчета распространения волн малой амплитуды в насыщенной пористой среде. Для упругой пористой среды, насыщенной одной жидкостью, проанализированы свойства волновых полей и проведено сравнение с теорией Био, общепринятой в геофизике. Выписано дисперсионное соотношение, исследовано влияние вязкости насыщающей жидкости на характер распространения волн.

Для демонстрации возможностей модели представлен ряд численных примеров, рассчитанных с помощью конечно-разностной схемы на сдвинутых сетках. Проведен расчет волновых полей, генерируе-

мых импульсом Рикера в однородной среде, насыщенной одной жидкостью, для различных пористостей и частот и проведено сравнение с теоретическими решениями. Решена серия задач распространения волн в слоистых средах. Рассмотрены задачи расчета волновых полей в упругой среде, насыщенной смесью жидкости и газа, продемонстрировано существенное влияние объемной доли газа на скорости и амплитуды быстрой и медленной волн сжатия.

Отметим, что в простейшей СГТС модели упругой пористой среды, насыщенной одной сжимаемой жидкостью, изучение свойств распространения волн малой амплитуды дает физически корректные результаты, близкие к полученным с помощью модели Био. Следует подчеркнуть, что модель Био, по сути, линейна, и нам неизвестно ее обобщение на случай конечных деформаций, в то время как СГТС модель описывает конечные деформации среды.

Представленная СГТС модель, на наш взгляд, может служить основой для разработки новых подходов к изучению нелинейных процессов при рассмотрении конечных деформаций насыщенных пористых сред сложной реологии.

Список литературы

1. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I., Dumbser M. Modeling wavefields in saturated elastic porous media based on thermodynamically compatible system theory for multiphase mixtures // *Computers & Fluids*, 2020. V. 206, P. 104587.
2. Reshetova G., Romenski E. Diffuse interface approach to modeling wavefields in a saturated porous medium // *Applied Mathematics and Computation*, 2021. V. 398, P. 125978.
3. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I. Computational model for compressible two-phase flow in deformed porous medium // In: O. Gervasi, et al. *Computational Science and its Applications – ICCSA 2021. ICCSA 2021. Lecture Notes in Computer Sciences*. V. 12949, Springer, Cham, 2021. P. 224–236.
4. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I. Thermodynamically compatible hyperbolic model of a compressible multiphase flow in a deformable porous medium and its application to wavefields modeling // *AIP Conference Proceedings*, 2021. V. 2448, P. 020019.
5. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I. Two-phase hyperbolic model for porous media saturated with a viscous fluid and its application to wavefields simulation // *Applied Mathematical Modeling*, 2022. V. 106, P. 567–600.
6. Peshkov I., Pavelka M., Romenski E., Grmela M. Continuum mechanics and thermodynamics in the Hamilton and the Godunov-type formulations // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2018. V. 30, P. 1343–1378.

*Работа поддержана Российским научным фондом
(грант № 19-77-20004)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКИХ СРЕДАХ, НАХОДЯЩИХСЯ В НЕУСТОЙЧИВЫХ СОСТОЯНИЯХ

Рютин С.Б.¹, Игольников А.А.^{1,2}, Мелких А.В.²

¹ Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург

e-mail: ryutin.sergey@gmail.com

Исследование различными методами теплообмена высокой интенсивности в сложных жидких средах, к которому мы будем относить область изменения плотностей теплового потока в диапазоне 1...20 МВт/м², представляет интерес в практическом плане. Действительно, оно связано с поиском возможностей интенсификации теплообмена, которые могут в перспективе стать основой новых практических решений в этой области.

В настоящее время мы располагаем экспериментальной установкой, позволяющей проводить опыты по импульсному нагреву проволочного зонда, погруженного в исследуемую среду, при строго заданных условиях тепловыделения в зонде. Развита система формирования параметров теплового воздействия и регистрации первичных данных позволяет гибко настраивать режимы тепловыделения в зонде, в зависимости от поставленной задачи эксперимента. Фиксация условий тепловыделения в зонде в серии опытов позволяет осуществить изучение изменения наблюдаемых картин теплообмена зонда со средой, в которую он помещен, в зависимости от изменения внешнего параметра опыта (давление, изменение состава и т.п.). Опыты проводятся строго в однократном режиме. Таким образом, речь идет об изучении нестационарного теплообмена с довольно высокими значениями плотности теплового потока [1, 2].

Экспериментальная установка является уникальной и не имеющей аналогов в мире, позволяя реализовывать режимы нагрева проволочного зонда, которые невозможно получить никаким другим способом. Сильной стороной методики является высокое быстродействие, базирующееся на сравнительно малом времени тепловой релаксации примененного зонда. В качестве зонда применена платиновая проволока диаметром 20 мкм и длиной порядка 1 см. Зонд является одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Малый диаметр зонда обуславливает малое время тепловой релаксации (≈ 1 мс), что обеспечивает быструю реакцию на изменения условий теплообмена зонда с исследуемой средой (фазовые переходы, изменение состава и т.п.), а малая поверхность зонда позволяет получать большие плотности теплового потока при небольших значениях электрической мощности, рассеиваемой в нем (единицы Вт).

В докладе будут представлены результаты опытов с двумя классами объектов, а именно, индивидуальными жидкостями в широком диапазоне сверхкритических параметров и растворами с нижней критической температурой растворения (НКТР). Начальное состояние вещества выбиралось в области его термодинамической устойчивости.

Из сверхкритических сред наиболее интересным объектом является сверхкритическая вода, которая предполагается в качестве теплоносителя в атомной энергетике 4-го поколения (Generation IV). В отношении сверхкритического теплообмена в воде был поставлен опыт по измерению энергии, затрачиваемой на нагрев пристеночного слоя в условиях, позволяющих полагать, что объем прогретого слоя практически одинаков при нагреве от стартовой температуры, до ряда значений температуры, специально заданных в опыте. Этот ряд включал как докритические, так и сверхкритические значения. Для корректной оценки искомых значений энергии, предварительно были проведены опыты в вакууме, для учета части энергии, затрачиваемой на нагрев самого зонда и отток тепла в токоподводы. Полученные в итоге результаты позволили получить в относительном виде изменение мгновенного коэффициента теплоотдачи от зонда к сверхкритической воде в широкой области температур и давлений. Полученные данные указывают, что стандартный выбор рабочего давления в концептах Generation IV (25 МПа) является неоптимальным [3, 4].

В опытах с водным раствором полипропиленгликоля (ППГ-425), имеющем НКТР, наиболее интересным оказался диапазон концентраций вблизи критической, порядка 30 объемных % ППГ-425 в воде. В этом случае осуществлен глубокий заход в область термодинамической неустойчивости, т.е. существенно выше спинодали расслаивания жидкость-жидкость. В опыте при этом наблюдается резкая интенсификация теплообмена, появление которой мы связываем именно со спинодальным распадом и включением микроконвекции в прогретом слое по типу эффекта Марангони, что совершенно нехарактерно для индивидуальных жидкостей [5].

Список литературы

1. Рютин С.Б. Установка для исследования нестационарного теплообмена в жидких средах // ПТЭ. 2021. № 5. С. 152–155.
2. Rutin S.B. Voltage-controlled precision electronic power regulator // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 124708.
3. Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V. Study of heat transfer to supercritical pressure water across a wide range of parameters in pulse heating experiments // Appl. Therm.Eng. 2022. V. 201. P. 117740.
4. Рютин С.Б., Скрипов П.В. Теплоперенос в сверхкритических флюидах: согласование результатов импульсных и стационарных опытов // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2.С. 203–211.
5. Skripov P.V., Igolnikov A.A., Rutin S.B., Melkikh A.V. Heat transfer by unstable solution having the lower critical solution temperature // Int. J. Heat Mass Transf. 2022. V. 184. P. 122290.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00115-П)*

КОНВЕКЦИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ ВОЗДУШНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЕ С ПРОНИЦАЕМЫМИ ГРАНИЦАМИ И ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА, ЗАВИСЯЩИМ ОТ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ

Сагитов Р.В., Колчанова Е.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: sagitovrv@mail.ru, kolchanovaea@gmail.com

В данной работе исследуется конвективная неустойчивость вертикального течения через двухслойную систему, образованную горизонтальным слоем воздуха, частично заполненным тепловыделяющей пористой матрицей, в поле силы тяжести. Среда сверху содержит подслоя воздуха, свободный от пористой матрицы, и снизу, насыщенный воздухом, гранулированный пористый подслоя, объемная мощность тепловыделения в котором пропорциональна объемной доле твердой фазы и мощности тепловыделения в твердой фазе. Система ограничена сверху и снизу твердыми проницаемыми для воздуха плоскостями, на которых поддерживаются одинаковые температуры. При этом через одну плоскость воздух однородно закачивается со скоростью, через – другую отсасывается с такой же скоростью.

Течение воздуха в двухслойной среде описывается уравнениями конвекции в приближении Буссинеска. Используется двухдоменная модель, в которой применяется уравнение Навье-Стокса в воздушном субслое и уравнение Дарси в пористом субслое.

Получены явные аналитические выражения для скорости, температуры и давления воздуха в основном состоянии. Исследование базовых тепловых профилей при различных значениях отношений толщин субслоев и разных значениях числа Пекле показало, что граница потенциально неустойчиво стратифицированной области в верхней части пористого тепловыделяющего субслоя, в которой возбуждается тепловая конвекция, смещается в направлении сквозного течения. Это означает, что восходящее сквозное течение, смещая нижнюю границу неустойчиво стратифицированной области к границе раздела субслоев, уменьшает ее размеры. Нисходящее течение, наоборот, приближая эту границу к нижней границе двухслойной системы, увеличивает размеры данной области. Причем, чем интенсивней сквозное течение или толще воздушный субслоя, тем сильнее сдвигается граница. С увеличением скорости наблюдается уменьшение температуры. При увеличении объемной доли твердого вещества в пористом субслое и увеличении толщины воздушной прослойки наблюдается увеличение температуры.

Исследование на устойчивость базисного решения относительно нормальных малых возмущений, периодических вдоль горизонтали, показало, что в зависимости от значения управляющих параметров наиболее опасными могут быть конвективные валы различных типов, соответствующие различным минимумам нейтральных кривых. Это или локальные валы, которые формируются в основном в пределах воздушного слоя, и их развитие практически не влияет на отвод тепла из пористого слоя, или круп-

номасштабные длинноволновые конвективные течения, которые охватывают оба слоя. Их развитие приведет к более эффективному отводу тепла из пористого субслоя.

В случае отсутствия воздушной прослойки порог возбуждения тепловой конвекции не зависит от доли твердой фазы и наблюдается неустойчивость сквозного течения относительно валов большой длины волны. При наличии воздушной прослойки над пористым слоем на зависимости критического внутреннего числа Релея-Дарси от числа Пекле имеется излом, обусловленный резкой сменой характера неустойчивости – с коротковолновой на длинноволновую – наблюдаемой при уменьшении чисел Пекле. Этот переход сопровождается разрывом кривой зависимости критического волнового числа от числа Пекле и скачкообразным уменьшением критического волнового числа в разы и десятки раз. На зависимости критического числа Релея-Дарси от числа Пекле имеется минимум, который с увеличением толщины воздушного субслоя или доли твердой фазы сдвигается в сторону малых по величине чисел Пекле. Когда неустойчивость обусловлена коротковолновыми возмущениями этот минимум находится в области положительных чисел Пекле, когда длинноволновыми возмущениями – в области отрицательных чисел Пекле. Анализ построенных зависимостей показал, что увеличение толщины воздушного субслоя или доли твердой фазы оказывает дестабилизирующее влияние на основное течение. Изучение зависимостей чисел Пекле, при которых происходит переход от локальной конвекции к крупномасштабной, от относительной толщины воздушной прослойки показало, что достаточно малой толщине воздушной прослойки граница между крупномасштабной и локальной конвекцией находится в области положительных чисел Пекле. С увеличением толщины воздушного слоя или доли твердой фазы граница смещается в сторону отрицательных чисел Пекле. В случае восходящего сквозного течения крупномасштабная конвекция может возникнуть только при достаточно малой толщине воздушного слоя. И чем сильнее течение, тем меньше должны быть эта толщина и доля твердой фазы. В случае относительно больших толщин воздушного субслоя крупномасштабная конвекция может реализоваться только при достаточно сильном нисходящем сквозном течении. Чем меньше толщина и объемная доля твердой фазы, тем меньшее число Пекле для этого требуется.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045>

ОБЪЕМНАЯ МОЩНОСТЬ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ВОЛОКНИСТОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Сидоров А.С., Колчанов Н.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

e-mail: sidorovaliksandr@mail.ru

В реальных пористых средах естественного или технологического происхождения могут протекать химические, биологические или механические процессы, которые приводят к локальным источникам тепла или тепловыделению во всем объеме пористой среды. Если при этом среда насыщена жидкостью или газом, то в ней возникнет дополнительный тепло-, массоперенос за счет конвекции [1–3].

В работе экспериментально исследуются характеристики и особенности внутреннего тепловыделения волокнистых пористых сред с низкой теплопроводностью. Для этого создавались пористые среды с заданными теплофизическими характеристиками, с возможностью управления мощностью тепловыделения. Для организации однородного объёмного тепловыделения волокна пористой среды изготавливались из тонкой нихромовой проволоки диаметром 0.09 мм. Для увеличения размера волокна на проволоку наносилось покрытие из органического стекла, толщиной до 0.9 мм. Вся пористая среда состояла из волокон, вплетенных в фотополимерный каркас, напечатанный на 3D принтере. Волокна соединялись в электрическую цепь и подключались к источнику тока. При протекании электрического тока волокна начинали изнутри разогревать пористую среду.

В экспериментах пористый образец помещается в рабочую полость, представленную на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из рабочей полости и следующих периферийных устройств: двух жидкостных термостатов, связанных с медными теплообменниками 5; устройства Термодат, обрабатывающего аналоговый сигнал термоэдс с медь-константановых термопар; источник постоянного тока, подключённый к образцу. Медные теплообменники 5 задавали постоянную температуру на границах пористой среды. Прослойка 6 из органического стекла с известной теплопроводностью (0.22 Вт/(м·К)) в совокупности с двумя дифференциальными термопарами позволяла рассчитать тепловой поток.

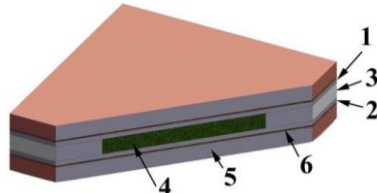


Рис. 1. Рабочая полость: 1 и 2 – верхняя и нижняя границы из дюралюминия; 3 – боковые границы из PLA пластика; 4 – место для образца; 5 – медный теплообменник с термостатирующей жидкостью; 6 – твердая прослойка из органического стекла.

Однородное тепловыделение по теоретическим расчётам в отсутствие конвекции приводит к установлению равновесного параболического профиля с максимумом температуры T_m в середине пористого слоя:

$$T(z) = T_0 + 4(T_m - T_0) \left(z/H - (z/H)^2 \right),$$

где T_0 – температуры на верхней и нижней границах пористого слоя, T_m – максимальная температура в центре слоя, $H = 13$ мм – толщина слоя. Изменяя мощность электрического тока на источнике питания, проводились измерения температуры T_m в центре пористого слоя для одинаковых температур T_0 на его границах. Объёмная мощность тепловыделения в пористом слое рассчитывалась по формуле

$$Q = 8\kappa_p (T_m - T_0) / H^2,$$

где κ_p – эффективная теплопроводность насыщенного воздухом пористого слоя. Получены линейные графики зависимости мощности тепловыделения Q от электрической мощности Q_s на единицу объёма тепловыделяющих волокон для трёх образцов (рис. 2). По графикам найдены значения эффективной объёмной доли твёрдой тепловыделяющей части, которая учитывает дополнительное тепловыделение, происходящее на фотополимерном каркасе.

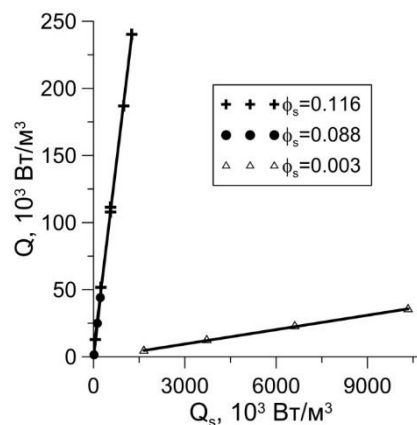


Рис. 2. Зависимость мощности тепловыделения на единицу всего объема пористой среды от электрической мощности тепловыделения на единицу объема тепловыделяющей части пористой среды для трех образцов с разной объемной долей твердой фазы: $\phi_s = 0.116$, при $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\phi_s = 0.088$, при $T_0 = 30^\circ\text{C}$, $\phi_s = 0.003$, при $T_0 = 30^\circ\text{C}$.

Список литературы

- Kulacki, F. A. and Freeman, R. G. A note on thermal convection in a saturated, heat generating porous layer // ASME J. Heat Transfer. 1979. V. 101. P. 169–171.
- S. Mukhija, A.K. Nayak Experimental study of transient heat transfer characteristics of single-phase natural convection in multidimensional porous bed with volumetric heat generation // Experimental Heat Transfer. 2019. V. 32. №1. P. 85–101.
- Kolchanova E., Kolchanov N. Onset of internal convection in superposed air-porous layer with heat source depending on solid volume fraction: influence of different modeling // Acta Mech. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03204-8>.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 21-71-10045, <https://rscf.ru/project/21-71-10045>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В КОНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

Субботин С.В., Карпунин И.Э., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

e-mail: subbotin_sv@pspu.ru

Экспериментально исследуется влияние внешнего статического поля на устойчивость осциллирующей границы раздела жидкостей в осесимметричной ячейке Хеле-Шоу. Кювета представляет собой коаксиальный конический слой постоянной толщины, заполненный двумя несмешивающимися жидкостями разной плотности с большим контрастом вязкостей. Ось симметрии кюветы ориентирована вертикально, при этом на границу раздела вдоль образующей конусов действует тангенциальная составляющая поля силы тяжести. Начальная форма границы раздела жидкостей имеет вид окружности (подобно рис. 1а, б). Толщина коаксиального зазора не меняется и составляет $h=2.0$ мм. В качестве рабочих жидкостей используются водные растворы соли NaI различных концентраций ($\rho_0 = 1.0-1.8$ г/см³) и силиконовое масло ПМС-1000, плотностью $\rho_0 = 0.96$ г/см³ и кинематической вязкостью $\nu_0 = 10$ Ст (при $t = 25^\circ\text{C}$). Кювета подключена к гидравлическому насосу, прокачивающему жидкости через канал по гармоническому закону. Для повышения оптического контраста границы раздела солевые растворы подкрашиваются пищевым красителем.

При включении вибраций линии контакта жидкостей с границами слоя остаются практически неподвижными. Колебания же совершает межфазная граница в виде «языка» маловязкой жидкости, направленного вдоль образующей линии канала. «Язык» не контактирует с твердыми границами щелевого зазора, а его фронт в докритической области сохраняет круговую форму.

При повышении амплитуды колебаний на межфазной границе пороговым образом развивается неустойчивость в виде системы азимутально-периодических структур (рис. 1в, г). Структуры появляются в процессе вытеснения вязкой жидкости из коаксиального зазора и достигают наибольшего развития в фазе максимального радиального смещения границы раздела. Механизм возникновения пальцеобразных структур связан с неустойчивостью Саффмана – Тейлора [1, 2]. На обратном ходе структуры уменьшаются в размере и в определенную фазу коле-

баний принимают вид пальцев, направленных к оси симметрии слоя. В фазе максимального сжатия структуры полностью исчезают, а межфазная граница снова принимает круговую форму. Как и в докритическом режиме, положение контактных линий практически не меняется в процессе колебаний и сохраняет первоначальное состояние.

С увеличением амплитуды длина пальцев увеличивается, при этом их положение и азимутальное волновое число может незначительно меняться. Повышение относительной плотности двух жидкостей оказывает стабилизирующее действие на границу раздела: пороги неустойчивостей смещаются в область более высоких амплитуд вибраций.

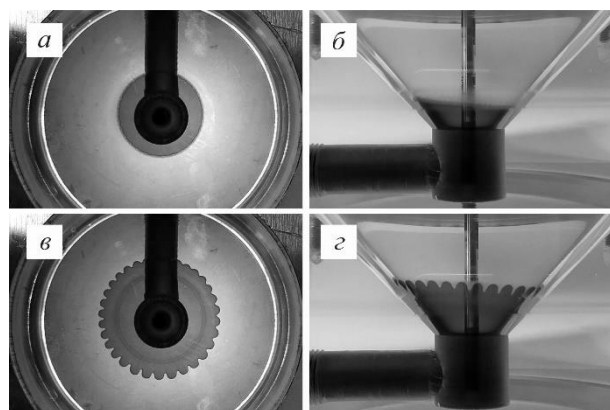


Рис. 1. Граница раздела двух несмешивающихся жидкостей в фазе максимального сжатия (а, б) и максимального расширения (в, г) при частоте $f = 4.0$ Гц и амплитуде колебаний границы $b = 7.2$ мм.

Список литературы

1. Saffman P.G., Taylor G.I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1958. V. 245, No. 1242. P. 312–329.
2. Kozlov V.G., Karpunin I.E., Kozlov N.V. Finger instability of oscillating liquid–liquid interface in radial Hele-Shaw cell // Phys. Fluids. 2020. V. 32, No. 10. P. 102102.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 20-41-596011)*

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА И ПОВЫШЕНИЯ КТП ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Суртаев А.С.^{1,2}, Сердюков В.С.^{1,2}, Малахов И.П.^{1,2}, Старинский С.В.¹, Сафонов А.И.^{1,2}, Kosar A.³

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

³ Sabanci University, Istanbul, Turkey

e-mail: surtaevas@gmail.com

Двухфазные системы с кипением жидкости в настоящий момент находят широкое применение в атомной энергетике, химической и криогенной промышленности, а также являются одними из наиболее перспективных методов для безопасного, надежного охлаждения и термостабилизации различных устройств, например, высокопроизводительных компьютерных чипов, электроники в космических аппаратах, электротранспорте и т.д. [1]. По этой причине проблема, связанная с повышением эффективности кипения в условиях возрастающих мощностей тепловыделения, стоит особо остро.

Одним из наиболее перспективных методов для интенсификации теплообмена и повышения критических тепловых потоков (КТП) при кипении является использование модифицированных на микро/наномасштабе поверхностей с различными свойствами смачивания.

В докладе будут представлены результаты исследование влияния супергидрофильных текстурированных с помощью лазера поверхностей с различной морфологией на локальные и интегральные характеристики теплообмена и развитие кризисных явления при кипении, а также влияние бифильных поверхностей на теплообмен и локальные характеристики кипения в области субатмосферных давлений.

В рамках исследований было подготовлено несколько образцов супергидрофильных поверхностей с различной морфологией с использованием Nd:YAG лазера и различных гармоник (1064 и 532 нм), а также бифильных поверхностей (рис.1). Подробное описание экспериментальной установки и методов исследований можно найти в работах [2,3].

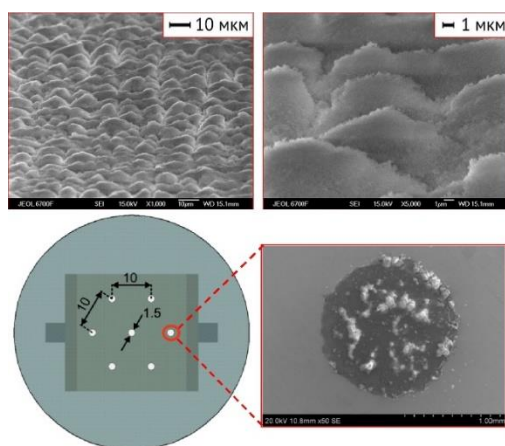


Рис. 1. SEM фотографии модифицированных лазером поверхностей и гидрофобного пятна бифильной поверхности.

В исследовании на основе анализа кривых кипения продемонстрировано, что использование моди-

фицированных с помощью лазера супергидрофильных поверхностей с различной морфологией и параметрами капиллярного впитывания приводит к значительному росту критического теплового потока. При этом наибольшее значение КТП ($q_{CHF} = 1,8 \text{ MW/m}^2$) достигается при использовании поверхности текстурированной лазером второй гармоники (532 нм). Анализ результатов показал, что величина критического теплового потока, в первую очередь, определяется капиллярным впитыванием и не зависит напрямую от статического угла смачивания и размера шероховатости. При этом результаты по КТП могут быть описаны в рамках модели, предложенной в [4].

Впервые изучено влияние бифильных поверхностей на локальные характеристики кипения и интенсивность теплообмена при кипении жидкости в области субатмосферных давлений (8-103 кПа). Показано, что зависимости локальных характеристик кипения, включая отрывные диаметры пузырей и частоты их отрыва, от давления при использовании бифильной поверхности значительно изменяются по сравнению с гидрофильными поверхностями. Изменение характера парообразования приводит к значительной интенсификации теплообмена на бифильной поверхности, особенно в области низких приведённых давлений. Более того снижение порога активации центров парообразования приводит к стабилизации процесса кипения в вакууме и заметному снижению флуктуаций температуры тепловыделяющей поверхности, что является крайне важным явлением с точки зрения практического применения бифильных поверхностей для разработки новых систем термостабилизации, в которых кипение теплоносителя осуществляется при пониженных давлениях [5].

Список литературы

1. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management// J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2013. V. 5. P. 021012.
2. Surtaev A. et al. Effect of subatmospheric pressures on heat transfer, vapor bubbles and dry spots evolution during water boiling// Exp. Therm. Fluid Sci. 2020. V. 112. P. 109974.
3. Serdyukov V. et al. Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer// Appl. Therm. Eng. 2021. V. 194. P. 117102.
4. Rahman M. et al. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces// Langmuir. 2014. V. 30. P. 11225–11234.
5. Serdyukov V. et al. Biphilic surface to improve and stabilize pool boiling in vacuum// Appl. Therm. Eng. 2022. V. 209. P. 118298.

Работа выполнена в рамках проектов РФФ (грант № 18-79-10119)

КОНВЕКЦИЯ В ТОНКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ТОЧЕЧНОМ НАГРЕВЕ

Егоров Р.И., Зайцев А.С.

Томский политехнический университет, Томск

e-mail: rommel@tpu.ru

Температурные градиенты, возникающие в тонком слое жидкости в силу естественных или искусственных факторов, приводят возникновению термокапиллярных течений [1]. При существенно неоднородном (и, в частности, при точечном) нагреве возникающее течение Марангони оказывает существенное воздействие на протекание процессов теплопереноса в слое жидкости. Закономерности таких течений исследованы достаточно слабо и при этом они представляют существенный интерес как с точки зрения углубления понимания особенностей фундаментальных процессов теплообмена, так и с сугубо практической точки зрения. За счет переноса взвешенных частиц с помощью конвективных течения можно создавать зоны контролируемого осаждения примесей [2]. Детальный анализ процесса теплообмена открывает путь к оптимизации тонкослойных систем жидкостного охлаждения.

Кроме свойств жидкости (вязкость, коэффициент поверхностного натяжения) развитие таких течений определяется двумя основными факторами – градиентом температуры вдоль поверхности слоя жидкости, а также одним из характеристических размеров (в большинстве работ используются поперечный размер слоя или его толщина). В тонком слое жидкости (толщина порядка миллиметров) чьи поперечные размеры заведомо больше его толщины, термогравитационная конвекция Рэлея выражена слабо на фоне конвекции Марангони. Таким образом, доминирующим направлением конвективного теплообмена является направление вдоль поверхности слоя. На Рис. 1а показано типичное поле скорости, наблюдающееся при помощи метода PIV [3]. Из Рис. 1 следует, что течение представляет собой пару вихрей, занимающих практически всю поверхность ячейки с жидкостью. По мере удаления от их центров завихренность поля падает более, чем на порядок.

Однако, с ростом толщины слоя жидкости, происходит перераспределение конвективных потоков с ростом вклада конвекции Рэлея в процесс переноса.

В данной работе была исследована зависимость картины течений от толщины слоя жидкости, определена критическая толщина слоя, при которой доминирование термокапиллярных эффектов уступает место превосходству термогравитационных явлений. Были проанализированы распределения температуры на поверхности слоя жидкости и их изменение со временем.

Нагрев слоя жидкости осуществлялся сфокусированным лазерным пучком, поглощавшимся в непрозрачном покрытии (радиусом до 0.25 мм), нанесенном на дно ячейки в ее центре. Максимальные значения температуры на дне ячейки не достигали 65°C, что позволяет исключить эффекты связанные с кипением жидкости.

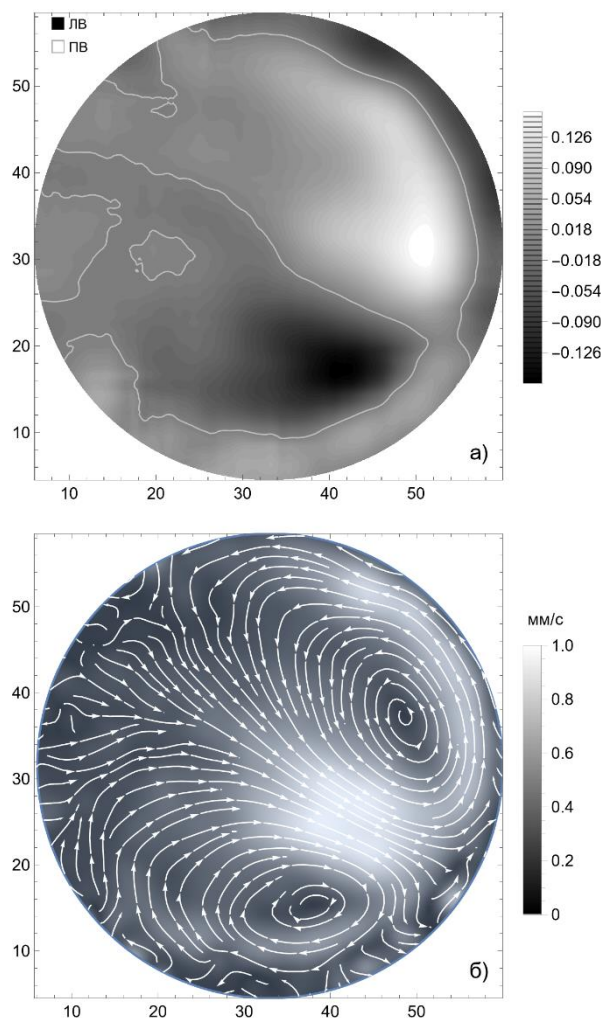


Рис. 1. Измеренное распределение завихренности в слое жидкости (а) и соответствующее поле скорости конвективного течения (б).

Список литературы

1. Ahlers G., Grossmann S, Lohse D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection // Rev. Mod. Phys. 2009. V.81, 503.
2. Ivanova N., Starov V.M., Trybala A., Flyagin V.M. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results // Journal of Colloids and Interface Science 2016. V.473, P. 120–125.
3. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol. 1997. V.8, P. 1379–1392.

Работа поддержана РФФ, проект №22-23-20056

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВСПЛЫТИЯ ОДИНОЧНОГО ПУЗЫРЯ
МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА**

Федосеев А.В., Сальников М.В., Остапченко А.Е.

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

e-mail: fedoseev@itp.nsc.ru

Кипение широко используется в различных технических приложениях, связанных с тепло и массообменом, так как является одним из наиболее эффективных механизмов отвода тепла от нагретой поверхности. Для повышения эффективности теплообмена при кипении применяются различные методы интенсификации, связанные с модификацией поверхности теплообмена [1], в том числе используются поверхности с контрастным смачиванием (лиофобные зоны на лиофильной поверхности).

В работе для моделирования динамики роста и всплытия одиночного пузыря при кипении используется метод решёточных уравнений Больцмана. Метод состоит в итеративном разрешении относительно регулярной прямой решётки системы линейных дискретных уравнений Больцмана:

$$f_i^{\mathbf{r}}(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i^{\mathbf{r}}(\mathbf{x}, t) + \Omega_i^{\mathbf{r}}(\mathbf{x}, t) \Delta t + S_i^{\mathbf{r}}(\mathbf{x}, t) \Delta t, \quad (1)$$

где оператор столкновений Ω_i аппроксимирован приближением БГК. Член-источник сил S_i определён согласно [2]:

$$S_i = f_i^{eq}(\rho, \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t), \quad (2)$$

где f_i^{eq} равновесная функция распределения. Прибавка скорости в (2) определена как:

$$\Delta \mathbf{u} = \frac{\tau \mathbf{F}}{\rho}. \quad (3)$$

В данной работе сила между фазами определялась согласно [3]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = -\beta \psi(\mathbf{x}) \sum_{\mathbf{x}'} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \psi(\mathbf{x}') (\mathbf{x}' - \mathbf{x}) - 0.5(1 - \beta) \sum_{\mathbf{x}'} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \psi^2(\mathbf{x}') (\mathbf{x}' - \mathbf{x}), \quad (4)$$

где функция $\psi(\mathbf{x})$ - псевдо-потенциал:

$$\psi(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{2(p_{EOS}(\mathbf{x}) - \rho c_s^2(\mathbf{x}))}{g}}. \quad (5)$$

Давление $p_{EOS}(\mathbf{x})$ рассчитывалось согласно уравнению состояния Пенга-Робинсона.

Для определения распределения температуры, совместно с (1) рассчитывалось уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho c_v} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \frac{T}{\rho c_v} \left(\frac{\partial p_{EOS}}{\partial T} \right)_{\rho} \nabla \cdot \mathbf{u}_f, \quad (6)$$

где \mathbf{u}_f - физическая скорость жидкости:

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{u} + \frac{\tau \mathbf{F}}{2\rho}. \quad (7)$$

Моделируется процесс роста и отрыва одиночного пузыря над одиночной лиофобной зоной (контактный угол смачивания $\theta=110^\circ$), помещенной на лиофильной ($\theta=67^\circ$) поверхности нагревателя.

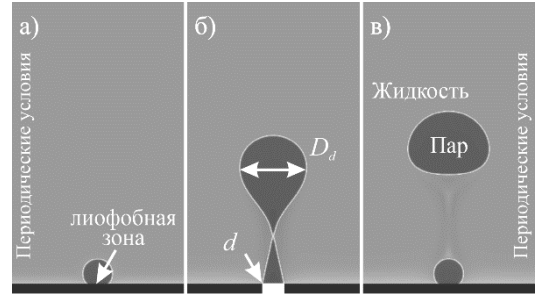


Рис. 1. Расчетная область. Фазовая картина кипения. d – ширина лиофобной зоны, D_d – отрывной диаметр пузыря.

На рисунке 1 представлены расчетная область и фазовая картина кипения. Ширина расчетной области была 500 ячеек (10 мм) по горизонтали и 900 ячеек (18 мм) по вертикали. Пространственный и временной шаг были $h=20 \times 10^{-6}$ м и $\Delta t = 2.5 \times 10^{-6}$ с. Ширина лиофобной зоны варьировалась в диапазоне $d=0.2-8$ мм. Произведен расчет времени между отрывами пузыря t_d в зависимости от температуры нагревателя T_h , а также отрывного диаметра пузыря D_d и частоты отрыва пузыря ν_d от ширины лиофобной зоны d при заданных температурных перегревах $\Delta T=0.04, 0.05$ и $0.06 T_c$, где T_c – критическая температура. Результаты численных расчетов показали, что отрывной диаметр пузыря D_d растет (2.8–3.5 мм) растет с размером ширины лиофобной зоны d . Показано так же, что частота отрыва пузыря ν_d растет с температурным перегревом ΔT . В зависимостях частоты отрыва пузыря от ширины лиофобной зоны $\nu_d(d)$ наблюдается наличие максимумов при ширине лиофобной зоны около $d \sim 500$ мкм. При ширине лиофобной зоны $d > 0.5$ мм, частота отрыва ν_d уменьшается с ростом ширины лиофобной зоны d .

Показано, что метод решеточных уравнений Больцмана подходит для моделирования динамики одиночного пузыря при кипении на поверхностях с контрастной смачиваемостью. На основании полученных данных определен оптимальный размер лиофобной зоны ($d=0,5$ мм) на лиофильной поверхности с точки зрения интенсификации теплообмена.

Список литературы

1. Liang G., Mudawar I., Review of pool boiling enhancement by surface modification // Int. J. Heat. Mass Transf. 2019. V. 128. P. 892–933.
2. A. Kupershtokh, D. Medvedev, D. Karpov, On equations of state in a lattice Boltzmann method // Comput. Math. Appl. 2009. V. 58. №5. P. 965.
3. Gong S., Cheng P., Numerical investigation of droplet motion and coalescence by an improved lattice Boltzmann model for phase transitions and multiphase flow // Comput. Fluids. 2012. V. 53, 93–104.

Работа поддержана РФФ (грант № 22-29-01251)

ТЕЧЕНИЕ КАПЛИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ

Федюшкин А.И., Рожков А.Н., Руденко А.О., Гневушев А.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

e-mails: fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru, arudenko@ipmnet.ru, gnevushev-98@mail.ru

Течение каплей жидкостей через одно или несколько отверстий при их падении на пористые поверхности, например, в виде сито, сетчатых фильтров и медицинских масок – распространенное явление в природе и технике [1]. Изучение протекания каплей через отверстия медицинских масок (проникновение или задержание) важно для передачи инфекций, переносимых мелкими каплями от больного человека к здоровому. Особенностью данного процесса является то, что мелкие капли, которые формируются при дыхании, чихании, кашле, обладают упругостью, присущей ротовой и бронхиальной жидкостям [2]. Критерий разбрызгивания/растекания капли при ударе о препятствие был найден в работе [3]. Ранее авторами было показано, что движущуюся каплю возможно задержать или оттолкнуть даже отдельной нитью [4]. В работе [5] найдено три режима течения капли через отверстие: I. Захват капли отверстием; II. Распад капли на две части, захват одной и отрыв другой; III. Отрыв капли с провисанием. Настоящая работа посвящена экспериментальному и математическому изучению данных режимов движения капли через отверстие (в тонкой пластине) или кольцо (а также через пакет тонких колец или струн) для жидкостей с различными свойствами.

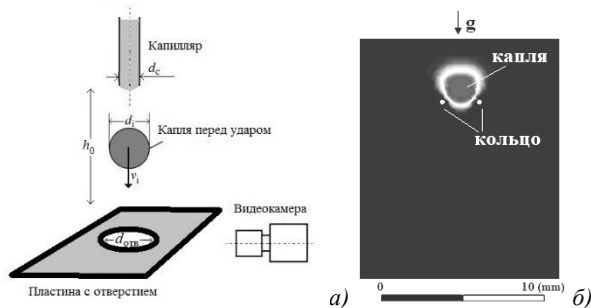


Рис. 1. Схема эксперимента (слева) (а) и вид части расчётной области вблизи кольца (справа) (б).

Схема эксперимента показаны на рис. 1а и более подробно изложена в [5]. В экспериментах капля падала на пластину с отверстием. Диаметр капли в полёте составлял $d_i \approx 3$ мм, диаметр отверстия составлял $d_{отв} \approx 3$ мм, толщина пластины – 0.44 мм. Пластина располагалась на расстоянии $h_0 = 5, 10$ и 20 мм от среза инжектора. Скорость столкновения оценивалась на уровне $v_i = 0.2–0.5$ м/с. Математическая модель основана на решении уравнений Навье-Стокса в осесимметричном приближении с применением VOF метода для определения межфазной границы. Схема математической модели показана на рис.1б, подробнее модель изложена в работах [6,7]. При параметрическом моделировании были рассмотрены следующие диапазоны параметров: $d_i = 0.1–10$ мм, $v_i = 0–1$ м/с, $h_0 = 5, 10$ и 20 мм, кольцо в виде тора внутренний диаметр $d_{in} = 3$ мм, внешний – $d_{out} = 3.44$ мм, базовая жидкость вода, коэффициент поверхностного

натяжения $\gamma = 0.072–0.72$ н/м, вязкость $\mu = 10^{-3}–10^{-2}$ кг/(м×с) и угол смачивания $\theta = 0, 90, 180^\circ$.

Процессы и особенности взаимодействия капли при протекании через отверстие, наблюдаемые в эксперименте представлены на рис. 2, а при численном моделировании на рис. 3.

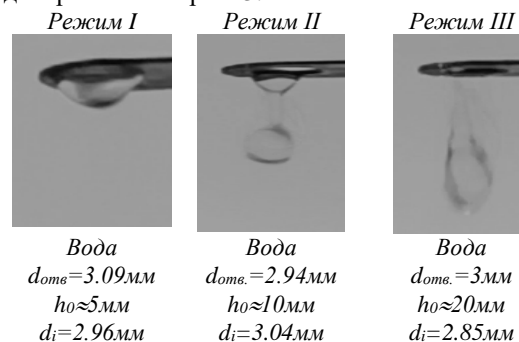


Рис. 2.

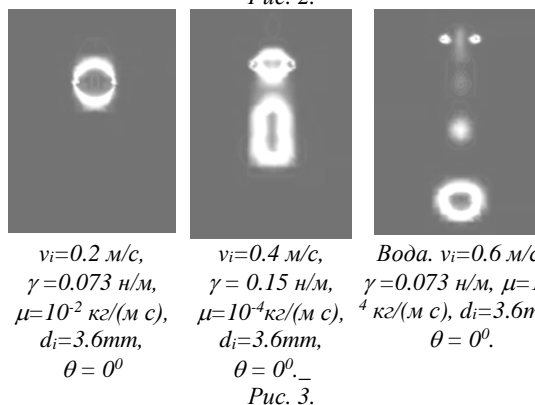


Рис. 3.

Результаты работы показывают, что течения капля через отверстие имеют режимы I, II и III для разных свойств жидкостей.

Список литературы

- Lorceau, E. & Quere, D., 2003. Drops impacting a sieve. Journal of Colloid and Interface Science. 263: 244-249.
- Рожков, А.Н., 2021. Упругость и релаксационные свойства ротовой жидкости. Российский журнал биомеханики. 2021. Т. 25. № 4. С. 393-405.
- Fedyushkin A. I., Rozhkov A. N. Criterion of drop fragmentation at a collision with a solid target (numerical simulation and experiment) // J.I of Phys.: Conf. Series. 2021. Vol. 2057, no. 1. P. 012129. DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012129].
- Fedyushkin A. I., Rozhkov A. N., Rudenko A. O. Collision of water drops with a thin cylinder // J. of Phys.: Conf. Series. 2021. Vol. 2057, no. 1. P. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012034.
- Руденко А.О., Рожков А.Н. Падение упругой капли на пластину с отверстием. В сб.: Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. М., 2021. с. 201-207.
- Федюшкин А. И., Рожков А. Н. Моделирование коалесценции каплей // Математическое моделирование и численные методы. - 2020. - Т. 26, № 2. - С. 46–58.
- Fedyushkin A. I., Rozhkov A. N. A Coalescence of the droplets // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2020. Vol. 927. P. 012055

Работа выполнена по теме гос. задания № АААА-А17-117021310375-7 и при поддержке гранта РФФИ 20-04-60128 Вируссы

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ДЛИННОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Хабин М.Р., Марышев Б.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: mikhail.khabin@mail.ru, bmaryshev@mail.ru

Исследуется течение смеси через массив пористой среды при заданных горизонтальных перепадах давления и концентрации. Целью исследования является определение условий возникновения концентрационной конвекции в условиях характерных для стандартного эксперимента по изучению адсорбционно-десорбционных свойств пористой среды [1].

Рассматривается двумерная задача устойчивости течения смеси через прямоугольную область пористой среды. Предполагается что вертикальный размер области меньше горизонтального в 10 раз. Между вертикальными границами задаётся перепад давления и концентрации, на горизонтальных границах условие отсутствия потока несущей жидкости и примеси (рис. 1). Задача решается в приближении Дарси-Буссинеска [2] транспорт примеси описывается в рамках линейной ММ модели [3].

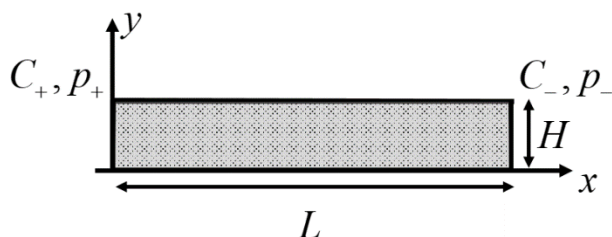


Рис. 1 Постановка задачи.

Основные уравнения могут быть записаны в следующей безразмерной форме:

$$\frac{\partial(c+q)}{\partial t} = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \text{Pe} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \text{Rprc} \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{\text{Rp}}{\text{Pe}} \frac{\partial c}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = ac - bq,$$

где c, q – концентрация мобильной и немобильной компоненты соответственно, p – давление. Также уравнения (1) содержат 4 безразмерных управляющих параметра (2).

$$\text{Pe} = \frac{\kappa(p_+ - p_-)}{\eta D \varphi} \quad \text{Rp} = \frac{\rho g \kappa \beta (C_+ - C_-) L}{\eta D \varphi} \quad (2)$$

$$a = \alpha (C_+ - C_-) \frac{L^2}{D} \quad b = \alpha K_d \frac{L^2}{D}$$

где κ, φ – проницаемость и пористость среды. a, b – коэффициент адсорбции и десорбции соответственно, ρ – плотность несущей жидкости. β – коэффициент теплового расширения. g – ускорение свободного падения. η – динамическая вязкость. α, K_d – коэффициент переноса и распределения примеси соответственно, D – коэффициент диффузии. В формуле (2) Pe – число Пекле, отвечающее горизонтальной прокачке. Rp – число Рейля-Дарси в системе характеризует конвективное движение.

Двумерная задача о течение смеси через прямоугольную область пористой среды решалась численно методом конечных разностей. Построены поля давления и скорости для различных значений параметров, а также распределение концентрации по координате в различные моменты времени. Показано, что в случае $\text{Rp} > \text{Pe}$ увеличивается интенсивность конвективного течения, а при $\text{Rp} < \text{Pe}$ интенсивность конвективного течения уменьшается. Полученные профили концентрации, качественно соответствуют экспериментальным данным.

Также была решена двумерная задача устойчивости режима однородного горизонтального просачивания смеси через прямоугольную область пористой среды. Задача решалась методом Галеркина в комбинации с методом ФСР [4]. Получены нейтральные кривые в пространстве параметров задачи. Проанализированы зависимости критического значения числа Рейля-Дарси и частоты нейтральных возмущений от параметров задачи.

Представленные результаты позволяют найти условия обнаружения концентрационной конвекции в системе.

Список литературы

1. Evgrafova A. E., Kolchanova E. A., Maryshev B. S. Solute transport in a horizontal porous layer at a high solute concentration //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2057. – №. 1. – С. 012031.
2. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. – New York: springer, 2006. p. 640.
3. Van Genuchten M. T., Wierenga P. J. Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions I //Soil science society of america journal. – 1976. – Т. 40. – №. 4. – С. 473–480.
4. Лобов Н. И., Любимов Д. В., Любимова Т. П. Численные методы решения задач теории гидродинамической устойчивости. – Пермь: Перм. ун-т, 2004. с.101.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-11-20125)

ВИТАНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

Чиннов Е.А.

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

e-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Плёночные течения широко применяются в различных промышленных аппаратах и установках. Понимание процессов, происходящих в нагреваемых плёнках жидкости, очень важно для проектирования и создания таких устройств. Спектр практических приложений плёночных течений непрерывно расширяется, что стимулирует постановку и проведение новых экспериментальных и теоретических исследований этого класса явлений. Поэтому гравитационные течения жидкой пленки изучаются уже в течении длительного времени, привлекая внимание многих ученых.

Гидродинамические двумерные волны в изотермических пленках жидкости неустойчивы к трехмерным возмущениям. Установлено, что переход от регулярных двумерных структур к трехмерному течению сопровождается существенным перераспределением жидкости в поперечном направлении [1].

При течении пленок жидкости по нагреваемым поверхностям помимо гидродинамической неустойчивости, приводящей к развитию волнового течения, возникают термокапиллярные неустойчивости разного типа, связанные с переносом жидкости вдоль границы раздела фаз вследствие возникновения градиента поверхностного натяжения [2]. Обзор работ, посвященных формированию структур на поверхности стекающей пленки жидкости представлен в работе [3].

Целью данной работы является исследование витания и взаимодействия трёхмерных струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости и их влияния на теплообмен.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из несущей плиты, на которую устанавливались пленкоформирователь, термостабилизатор и нагреватель.

Рабочая жидкость (вода с красителем) с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Жидкость стекала по пластине и по соединительным каналам под действием гравитации, возвращалась в резервуар с электронасосом. В качестве нагревательного элемента использовался медный плоский теплообменник шириной 150 мм и длиной вдоль потока 100 мм. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса от 33 до 150, $Re = W/\rho\nu$, где W – удельный массовый расход жидкости, ρ – плотность жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Выполнено синхронное измерение распределений толщины и температуры на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости. В экспериментах использовались: инфракрасный сканер Titanium HD 570M, лазер с диодной накачкой RLM-532-2000 и

цифровая камера PCO 1200h. Подробное описание установки и методики исследования содержится в [4].

На поверхности пленки воды, вертикально стекающей вдоль нагревателя, наблюдалось формирование струй. Синхронные трехмерные волны уже были сформированы к моменту достижения верхней кромки нагревателя. Вдоль нагревателя волны двигались друг за другом, но уже при малых тепловых потоках они смещались на небольшие расстояния в поперечном направлении.

При более высоких тепловых потоках в результате взаимодействия волн с термокапиллярными структурами происходило формирование струй на поверхности пленки жидкости, их более интенсивное перемещение в направлении поперёк потока (витание) и взаимодействие (касание, слияние и разделение).

Обнаружено усиление интенсивности теплоотдачи при нагреве пленки. Коэффициент теплоотдачи увеличивался с увеличением теплового потока. Область наиболее интенсивного роста совпадала со значением теплового потока, соответствующего образованию термокапиллярных структур типа А. После формирования структуры этого типа в верхней части нагревателя рост коэффициента теплопередачи с увеличением теплового потока не прекращался, но становился более плавным.

Установлено, что развитие термокапиллярной неустойчивости в верхней части нагревателя приводит к росту амплитуд витания струй. Показано, что перемещение струй в горизонтальном направлении вызывает при определенных условиях их взаимодействие (касание, слияние и разделение (раздвоение)). Перемещение и взаимодействие струй способствует предотвращению появления сухих пятен на поверхности нагревателя, повторному орошению осушенных зон, интенсификации теплообмена и, в конечном счете, увеличению критического теплового потока, соответствующего разрыву пленки жидкости.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М. и др. Особенности перехода от регулярного двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 16.
2. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 5. С. 128–137.
3. Chinnov E.A., Kabov O.A. Structures in the falling liquid films // IPNT. 2021, V. 9. N 4. P. 1–24.
4. Chinnov E.A. Formation of the unsteady thermocapillary structures in the residual layer of three-dimensional waves // ИЖТ. 2017. V. 108. P. 2053–2059.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
гранта РФФИ 22-19-20090 и Правительства
Новосибирской области, соглашение № р-13*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОХОЖДЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НАД ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ЧАСТИЦ В РАМКАХ ДВУХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ

Чупров П.А.

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

e-mail: petchu@mail.ru

В работе представлены результаты численного моделирования экспериментов, в которых ударная волна различной интенсивности распространялась над поверхностью плотного слоя частиц, насыпанного на непроницаемую стенку. Математическая модель основана на двумерной системе уравнений Баера-Нунциато [1] и учитывает межгранулярные напряжения, возникающие в твердой фазе частиц.

Вычислительный алгоритм основан на методе HLLC с процедурой мгновенной релаксации давления. Разработанный алгоритм работоспособен при наличии сильных разрывов объемной доли частиц, типичных для двухфазных ударно-волновых задач, связанных с засыпкой, облаком или слоем частиц, в том числе для локально сверхзвуковых режимов течения газа. С помощью разработанного алгоритма был проведен численный эксперимент, выявивший качественное и количественное соответствие с имеющимися в литературе данными [2].

При прохождении УВ над слоем частиц в слое инициируется и распространяется волна компактирования. Для исследования зависимости параметров этой волны от интенсивности УВ были проведены расчёты с четырьмя различными скоростями УВ: 656 м/с, 939 м/с, 1049 м/с и 1201 м/с. Ниже приведены графики распределения объемной пыли и давления газа для случая с наибольшей скоростью УВ.

В численном моделировании наблюдаются такие характерные черты течения как смятие слоя на некоторый угол, а также зону компактирования, так же имеющую вид угла. Повышение порядка точности по пространству, а также тщательное параметрическое исследование модели существенно улучшило точность результатов.

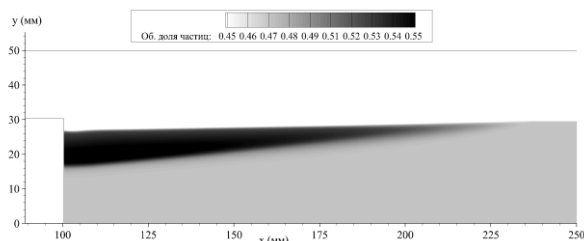


Рис. 1. Распределение объемной доли пыли в численном эксперименте.

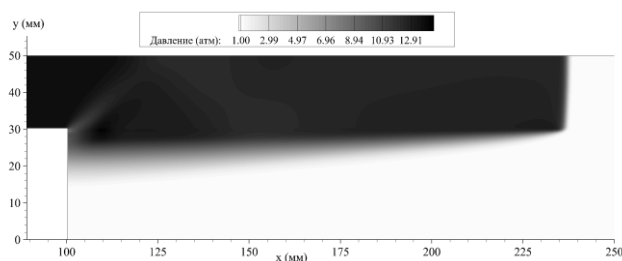


Рис. 2. Распределение давления газа в численном эксперименте.

Список литературы

1. Baer, M.R and J.W. Nunziato. 1986. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition in reactive granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 12(6):861-889. doi: 10.1016/0301-9322(86)90033-9.
2. Fan, B.C., Chen, Z.H., Jiang, X.H. and H.Z. Li. 2007. Interaction of a shock wave with a loose dusty bulk layer. *Shock Waves*. 16:179-187. doi: 10.1007/s00193-006-0059-5.

Работа выполнена в рамках госзадания ИАП РАН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В СИСТЕМЕ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ТРЕЩИН

Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: Regina.you@mail.ru

Течение суспензии в трещинах имеет отношение ко многим промышленным процессам, например, в нефтедобывающей отрасли при гидравлическом разрыве пласта. Численные и экспериментальные исследования транспорта и осаждения частиц в трещинах различной геометрии показывают, что эффективность метода снижается, когда вертикальная трещина пересекается естественной [1]. Прогнозирование и оптимизация размещения расклинивающего наполнителя в сложных системах трещин остается актуальной отраслевой проблемой.

В данной работе проводится математическое моделирование течения суспензии в сложной системе трещин, когда основную пересекают вторичные. Рассматриваются варианты, когда торцы каналов пронизываемы для несущей жидкости, но не для твердой фазы, а также случай, когда основной канал тупиковый.

Математическая модель процесса построена в одножидкостном приближении и включает уравнение неразрывности для суспензии, систему уравнений движения суспензии, уравнение сохранения массы в виде конвективно-диффузионного уравнения переноса для объемной концентрации частиц [2]. Решение задачи в трехмерной постановке реализовано в программном пакете OpenFOAM.

Проведены исследования динамики распределения твердых сферических частиц в сети трещин в зависимости от соотношения характерных чисел Архимеда (Ar), Рейнольдса для течения (Re) и для частиц (Re_p), а также от объемного содержания твердой фазы в нагнетаемой суспензии. Размеры основной трещины $0,5 \times 0,04 \times 0,002$ м, вторичной – $0,3 \times 0,04 \times 0,002$ м. Вторичная трещина пересекает основную на расстоянии $0,2$ м от входа. На входе трещины задается расход суспензии, на выходах поддерживается одинаковое давление.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты численного моделирования, полученные при нагнетании 30% суспензии в трещину для числа $Ar=16$ и при соотношении чисел Рейнольдса $Re/Re_p=1$ и $Re/Re_p=10$. Время выбрано таким образом, что объемы закаченной суспензии в обоих случаях равны. Видно, что при $Re/Re_p=1$ наблюдается относительно равномерное распределение частиц вдоль как основной трещины (см. рис. 1а), так и пересекающей (см. рис. 2а). Наблюдается растянутый на всю длину трещины слой из осевших частиц, концентрация которых близка к предельной.

При $Re/Re_p=10$ основная масса частиц находится во взвешенном состоянии в области до пересекающей трещины (см. рис. 1б). К этому времени лишь малая часть успевает осесть. При этом в правой части канала количество частиц заметно меньше, чем в предыдущем случае. Вал частиц, образовавшийся на

дне трещины, имеет разрыв в области пересечения со вторичной, где суспензия устремляется в боковые ответвления (см. рис. 2б).

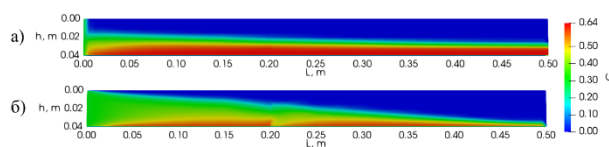


Рис. 1. Распределение частиц в основной трещине: а) $Re/Re_p=1$; б) $Re/Re_p=10$.

Во вторичной трещине наблюдается неравномерное распределение частиц, проявляющееся в накоплении твердой фазы у выходов (рис. 2б).

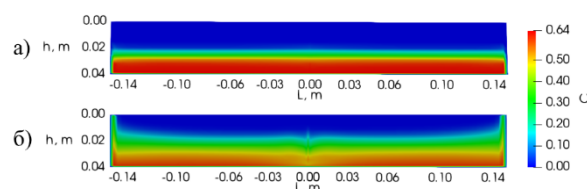


Рис. 2. Распределение частиц во вторичной трещине: а) $Re/Re_p=1$; б) $Re/Re_p=10$.

Это приводит к существенному снижению пропускной способности вторичной трещины, что приводит к последующей закупорке и прекращению течения суспензии. При моделировании этот процесс сопровождается скачком давления в системе. Это приводит к тому, что до прекращения течения с торцов трещин в первом случае, сеть трещин более чем на 90% заполняется твердой фазой, когда как во втором – этот показатель менее 60%. В случае же когда торец основной трещины пронизываем для несущей жидкости этот показатель возрастает до 80%.

Полученные результаты могут быть использованы для предварительных расчетов транспортировки частиц в основной и пересекающихся трещинах в зависимости от характеристик суспензии, геометрии трещин и параметров закачки.

Список литературы

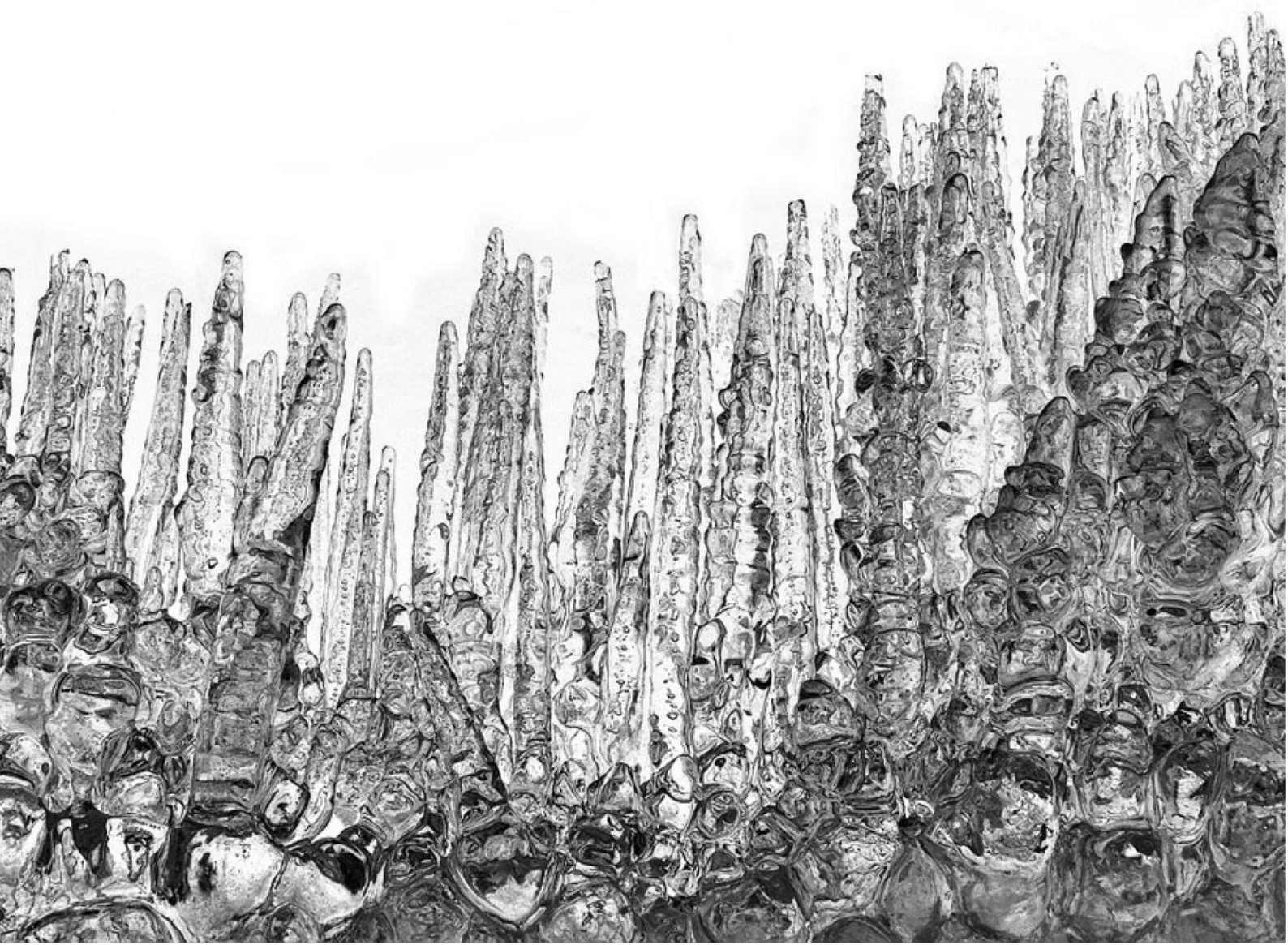
1. Sahai R., Miskimins J. L. and Olson, K. E. Laboratory Results of Proppant Transport in complex fracture systems. Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Woodlands, Texas, 4-6 February, 2014. SPE-168579-MS.
2. R R Iulmukhametova, A A Musin, L A Kovaleva Mathematical modelling of a laminar suspension flow in the flat inclined channel // Journal of Physics: Conference Series, 2021. 2057 012044. 6 p.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90157



СЕКЦИЯ 3

Фазовые переходы



ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАННИХ ЭТАПОВ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА МЕТАНА

Белослудов В.Р.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: bel@niic.nsc.ru

Образование газовых гидратов — перспективная технология, способная существенно улучшить способы разделения газов, хранения и транспортировки энергии, захвата и захоронения углекислого газа (углеродной секвестрации), а также для опреснения морской воды. Образование гидратов из жидкой фазы включает в себя очень важную стадию процесса зародышеобразования гидратов, понимание которого необходимо для разработки эффективных практических методов применения гидратов [1]. Типичную эволюцию во времени расхода газа в процессе гидратообразования можно разделить на три основных этапа: растворение, метастабильный пересыщенный раствор и роста гидрата [1].

Экспериментальное описание процесса зародышеобразования гидратов в водной фазе на атомном и молекулярном уровне представляет собой сложную задачу не только из-за чрезвычайно малого масштаба размеров/времени, но и из-за стохастического характера процесса нуклеации.

За последние несколько десятилетий проведено множество работ по теоретическому моделированию процесса гидратообразования, где были раскрыты многие важные аспекты зарождения кристаллов в жидкостях (обзоры [1-3]). Полученные результаты использовались для более глубокого понимания процесса зародышеобразования в различных системах, где более или менее точно воспроизводится временная эволюция перехода «жидкость-кристалл».

В настоящее время основными гипотезами о молекулярном механизме нуклеации гидратов являются гипотеза лабильных кластеров (LCH) [4] и гипотеза локальной структуры (LSH) [5]. Согласно LCH, перед образованием гидрата молекулы воды образуют лабильные относительно долгоживущие неустойчивые кластеры (схожие со структурой гидратных полостей). При благоприятных условиях эти кластеры объединяются и трансформируются в твердую фазу клатратного гидрата [5]. LSH предполагает, что гостевые молекулы вследствие колебаний концентрации располагаются в конфигурации, аналогичной кристаллической и затем происходит реорганизация структуры воды вокруг гостевых молекул, в следствие чего образуется структура гидрата.

Процесс нуклеации гидратов остаётся спорным, а его природа исследована не до конца.

В данной работе методами молекулярной динамики (программный пакет LAMMPS) изучена эволюция метастабильного раствора «метан+вода» при различ-

ных концентрациях метана вне области стабильности гидрата метана ($T=270$ К, $P=1$ бар). Исследование было проведено для модели сверхнасыщенного раствора метана, состоящей из 10000 молекул воды и 1043 молекул метана (9.45 mol%). Стартовое распределение молекул гостей было случайным, что позволило получить однородный раствор. Молекулы воды рассматривались в 4-точечном приближении [6], а молекулы метана в сферическом приближении [7].

Показано, что процесс образования гидратов представляет собой коллективный процесс перестройки сетки водородных связей в растворе на начальном этапе (0–1 нс, до появления первых флуктуационных полостей), выражающийся в увеличении степени тетраэдричности локального окружения каждой молекулы воды. При этом молекулы с высокой степенью тетраэдричности окружения распределены по объёму раствора равномерно. Показано образование малых 5^{12} и больших $5^{12}6^2$ флуктуационных полостей sI до начала устойчивого роста гидратов. На следующем этапе постоянно присутствующие в объёме раствора гидратные полости становятся основой для распределённых в объёме центров нуклеации гидратов. Помимо больших и малых полостей структуры KC-I образуются топологически близкие к ним полости $4^{15}10^6$, которые при дальнейшем моделировании преобразуются в правильные кристаллические полости.

Список литературы

1. Khurana M., Yin Z., Linga P. A Review of Clathrate Hydrate Nucleation // ACS Sustain. Chem. Eng. 2017. V. 5. P. 11176–11203.
2. Sosso G.C., Chen J., Cox S.J., et al. Crystal Nucleation in Liquids: Open Questions and Future Challenges in Molecular Dynamics Simulations // Chem. Rev. 2016. V.116. P. 7078–7116.
3. English N.J., MacElroy J.M.D. Perspectives on molecular simulation of clathrate hydrates: progress, prospects and challenges // Chem. Eng. Sci. 2015. V. 121. P. 133–156.
4. Sloan E D., Fleyfel F.A. A molecular mechanism for gas hydrate nucleation from ice // AIChE J. 1991. V. 37. P. 1281-1292.
5. Radhakrishnan R., Trout B. L. A new approach for studying nucleation phenomena using molecular simulations: Application to CO₂ hydrate clathrates // J. Chem. Phys. 2002. V. 117. P. 1786-1796.
6. Abascal J.L.F., Sanz E., Garcia Fernández R., et al. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice // J. Chem. Phys. 2005. V. 122, No. 23. Paper 234511.
7. Martin M.G., Siepmann J.I. Transferable Potentials for Phase Equilibria. 1. United-atom Description of n-Alkanes // J. Phys. Chem. B. 1998. V. 102. P. 2569-2577.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 21-52-52001)*

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПО ДЕКАРБОНИЗАЦИИ КРУПНЕЙШИХ ЭМИТЕНТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Блябляс А.Н., Вершинин С.А., Голованов Д.А.

ООО «Газпромнефть НТЦ»

e-mail: Blyablyas.AN@gazpromneft-ntc.ru

В работе авторов проанализированы термобарические свойства углекислого газа при его транспортировке методом трубопроводного транспорта. Изучены свойства углекислого газа в различных состояниях.

Области фазовой диаграммы соответствуют условиям, при которых вещество находится в одном равновесном состоянии. Кривые фазовой диаграммы соответствуют условиям, при которых вещество находится в равновесии двух фаз. Кроме того, фазовая диаграмма имеет две точки – тройная и критическая. Тройная точка определяется давлением и температурой (0,52 МПа и $-56,5^{\circ}\text{C}$) при которых углекислый газ находится равновесно в трех состояниях. А при достижении и увеличении температуры и давления выше критических значений, исчезает разница между жидкой фазой и паровой. Критическая точка диоксида углерода соответствует давлению 7,27 МПа и температуре 31 градусом Цельсия (рисунок 1).

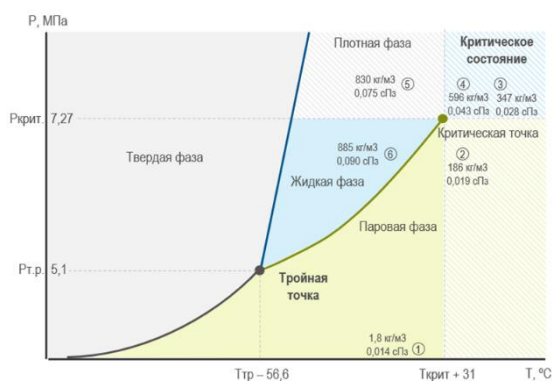


Рис. 1. Фазовая диаграмма углекислого газа.

Важно отметить, что при переходе из одной области в другую, в докритическом состоянии, происходит скачкообразное изменение свойства углекислого газа – плотность и вязкость. При переходе через критическую точку, не происходит скачкообразного изменения плотности и вязкости, однако, заметно меняется теплоемкость вещества. Плотность среды напрямую влияет на транспортировку газа, чем газ плотнее, тем меньший объем он занимает, следовательно, меньший типоразмер трубопровода и капиталоёмкость требуется для транспортировки среды.

При осуществлении транспорта углекислого газа необходимо учитывать фазовую диаграмму, так как изменение условий потока может привести к фазовому переходу, и транспортируемая среда перестает быть однофазной. Фазовые переходы в трубопроводах приводят к повреждениям или полному отказу оборудования, поэтому важно не допустить их возникновения по мере транспортировки продукции. Кривая «жидкость-пар» углекислого газа находится в диапазоне

давлений и температур типичных для транспортируемых сред трубопроводным транспортом, поэтому возможность транспорта CO_2 ограничена в жидком состоянии. Так как диапазон условий для критического состояния достаточно широк, можно сделать предположение, что это состояние является оптимальным для транспортировки углекислого газа.

Для определения оптимального режима при перемещении диоксида углерода по трубопроводу необходимо определить значения плотности и вязкости для каждого состояния.

Для изучения свойств углекислого газа в различных состояниях проведено моделирование в специализированном ПО. Определена выборка состояний диоксида углерода при различных условиях – жидкая фаза, газообразная фаза, газообразная фаза близкая к критической точке, состояние критической фазы, состояние «плотной фазы», переходное состояние критическое – «плотная фаза».

Основной тезис работы - закритический режим с давлением выше 7,3 МПа – оптимальное решение для протяженного транспорта углекислого газа. Отсутствие реализованных проектов в стране не позволяет изучить опыт запроектированных и эксплуатируемых решений транспорта диоксида углерода. Однако существуют зарубежные проекты по работе с углекислым газом, которые сфокусированы в северной части Америки и Канаде. Мировой опыт реализованных проектов также декларирует транспортировку углекислого газа в закритическом состоянии. Анализ реализованных проектов показывает, что транспорт осуществляется под давлением, существенно большим, чем закритическое давление.

Для системного решения задачи исследования авторами структурировано и описано поведение углекислого газа при изменяющихся давлениях и температурах.

Разработанные в настоящей работе положения по проектированию трубопроводных систем позволят повысить эффективность реализации проектов по декарбонизации. Реализация знаний, полученных в ходе работ, несет существенное значение для экологии, экономики и обороноспособности страны.

Список литературы

1. Carbon capture & storage Summary Report of the Regulatory Framework Assessment // URL: www.solutionsstarthere.ca/ (дата обращения: 09.04.2022).
2. Craig R., Butler D. Oil Sands CO2 Pipeline Network Study Prepared for: Canada's Oil Sands Innovation Alliance // Canada's Oil Sands Innovation Alliance. – 2017. – С. 87.
3. International Standard ISO 27913:2016 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems.

РОЛЬ НАНОЧАСТИЦ SiO_2 В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРАТНЫХ ФАЗ В ПРИСУТСТВИИ CH_4/CO_2 Божко Ю.Ю.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Субботин О.С.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}¹ Новосибирский государственный университет² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева, Новосибирск

e-mail: bozhko@niic.nsc.ru

В настоящей работе была изучена система содержащая гидрат метана/гидрат диоксида углерода с добавлением наночастицы диоксида кремния, которая в последнее время изучается исследователями гидратных систем, в основном с целью изучения механизма ускорения образования клатратных гидратов, т.к. наночастицы SiO_2 используются как добавка к другим газиво-гидратным системам, которая способна значительно увеличить скорость образования гидратов. Таким образом, можно получить гидраты метана/диоксида углерода в условиях ускоренного режима. В последних работах было показано, что молекулы метана/ CO_2 образуют гидратную структуру I (CS-I) совместно с наночастицами SiO_2 при атмосферном давлении и температуре. С этой точки зрения изучение структурных и термодинамических параметров образования гидратов метана/ CO_2 в присутствии наночастицы SiO_2 очень важно в свете разработки технологий утилизации и хранения парниковых газов в газгидратной форме. Также изучение скорости и структурных свойств необходимо для понимания механизма образования гидратов.

В области низкого давления чистый гидрат CH_4/CO_2 образует CS-I, которая состоит из 2 полостей 512 (S-полость), 6 полостей 51264 (L-полость), и 46 молекул H_2O в элементарной ячейке. Молекулы CH_4/CO_2 способны заполнить как L-полость, так и S-полость.

В настоящей работе методами молекулярной динамики с использованием молекулярно-динамического пакета Gromacs [1] проведено моделирование процесса образования гидратов в системах содержащих молекулы метана/ CO_2 , воды и SiO_2 с различной концентрацией метана/ CO_2 . Модельная система изображена на рисунке (см. рис. 1). Релаксацию рассматриваемых систем проводили с использованием термостата v-rescale и баростата berendsen'a для быстрого и эффективного приведения систем к заданным значениям температуры и давления в NPT ансамбле. Для основного моделирования был использован термостат Nose-Hoover'a и баростат Parrinello-Rahman'a. В работе рассматривались системы в диа-

пазоне температуры 267–277 К и давлении 1.0–4.0 МПа.

Были получены кривые числа водородных связей в зависимости от времени моделирования при различной температуре. Была исследована динамика реструктуризации ближнего порядка молекул воды в процессе нуклеации и диссоциации гидрата, рассчитаны колебательные и вращательные спектры системы, а также определены области термодинамической стабильности гидратов CO_2/CH_4 со включенными в рассматриваемую систему наночастицами SiO_2 .

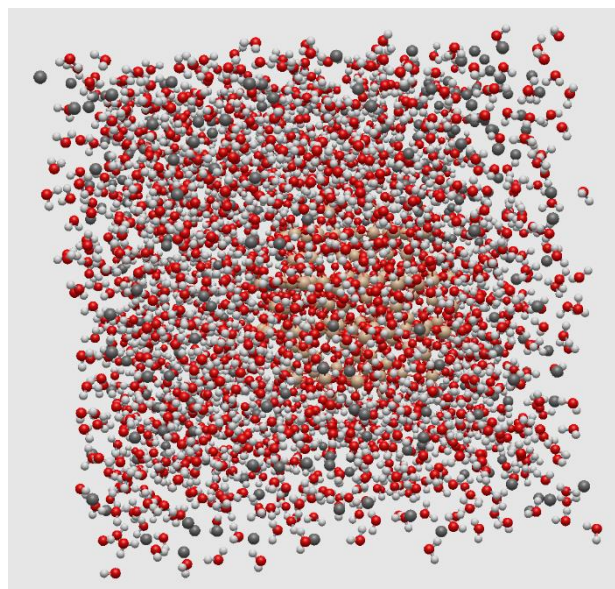


Рис. 1. Начальный этап моделирования системы содержащей наночастицы SiO_2 , молекулы воды и метана.

Список литературы

1. Berendsen H. J. C., van der Spoel D., van Drunen R. GROMACS: a message-passing parallel molecular dynamics implementation // Computer physics communications. 1995. V. 91. No. 1–3. P. 43–56.

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00428)

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛ ФРЕОНА/ТНФ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ СМЕШАННЫХ КЛАТРАТНЫХ ГИДРАТОВ В ПРИСУТСТВИИ NaCl

Божко Ю.Ю.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева, Новосибирск

e-mail: bel@niic.nsc.ru

В данной работе мы изучали возможность образования смешанных гидратов из смеси тетрагидрофурана (ТНФ) и фреона (CH₂FCF₃, R134a; CHF₃, R23), данные смеси в последнее время исследуются, в основном потому, что молекулы ТНФ/фреона используются в качестве добавки к другим газогидратным системам, которая способна значительно снизить равновесное давление образования смешанных гидратов. Таким образом, можно получить смешанные гидраты в условиях низкого давления. В недавних работах было показано, что молекулы ТНФ/фреона R134a образуют гидратную структуру II (CS-II), а молекулы фреона R23 - образуют гидратную структуру I (CS-I) при низком давлении. С этой точки зрения изучение динамических и термодинамических свойств смешанных гидратов фреона/ТНФ очень важно в свете разработки технологии для опреснения морской воды. Также изучение динамических свойств необходимо для понимания механизма образования смешанных гидратов.

В области низкого давления чистый гидрат фреона R23 образует структуру CS-I, которая в свою очередь состоит из 2 полостей 512 (S-полость), 6 полостей 51262 (L-полость), и 46 молекул H₂O в элементарной ячейке. Молекулы фреона R23 способны заполнить как L-полость, так и S-полость. Известно, что фреон R23 формирует стабильную гидратную фазу в интервале температуры 275.40–285.80 К и давления 0.450–1.566 МПа [1].

В области низкого давления чистый гидрат ТНФ/фреона R134a образует структуру CS-II, которая в свою очередь состоит из 16 полостей 512 (S-полость), 8 полостей 51264 (L-полость), и 136 молекул H₂O в элементарной ячейке. Молекулы фреона/ТНФ способны заполнить только L-полость, так как S-полость слишком малого размера для этих молекул. Известно, что фреон R134a формирует стабильную гидратную фазу в интервале температуры 274.40–282.20 К и давления 0.065–0.345 МПа [1].

В настоящей работе методами молекулярной динамики с использованием молекулярно-динамического пакета Gromacs [2] проведено моделирование процесса образования гидратов в системах содержащих молекулы фреона/ТНФ, воды и NaCl в различной концентрации фреона/ТНФ. Релаксацию представленных систем проводили с использованием термостата v-rescale и баростата berendsen'a для быстрого и эффективного приведения систем к заданным значениям температуры и давления в NPT ансамбле. Для основного моделирования был исполь-

зован термостат Nose-Hoover'a и баростат Parrinello-Rahman'a. В работе рассматривались системы в диапазоне температуры 260–285 К и давлении 0.10–1.60 МПа.

В представленной работе моделирование термодинамических функций смешанных гидратов проведено в рамках статистико-термодинамической теории соединений включения[3], которая является продолжением полуэмпирической теории гидратов ван-дер-Ваальса (мл.) и Платтеу.[4]

Для моделирования фаз гидратов выбраны «Суперячейки» с числом элементарных ячеек равным 8, что позволяет описывать гидраты с различными степенями заполнения полостей. Используя известные потенциалы межмолекулярного взаимодействия, проведена оптимизация координат молекул «гостей» и «хозяина» при заданных температуре и давлении методом сопряжённых градиентов. Для выбранных смешанных гидратов проведены численные расчеты динамических и термодинамических свойств с использованием метода решеточной динамики.

Для построения линии фазового равновесия численно найдены химические потенциалы молекул воды, образующих гидратные решетки, и молекул «гостей», находящихся в различных полостях. Равновесный состав гидратных фаз численно рассчитан из равенства химического потенциала молекул «гостей» и молекул «хозяина» на линиях фазовых равновесий.

Были получены кривые числа водородных связей в зависимости от времени моделирования при различной температуре.

Были получены кривые степени заполнения в зависимости от давления смешанных гидратов. Были получены линии фазовых равновесий рассматриваемых в работе систем.

Список литературы

1. Hashemi H. et al. Experimental measurements and thermodynamic modeling of refrigerant hydrates dissociation conditions //The Journal of Chemical Thermodynamics. 2015. V. 80. P. 30–40.
2. Berendsen H. J. C., van der Spoel D., van Drunen R. GROMACS: a message-passing parallel molecular dynamics implementation // Computer physics communications. 1995. V. 91. No. 1–3. P. 43–56.
3. Belosludov V. R., Lavrentiev M. Y., & Dyadin Y. A. Theory of clathrates //Journal of inclusion phenomena and molecular recognition in chemistry. 1991. V. 10. No. 4. P. 399–422.
4. Van der Waals J. H., & Platteeuw J. C. Clathrate solutions //Advances in Chemical Physics. 2007. V. 2. P. 1–57.

Работа поддержана РФФИ (грант № 21-52-52001 МНТ_а)

ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЕ В РАСТЯНУТЫХ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКИХ СМЕСЯХ

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

Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Россия

e-mail: baidakov@itpuran.ru

Методом молекулярной динамики (МД) исследовано зарождение пузырьков в растянутых (перегретых) леннард-джонсовских смесях, отличающихся растворенным веществом. Система *A* моделирует газонасыщенную смесь метан–водород, система *B* – смесь с полной растворимостью компонентов метан–азот [1]. Частота зародышеобразования J рассчитана методом среднего времени жизни [2] при температуре T , близкой к температуре нормального кипения растворителя, отрицательных давлениях p и мольных долях растворенного вещества $x = 0-0.2$. Среднее время ожидания жизнеспособного зародыша τ определялось по 100–200 событиям зародышеобразования. В качестве единиц приведения рассчитываемых величин к безразмерному виду использованы параметры потенциала межчастичного взаимодействия σ_{11} , ε_{11} и масса частицы m_1 растворителя. На рисунке 1 представлены зависимости давления предельного растяжения p_n от мольной доли растворенного вещества x при фиксированной частоте зародышеобразования J . Рост количества растворяемого вещества в растворителе приводит к более значительному изменению давления предельного растяжения p_n смеси *A*, чем смеси *B*. Величина p_n смеси *B* превышает рассчитанную из классической теории зародышеобразования (КТЗ) в макроскопическом приближении. При $x > 0.14$ давление p_n смеси *A* меньше его теоретического значения.

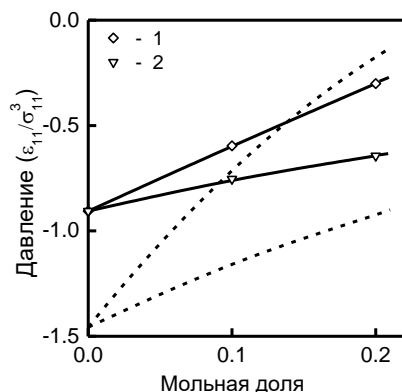


Рис. 1. Давление предельного растяжения смесей *A* (1) и *B* (2), соответствующее $J = 2 \cdot 10^{-7}$, как функция мольной доли растворенного вещества. Сплошные линии – МД моделирование, пунктирные – КТЗ.

Установлено качественное отличие в динамике формирования критического зародыша в смесях *A* и *B* (рис. 2). В смеси *A* зарождение новой фазы начинается с появления неоднородности радиусом $\sim 5\sigma_{11}$. Парциальная плотность первого компонента в центре неоднородности примерно в 7 раз меньше, а второго в 3 раза больше, чем парциальные плотности в ее окружении. Плотность смеси в центре неоднородности при этом понижается примерно в два раза. В смеси *B* на этапе формирования критического пузырька плот-

ность второго компонента в неоднородности остается близкой к плотности окружающей фазы. В области размером $\sim 3.5\sigma_{11}$ происходит понижение плотности растворителя и, соответственно, плотности смеси. В смеси *A* формирование области, обогащенной растворенным веществом, связано с более высокой подвижностью его частиц, чем частиц растворителя, и более слабыми силами притяжения частиц первого и второго компонента и, как следствие, большими локальными флуктуациями плотности и состава, чем в смеси *B*.

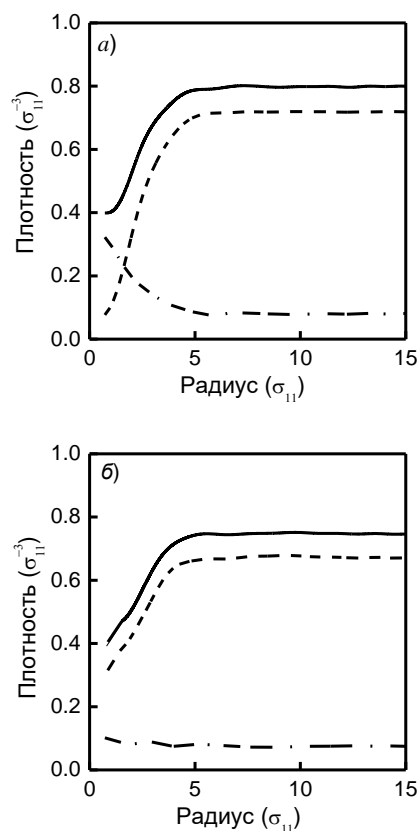


Рис. 2. Радиальные профили плотности в месте возникновения критического пузырька в смеси *A* (а) и *B* (б) при $x = 0.1$. Сплошная линия – плотность смеси; штриховая и штрихпунктирная линии – парциальные плотности растворителя и растворенного вещества, соответственно.

Список литературы

1. Hirschfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. Molecular theory of gases and liquids // New York: Wiley; 1954.
2. Baidakov V.G., Bobrov K.S. Spontaneous cavitation in a Lennard-Jones liquid at negative pressures // J. Phys. 2014. V. 140. P. 184506.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00276-П).
При проведении работ был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕЗТИГЕЛЬНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Виноградов Д.А.¹, Ивочкин Ю.П.¹, Кубриков К.Г.¹, Тепляков И.О.¹, Юдин С.М.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

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

В настоящее время технология индукционного нагрева "переживает второе рождение" и широко используется в промышленности. Одно из основных преимуществ этой технологии состоит в возможности плавления металлов без соприкосновения (или слабом соприкосновении) со стенками сосудов. Подобное безтигельное плавление материалов в электромагнитном поле используется, например, в технологии получения чистого титана [1].

Наши эксперименты направлены на изучение механизмов маломасштабных паровых взрывов посредством падающих в воду жидкометаллических капель, расплавленных в индукторе, а также особенностей безтигельного плавления стали. Опыты выполнены на индукционной установке [2] с максимальной мощностью 4.5 кВт, в которой образцы (обычно, металлические шары диаметром 10 мм) либо левитировали, либо размещались на керамической подставке в центре индуктора. Характерные частоты тока индуктора составляла 60 и 400 кГц. Температура образца при температурах до 1000К измерялась ХА термопарой, а при более высоких значениях (до 2500К) методом спектральной пирометрии с последующей обработкой в координатах Вина. Измерения выполнялись с использованием программной среды LabView. Видеозаписи плавления и испарения осуществлялись посредством трех видеокамер со скоростью съемки 50, 250 и 960 кадр/с. В качестве материалов образцов использовались шарикоподшипниковые стали типа ШХ15 и 95Х18Ш, а также чистые металлы: медь, свинец, никель. Опыты проводились на воздухе, в атмосфере аргона, и в дистиллированной воде. В последнем случае образцы плавилась до требуемой температуры в инертной среде аргона, а затем погружались в охладитель посредством его медленной подачи через отверстие, размещенное в дне рабочего корпуса установки. Подобные эксперименты предназначены для исследования фрагментации расплавов и закономерностей пленочного кипения на твердых и жидкометаллических поверхностях.

Главное внимание в представленной работе посвящено описанию и объяснению обнаруженного физического эффекта [2], связанного с интенсивной эмиссией в окружающую воздушную среду из горячей капли мелких брызг диаметром $0.1 \div 1$ мм. Начальная скорость вылетающих капелек, имеющих по проведенным оценкам температуру $\sim 1450^\circ\text{C}$, $0.5 \div 3.5$ м/с. Эти капельки при попадании в окружающую среду уменьшаются в размерах до $0.01 \div 0.4$ мм за счет испарения и дробления.

Результаты рентгеноструктурного анализа материала металлических брызг и оболочки показали, что

они имеют как аморфную, так кристаллическую структуру и состоят из различных типов оксидов железа, а также аустенита и феррита.

Предложена физическая модель, в которой процесс капельной эмиссией протекает в следующей последовательности. В начальный момент нагрева в воздушной среде происходит образование пористой оксидной пленки, состоящей, главным образом, из Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . При дальнейшем нагреве происходит плавление внутренней части шара в условиях ограниченного объема, созданного твердой оксидной оболочкой. Расплав металла находится в движении под действием сил Ампера и Архимеда и состоит из множества вихрей. Взаимодействие между вихрями приводит к механическим колебаниям всей капли и образованию волн на ее поверхности. Перемешивание расплава приводит к выравниванию его температуры, а последующий нагрев вызывает дальнейшее увеличение давления на оксидную оболочку и рост в ней термомеханических напряжений. Термомеханические напряжения в тонкой оболочке приводят к образованию дефектов разного размера. Через дефекты расплав выбрасывается в окружающее пространство, причем из-за поверхностного натяжения выбросы принимают форму мелких шариков.

С целью проверки описанных выше качественных соображений были выполнены численные расчеты распределения температуры, скорости и давления при плавлении металлических шаров в условиях близких к экспериментальным. Результаты расчетов не противоречат описанной выше схемой протекания процесса. Максимальная температура образца, расплавленная внутри ее объема, может на десятки градусов превышать температуру поверхности, что подтверждает возможность плавления стали внутри твердой оксидной оболочки. Характерная скорость роста толщины окисленного слоя при температуре образца выше 1000°C составляет ~ 1 мкм/с. Скорость движения расплава внутри капли может достигать несколько десятков см/с.

Авторы выражают благодарность О.А. Синкевичу, Т.И. Бородиной, В.Г. Глазкову, А.Р. Ахмадуллиной за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов.

Список литературы

1. Khatsayuk M., Demidovich V., Timofeev V. The destruction model of cylindrical billet's hard shell during heating and melting by internal sources // Proc. UIE 2021 XIX Int. UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes. P. 73–74.
2. Vinogradov D.A., Glazkov V.V., Ivochkin Yu.P., Kubrikov K.G., Teplyakov I.O., Sinkevich O.A., Borodina T.I. Features of intensive evaporation of liquid-metal steel drops heated in a high-frequency inductor // JPCS 2088 (2021) 012050.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРАТНОЙ ЗАТРАВКИ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА ПРИ ОПРЕСНЕНИИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Гец К.В.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: gets@niic.nsc.ru

Газовые гидраты привлекают внимание исследователей как ключевой материал для решения глобальных экологических проблем [1]. Решётка газовых гидратов состоит из молекул воды; наиболее распространены три типа: кубическая структура I (КС-I, sI), кубическая структура II (КС-II, sII) и гексагональная структура III (ГС-III, sH), однако существуют и другие [2]. Помимо типа и размеров, различия между структурами гидрата заключается в геометрии и количестве полостей, внутри которых могут находиться не-ионные молекулы гости. Элементарная ячейка гидрата КС-I состоит из 46 молекул воды, которые образуют 2 малых полости 5^{12} и 6 полостей большего размера $5^{12}6^2$. Элементарная ячейка гидрата КС-II состоит из 136 молекул воды, которые образуют 16 малых полостей 5^{12} и 8 больших полостей $5^{12}6^4$.

Образование газовых гидратов является одним из способов опреснения морской воды благодаря возможности получать гидраты при температуре выше 0°C в присутствии газа, что невозможно при заморозке воды с целью получения очищенного льда и рапы. Последующее плавление гидрата позволяет повторно использовать высвободившийся газ. Одними из основных проблем гидратного метода опреснения морской воды являются высокое индукционное время и давление. Для ускорения гидратообразования могут быть использованы различные методы и промоторы. Было показано, что пропан, являясь гостем-помощником, ускоряет кинетику гидратообразования [3] и снижает давление гидратообразования [4]. При этом влияние наличия затравки гидрата на динамику роста гидрата и величину индукционного времени практически не исследовалось.

Целью данной работы является изучение процесса гидратообразования на примере сверх насыщенных растворов смеси тетрафторида углерода (CF_4) и пропана (C_3H_8) на основе чистой и морской воды, а также изучение влияния затравки гидрата на скорость образования гидрата, при помощи метода молекулярной динамики.

Моделирование выполнено при помощи программного пакета LAMMPS. Описания моделей воды, пропана, тетрафторида углерода и ионов солей приведены в работах [5–8], соответственно. Концентрация морской соли была выбрана равной реальной. Стартовое распределение молекул пропана и тетрафторида углерода в растворе было получено случайным образом, что позволило получить близкий к однородному раствор газовой смеси. Концентрация молекул газа составляла 0.33 (~5.5 моль%) и 0.5 (~8.1 моль%) от полного заполнения всех полостей при полном переходе раствора в гидратную фазу.

Соотношение числа молекул тетрафторида углерода к числу молекул пропана составило 2:1 в связи с тем, что пропан может заполнять только большие полости $5^{12}6^4$ структуры КС-II [1], а тетрафторид углерода способен заполнять полости $5^{12}6^2$ КС-I, которые обладают меньшим объёмом, а также полости 5^{12} при высоком давлении [9]. Исследование велось при температуре 270 K (температура плавления льда в выбарной модели воды) в области давления 1–100 МПа.

Были рассчитаны динамики изменения числа полостей, образующихся в растворе, а также параметры порядка F_3 (оценка степени кристалличности ближнего порядка молекул воды, [10]) и F_4 (оценка степени кристалличности величин торсионных углов между молекулами воды, [11]). Показано ускорение динамики роста гидрата газовой смеси « $\text{CF}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$ » при наличии гидратной затравки, а также отсутствие влияния морской соли на этот процесс.

Список литературы

- Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases // Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2008. 752 p.
- Kosyakov V.I., Polyanskaya T.M. Using structural data for estimating the stability of water networks in clathrate and semiclathrate hydrates // J. Struct. Chem. 1999. V. 40. P. 239–245.
- Babu P., Kumar R., Linga P. Unusual behavior of propane as a co-guest during hydrate formation in silica sand: Potential application to seawater desalination and carbon dioxide capture // Chem. Eng. Sci. 2014. V. 117. P. 342–351.
- Zhang S.X., Chen G.J., Ma C.F., et al. Hydrate formation of hydrogen+ hydrocarbon gas mixtures // J. Chem. Eng. Data. 2000. V. 45, No. 5. P. 908–911.
- Abascal J.L.F., Sanz E., García Fernández R., et al. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice // J. Chem. Phys. 2005. V. 122, No. 23. Paper 234511.
- Tanaka H. The thermodynamic stability of clathrate hydrate. III. Accommodation of nonspherical propane and ethane molecules // J. Chem. Phys. 1994. V. 101, No. 12. P. 10833–10842.
- Tanaka H. The stability of Xe and CF_4 clathrate hydrates. Vibrational frequency modulation and cage distortion // Chem. Phys. Lett. 1993. V. 202, No. 5. P. 345–349.
- Cygan R.T., Liang J.J., Kalinichev A.G. Molecular models of hydroxide, oxyhydroxide, and clay phases and the development of a general force field // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108, No. 4. P. 1255–1266.
- Sugahara K., Yoshida M., Sugahara T., et al. High-pressure phase behavior and cage occupancy for the CF_4 hydrate system // J. Chem. Eng. Data, 2004. V. 49, No. 2. P. 326–329.
- Baez L.A., Clancy P. Computer Simulation of the Crystal Growth and Dissolution of Natural Gas Hydrates // Ann. N. Y. Acad. Sci. 1994. V. 715. P. 177–186.
- Rodger P.M., Forester T.R., Smith W. Simulations of the methane hydrate/methane gas interface near hydrate forming conditions // Fluid Ph. Equilibria. 1996. V. 116, P. 326–332.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 21-52-52001)*

РАСЧЁТ КРИВОЙ ПЛАВЛЕНИЯ ГИДРАТА CO₂ МЕТОДОМ РЕШЁТЧНОЙ ДИНАМИКИ С РАЗЛИЧНЫМИ МОДЕЛЯМИ МОЛЕКУЛ H₂O И CO₂

Гец К.В.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: rav@niic.nsc.ru

Залежи гидрата природного газа являются могут стать важным источником энергии в будущем, т. к. запасы соединений углерода в них значительно превышают запасы во всём ископаемом топливе [1]. Замена, содержащегося в этих гидратах метана на углекислый газ также рассматривается как перспективная технология в связи с поиском эффективного решения проблемы изменения климата. Образование гидрата метана происходит при более высоком давлении, что позволяет найти условия, при которых разрушение гидрата метана сопровождается образованием гидрата углекислого газа [2]. С точки зрения геологической безопасности такая замена тоже весьма удобна, т. к. структуры гидратов метана и углекислого газа практически не отличаются [3]. Однако, достаточно важным недостатком данной методики оказался низкий процент замены метана на углекислый газ (~30% вместо прогнозируемых 70%) в условиях океанического шельфа [4, 5]. Теоретические исследования проводятся для уточнения условий образования/разложения гидратов и поиска оптимальных термодинамических условий для проведения замены метана на углекислый газ, однако важным недостатком является широкий набор потенциалов, описывающих как молекулы воды, так и молекулы газа, что не позволяет достаточно точно задать направление для экспериментальных исследований.

В данной работе проводится сравнение различных потенциалов, описывающих воду и углекислый газ при теоретическом исследовании перехода «гидрат CO₂ – вода + газообразный/жидкий CO₂» методом решёточной динамики с результатами экспериментальных исследований. Целью работы является определение наиболее точных потенциалов для описания фазовой диаграммы гидрата углекислого газа.

Теоретическое исследование Р-Т диаграммы гидрата проводится с помощью комбинации методов решёточной и молекулярной динамик. Структура решётки хозяина кубической структуры I состоит из 46 молекул воды, образующих шесть больших 5¹²6² и две малых 5¹² полости. Для описания молекул воды используются модифицированный потенциал SPC/E, как показавший наибольшую точность при исследованиях методом молекулярной динамики [6], и потенциал TIP4P/Ice, наиболее точно воспроизводящий фазовую диаграмму воды [7]. Для описания молекул углекислого газа использовались одноточечный потенциал OPLS-AA [8] и полноатомный EPM2 [9]. При помощи метода сопряженных градиентов были получены структуры гидратов с различным объёмом.

При помощи метода молекулярной динамики в квазигармоническом приближении были рассчитаны колебательный спектр структур и свободная энергия Гельмгольца, из которых были рассчитаны уравнения состояния, энергия Гиббса и химические потенциалы компонентов. Из равенства химических потенциалов находились условия термодинамического равновесия. Были построены линии моновариантного равновесия «гидрат — газ/сжиженный газ – вода/лёд». Сравнение с экспериментальными данными позволило выявить комбинацию потенциалов, дающих наиболее точные результаты для метода решёточной динамики.

Исследования коэффициента заполнения показало, что на одну элементарную ячейку гидрата КС-I число молекул гостей составило 7, что результатам экспериментального исследования заполнения больших 5¹²6² и малых 5¹² полостей [10, 11].

Список литературы

1. Chong Z.R., Yang S.H.B., Babu P., et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges // *Appl. Energy*. 2016. V. 162. P. 1633–1652.
2. Sloan E.D., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases* // Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2008. 752 p.
3. Koh D.-Y., Kang H., Lee J.-W., et al. Energy-efficient natural gas hydrate production using gas exchange // *Appl. Energy*. 2016. V. 162. P. 114–130.
4. Chen Y., Gao Y., Zhao Y., et al. Experimental investigation of different factors influencing the replacement efficiency of CO₂ for methane hydrate // *Appl. Energy*. 2018. V. 228. P. 309–316.
5. Wu G., Tian L., Chen D., et al. CO₂ and CH₄ hydrates: replacement or cogrowth? // *J. Phys. Chem. C*. 2019. V. 123, No. 22. 13401–13409.
6. Belosludov R.V., Zhdanov R.K., Bozhko Y.Y., et al. Lattice Dynamics Study of the Thermal Expansion of C₃H₈-, CH₄-, CF₄-, CO₂-, Xe-, and N₂-Hydrates // *Energy Fuel*. 2020. V. 34, No. 10. P. 12771–12778.
7. Abascal J.L.F., Sanz E., García Fernández R., et al. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice // *J. Chem. Phys.* 2005. V. 122, No. 23. Paper 234511.
8. Fomin V.V. NASA Technical Memorandum NASA TM-75655 // Washington, 1979. 1–67.
9. Harris J.G., Yung K.H. Carbon dioxide's liquid-vapor coexistence curve and critical properties as predicted by a simple molecular model // *J. Phys. Chem.* 1995. V. 99, No. 31. P. 12021–12024.
10. Henning R.W., Schultz A.J., Thieu V., et al. Neutron diffraction studies of CO₂ clathrate hydrate: formation from deuterated ice // *J. Phys. Chem. A*. 2000. V. 104, No. 21. P. 5066–5071.
11. Udachin K.A., Ratcliffe C.I., Ripmeester J.A. Structure, composition, and thermal expansion of CO₂ hydrate from single crystal X-ray diffraction measurements // *J. Phys. Chem. B*. 2001. V. 105, No. 19. P. 4200–4204.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00428)*

ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ ОТ СОПЛА ДО ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Губанова Т.А.¹, Забиров А.Р.^{1,2}, Ягов В.В.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

e-mail: gubanova.ta@mail.ru

Процесс кипения является достаточно значимым для техники в настоящее время. Тепловая и атомная энергетика, химические и пищевые технологии, медицина, охлаждение электронного оборудования, авиа и космические технологии – и это далеко не все сферы применения данного процесса. В связи с этим, данной теме посвящено огромное количество теоретических и прикладных работ. Впервые процессы охлаждения шаров при определенных режимах кипения были рассмотрены в целях изучения механизмов такого явления, как «паровой взрыв» (Д. Кеннинг, Г. Хьюитт [1]). В настоящее время исследования достаточно актуальны для анализа условий послеаварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора. Без сомнений остается то, что разработка качественной теории, описывающей данные процессы, позволит управлять технологиями заковки металлических изделий.

Более 30 лет назад был обнаружен особый режим кипения – микропузырьковое кипение. Исследования показали, что интенсивность охлаждения в этом режиме на порядок выше, чем при обычном пленочном кипении насыщенной жидкости, что говорит о существенной разнице между этими процессами. Микропузырьковое кипение происходит на твердой поверхности, нагретой до температуры, намного превышающей температуру предельного перегрева жидкости T_{lim} , и при охлаждении именно в недогретой жидкости. В данном случае образуется устойчивая паровая пленка и контакт между поверхностью и жидкостью просто невозможен. Тогда возникает вопрос о происхождении настолько высоких тепловых потоков. В связи с этим выдвигается утверждение о неустойчивости паровой пленки в действительности. Было предположено, что причина случайной неустойчивости пленочного кипения может заключаться в перемешивании жидкости [2]. Эксперименты показали, что даже небольшое перемешивание может оказать существенное влияние на процесс. Но, опять же, в условиях недогрева жидкости до температуры насыщения. Эксперименты были проведены с помощью устройства, позволяющего вводить струю жидкости на охлаждаемую поверхность при той же температуре, что и в резервуаре. Контролируемое по мощности возмущение проявляет эффект вблизи границы раздела пар – жидкость, который и вызывает неустойчивость паровой пленки при кипении.

По данным множества работ этой тематики одним из основных параметров, оказывающих существенное влияние на качественные и количественные характеристики теплоотдачи при кипении на металлической поверхности в условиях вынужденного течения жидкости, является расстояние L от сопла до охлаждаемой поверхности (см. рис. 1).

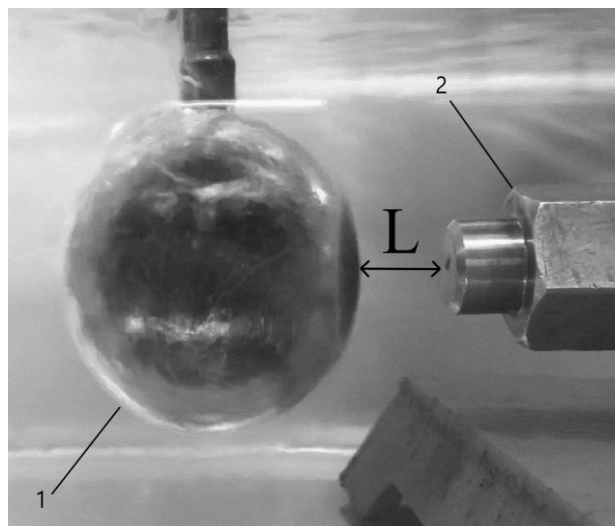


Рис. 1. 1 – рабочий участок (охлаждаемая поверхность); 2 – сопло, входящее в состав устройства для впрыска жидкости.

Для свободной струи эффект увеличения расстояния от сопла до нагретой пластины очень похож на эффект увеличения скорости струи. Тепловые потоки возрастают по мере уменьшения расстояния между соплом и поверхностью. В случае затопленной струи кажется, что кипение пленки начинается при более низкой температуре поверхности, когда расстояние увеличивается. Интенсивность процесса кипения заметно не зависит от расстояния [3].

Представлены новые экспериментальные данные об интенсивности процесса охлаждения на поверхности циркониевого шара в недогретом 95,5 % этаноле при воздействии затопленной струи. При проведении экспериментов также изменялось расстояние от среза сопла до охлаждаемой поверхности. Сделан вывод о влиянии расстояния на теплообмен при кипении в условиях вынужденного течения жидкости.

Список литературы:

1. Aziz, S., Hewitt, G. F. and Kenning, D. B. R., "Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres", International Heat Transfer Conference Digital Library, Begel House Inc., 1986.
2. Moreaux, F., Beck, G., and Archambault, P., Effect of workpiece surface properties on cooling behavior, in Quenching Theory and Technology, Liscic, B., Tensi, H.M., Canale, L.C.F., and Totten, G.E., Eds., Boca Raton, FL: CRC, 2010, P. 289.
3. Robidou, H., Auracher, H., Gardin, P., & Lebouché, M., "Controlled cooling of a hot plate with a water jet", Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, V. 26, No. 2-4, P. 123-129.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-79-10363)

МЕХАНИЗМ РОСТА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ ПРИ ЕГО ДЕКОМПРЕССИИ С КОНЕЧНОЙ СКОРОСТЬЮ

Давыдов М.Н.^{1,2}, Чернов А.А.^{1,3}, Пильник А.А.^{1,3}

¹ Новосибирский государственный университет

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: davydov@hydro.nsc.ru

В работе решается задача о росте одиночного газового пузырька в объеме однородного газонасыщенного магматического расплава, который подвергается декомпрессии с конечной скоростью. Рассматриваются случаи как быстрой, так и медленной декомпрессии.

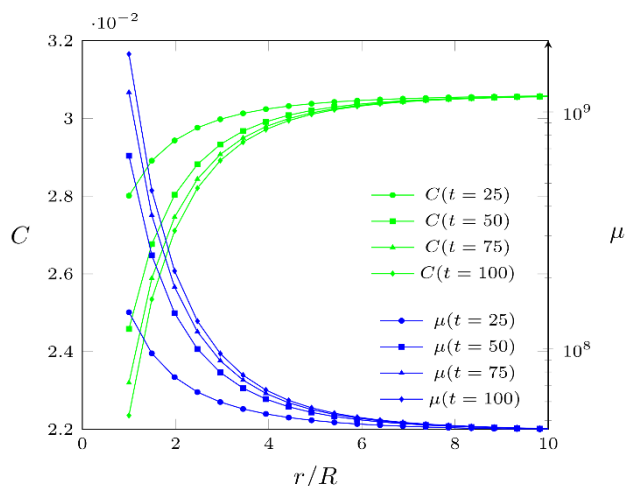
Предполагается, что в результате декомпрессии в объеме расплава зарождается газовый пузырек, который в дальнейшем растет вследствие как продолжающегося падения давления, так и диффузии газа из окружающей жидкости при различных сопутствующих явлениях. Процесс роста пузырька можно условно разделить на три стадии: инерционную, когда давление в пузырьке по мере его роста приблизительно равно начальному; переходную, характеризующуюся падением давления в пузырьке (в результате чего на межфазной границе нарушается условие равновесия, что приводит к возникновению в жидкости диффузионных процессов); и асимптотическую диффузионную, когда давление газа в пузырьке практически выравнивается с давлением окружающей жидкости, и рост пузырька происходит исключительно в результате диффузии.

Рассматриваемая задача решалась методом последовательных приближений, суть которого заключается в следующем. Сначала совместно решаются уравнения динамики и диффузии в слое вокруг пузырька. Затем находятся градиенты концентрации и давления на межфазной границе, которые подставляются в уравнение материального баланса. Определяется вклад того или иного эффекта (модель позволяет учитывать различные эффекты, такие как термо- и бародиффузию) в интенсивность массоотдачи. Давление и градиент давления на границе пузырька находятся в пренебрежении инерционными членами и лапласовским давлением, вследствие высокой вязкости среды в пограничном слое. Градиент вязкости жидкости на границе пузырька при этом выражается через градиент концентрации.

Краевая задача решалась с использованием безразмерного относительного радиуса пузырька (своего рода лагранжева переменная, в которой межфазная граница неподвижна). Это позволило редуцировать исходную задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Полученное в рамках данного подхода решение хорошо описывает динамику роста пузырька в широком диапазоне достигаемых в результате декомпрессии пересыщений и на всех стадиях процесса, включая неравновесную, учет которой крайне необходим, если рассматривать высоковязкие магматические расплавы. Показано, что на больших временах рост пузырька

носит автомодельный характер и определяется исключительно диффузией. Сделан вывод от о том, что использование квазистационарного решения во всем диапазоне начальных пересыщений и на всех временах рассматриваемого процесса некорректно.

В полной постановке для риолитового магматического расплава, подвергающегося декомпрессии с постоянной скоростью, процесс роста газового пузырька был также исследован численно. Уравнения диффузии и массового баланса решались с использованием явной схемы по времени и второго порядка по пространству, а уравнение динамики пузырька - по схеме Рунге-Кутты-Мерсона 4-го порядка. Показано хорошее соответствие решений, полученных аналитически и численно.



На рисунке представлено распределение концентрации газовой фазы и вязкости среды вокруг пузырька в относительных координатах в различные моменты времени. Хорошо заметен выход на автомодельный режим роста, характеризующийся приближением к некому установившемуся распределению.

Список литературы

1. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Physics of Fluids*. 2014. V. 26, № 11. P. 116602.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V., Pakhomov M.A. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 123. P. 1101-1108.

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00092)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ МЕТАН + ПРОПАН МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Жданов Р.К.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: gets@niic.nsc.ru

Проблема доступа к чистой воде является достаточно острой общемировой проблемой, которая не обошла стороной и некоторые регионы России. Самым оптимальным способом получения чистой воды считается опреснение соленой морской воды. Для этих целей уже используется множество различных методов, например, системы фильтров основанных на обратном осмосе или криогенное опреснение: замораживание морской воды с последующим плавлением полученного льда. Как развитие криогенного метода был предложен гидратный метод опреснения, при котором происходит образование газового гидрата вместо льда. Такой подход позволяет сделать процесс опреснения менее энергозатратным и более эффективным, но требуется решить проблему кинетики образования гидратов и выбора оптимального состава газовой фазы для получения гидратов.

Клатратными гидратами называются кристаллические соединения включения, образованные молекулами воды, которые образуют каркас, связанной водородными связями, и молекул газа которые включены в полости каркаса [1]. Типичными условиями для образования гидратных соединений являются низкие температуры и/или высокие давления. К настоящему времени известно множество регионов в которых можно найти природные газовые гидраты: океанические отложения на шельфе, области вечной мерзлоты, донные области некоторых озер, более того, они могут образовываться и в газо- и нефтепроводах, что порой сильно усложняет их безопасную эксплуатацию. Газовые гидраты имеют не только научный интерес, но и широкий диапазон практического применения, они могут быть использованы для транспортировки газов, в частности природного газа, разделения газовых смесей, опреснения морской воды, как было отмечено ранее, более того, запасы природного газа в гидратной формы в будущем могут стать основным источником данного вида топлива. Несмотря на долгую историю исследования ряд проблем до сих пор остается актуальными, в частности, проблема медленной кинетики образования газовых гидратов, а так же, связанная с ней, проблема механизма образования гидратов.

В данной работе нами исследовалась эволюция сетки водородных связей молекул H₂O по мере перехода жидкой фазы воды с растворенным газом в фазу гидрата. В качестве газовой фазы рассматривалась смесь метан + пропан в молярном отношении 2:1, по соотношению малых и больших полостей в структуре гидрата КС-II. Для этих целей нами использовались методы молекулярной динамики, реализованные в пакете LAMMPS. Было создано 4 различных модельные системы: с гидратной заправкой (смежные

большая и малая полости КС-II) и ионами соли (Na⁺, Cl⁻), без гидратной заправки, но с ионами соли, с гидратной заправкой и с ионами соли, без гидратной заправки и без ионов соли. Все модельные системы содержали 1200 молекул воды, 35 молекул пропана и 70 молекул метана, что позволит перевести половину молекул воды в гидратную фазу при полном заполнении больших и малых полостей. Концентрация ионов соли: 1 пара на 100 молекул воды (ввиду низкой концентрации ионов Mg²⁺, SO₄²⁻, Ca²⁺, K⁺ в морской воде они не рассматривались). Молекула воды описывалась потенциалом TIP4P/Ice [2], остальные частицы рассматривались в одночастичном приближении [3-4].

По результатам моделирования было показано, что добавление пропана в газовую фазу ускоряет рост гидрата в сравнении с ростом гидрата в системе «вода + метан», при этом наблюдается образование не только больших полостей 5¹²6⁴, свойственных структуре КС-II, но и полостей 5¹²6² и 5¹²6³. На начальных этапах происходит образование малых 5¹² полостей, затем больших полостей, при этом время между началом образования малых и больших полостей для системы «вода + метан + пропан» меньше, чем для «вода + метан». Добавление ионов соли не сказывается существенно ни на скорость роста гидрата, ни на время индукционное время, ионы соли влияют только на давление образования гидрата. Наличие заправки в системе позволяет получить более структурированный рост гидрата в объеме, т. е. с менее искаженной кристаллической решеткой, без гидратной заправки на начальном этапе образуется достаточно много не гидратных полостей, которые по мере нарастания гидрата трансформируются в малые или большие полости гидрата.

Список литературы

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2008. 752 p.
2. Abascal J.L.F., Sanz E., García Fernández R., et al. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice // J. Chem. Phys. 2005. V. 122, No. 23. Paper 234511.
3. Zeron I.M., Abascal J.L.F., Vega C. A force field of Li⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, and SO₄²⁻ in aqueous solution based on the TIP4P/2005 water model and scaled charges for the ions // J. Chem. Phys. 2019. V. 151, No. 13. Paper 134504.
4. Martin M.G., Siepmann J.I. Transferable potentials for phase equilibria. 1. United-atom description of n-alkanes // J. Phys. Chem. B. 1998. V. 102, No. 14, P. 2569–2577.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 21-52-52001 МНТ_а)*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ИЗ НЕРАВНОВЕСНОГО РАСТВОРА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДЕ

Жданов Р.К.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: rav@niic.nsc.ru

Газовые гидраты – это кристаллические соединения включения, образованные включением молекул газа в полости каркаса, образованным молекулами воды [1]. К наиболее распространенным газам, образующим гидраты, можно отнести легкие углеводороды, углекислый газ, азот, сероводород и их смеси. Для образования данных соединений требуется соблюдение определенных термодинамических условий, обычно это высокое давление и/или низкая температура. В природе данные условия можно обнаружить, например, в районах вечной мерзлоты или на шельфе. Из-за высокого удельного содержания газа гидраты можно рассматривать как перспективные материалы для хранения и перевозки газов. Более того, из-за наличия огромных запасов природного газа в гидратной форме, в будущем данные залежи будут служить важным источником углеводородов, особенно после исчерпания классических газовых месторождений. Среди прочих областей применимости газовых гидратов стоит отдельно отметить возможность разделения газовых смесей гидратным методом, в частности отделение парниковых газов, с последующим их захоронением, в промышленных процессах, опреснение морской воды, использование в качестве эффективного хладагента. Несмотря на большое количество преимуществ нельзя не отметить до сих пор не до конца решенную проблему относительно медленной кинетики образования газовых гидратов. Скорость образования гидратов сильно зависит от величины переохлаждения системы, избыточного давления, отношения компонентов системы и наличия/отсутствия дополнительных компонент, выступающих промоторами гидратообразования. Если влияние температуры и давления исследовано достаточно хорошо, то зависимость параметров роста гидрата от концентрации газа в системе до сих пор изучено слабо.

В данной работе мы провели исследование влияния концентрации углекислого газа, предварительно растворенного в водной фазе, на гидратообразование методами молекулярной динамики. Для моделирования была сконструирована система, состоящая из 1000 молекул воды с различным количеством молекул углекислого газа, равномерно распределенных по объему модельной ячейки. Молекула воды описыва-

лась потенциалом TIP4P/Ice [2], т.к. этот потенциал дает наиболее близкую к экспериментальной линию плавления льда. Для описания молекулы CO₂ была выбрана полноатомная модель, основанная на потенциале OPLS-AA [3]. Количество молекул газа варьировалось от нуля до 174, что соответствует концентрации газа в гидрате с полным однократным заполнением всех полостей структуры КС-I. Моделирование проводилось при давлении 100 бар в диапазоне температур пакетом LAMMPS.

Было показано, что при данных условиях можно получить стабильный раствор углекислого газа в воде с концентрацией, значительно превышающей равновесное значение при данных термодинамических условиях. Однако, имеется максимальная концентрация CO₂, превышение которой приводит к расслоению раствора на отдельно газовую фазу CO₂ в виде наноразмерного пузыря и водной фазы с равновесной концентрацией углекислого газа. При рассмотренных температурах и давлениях возможно образование гидратов углекислого газа, что и наблюдалось, но не для всего диапазона концентраций CO₂ в водной фазе. Было обнаружено, что при расслоении системы не наблюдается роста гидратов за времена моделирования (100 нс), так же как и при достаточно низком содержании молекул углекислого газа в воде (менее 6 моль%). Подобное поведение обнаруживалось ранее для случая раствора метана в воде [4]. При остальных концентрациях наблюдается уверенный быстрый рост гидрата. Рост гидратов при этом начинается в первые 100 нс моделирования.

Список литературы

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2008. 752 p.
2. Abascal J.L.F., Sanz E., García Fernández R., et al. A potential model for the study of ices and amorphous water: TIP4P/Ice // J. Chem. Phys. 2005. V. 122, No. 23. Paper 234511.
3. Harris J.G., Yung K.H. Carbon Dioxide's Liquid-Vapor Coexistence Curve and Critical Properties As Predicted by a Simple Molecular Model // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. P. 12021-12024.
4. Guo G.J., Rodger P.M. Solubility of Aqueous Methane under Metastable Conditions: Implications for Gas Hydrate Nucleation // J. Phys. Chem. B. 2013. 117. P. 6498–6504.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00428)*

КИПЕНИЕ В ПЛОСКИХ МИНИ- И МИКРОКАНАЛАХ С НЕОДНОРОДНЫМ НАГРЕВОМ

Зайцев Д.В., Белослудцев В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: zaitsev@itp.nsc.ru

Кипение является одним из самых эффективных и простых методов отвода высоких тепловых потоков. Кипение достаточно широко изучено в большом объеме и активно ведется исследование проточного кипения в каналах. Актуальность исследования проточного кипения в микро-каналах связана с задачами охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования. Данная проблема является одним из основных препятствий для создания нового поколения высокопроизводительных процессоров с трехмерной интеграцией.

В работе выполнены систематические исследования динамики пузырей и теплообмена при кипении в мини- и микроканалах высотой от 0,2 до 3 мм при различном недогреве рабочей жидкости. Эксперименты проводились при различных размерах нагревателя со стороны стенки 3 и 10 мм в двух основных конфигурациях – с однородным нагревом (ширина потока совпадает с шириной нагревателя) и с неоднородным нагревом (ширина потока рабочей жидкости больше ширины нагревателя). Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки (до 1 кВт/см^2 с нагревателя $10 \times 10 \text{ мм}$).

При помощи высокоскоростной камеры выполнена визуализация процесса кипения при однородном, и неоднородном нагреве. При относительно низкой температуре перегрева стенки до $40\text{--}50^\circ\text{C}$ наблюдается пузырьковый режим кипения, а при повышении температуры перегрева стенки, как правило, за один-два шага по тепловому потоку, проявлялся неустойчивый режим кипения, характеризующийся осцилляциями большого парового пузыря на поверхности нагревателя (Рис. 1). Не обнаружено существенного влияния температуры недогрева воды в диапазоне $25\text{--}75^\circ\text{C}$ на качественную картину гидродинамики кипения. Частота осцилляций большого парового пузыря увеличивается с уменьшением высоты канала. При низких расходах воды в канале высотой 3 мм наблюдался так называемый режим кипения парового столба т.е. отсутствовали осцилляция большого парового пузыря. Стоит отметить, что при достаточно больших высотах канала от 2 мм при высоких расходах жидкости не наблюдался переход от пузырькового к осцилляционному режиму кипения вплоть до кризиса теплообмена.

Установлено, что, как в широком канале (неоднородный нагрев по ширине канала), так и в узком канале (однородный нагрев), с увеличением высоты канала в диапазоне 0.2–3 мм интенсивность теплообмена и критический тепловой поток существенно возрастают, рис.2. Выявлено снижение критического теплового потока для канала с однородным нагревом (узкий канал), рис. 2, что, по-видимому, вызвано более стесненными условиями течения в узком канале.

В докладе будут представлены результаты исследования кипения в каналах с однородным и неоднородным нагревом для воды, растворов ионных жид-

костей, а также диэлектрической жидкости HFE-7100. Так же будут представлены данные по визуализации процесса кипения и динамики отдельных пузырей с частотой съемки до 775 000 кадров в секунду.

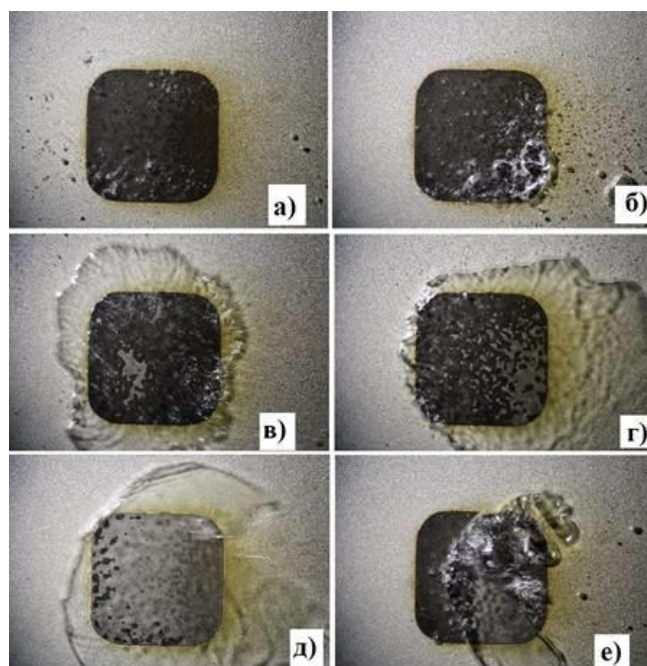


Рис. 1. Жизненный цикл осциллирующего парового пузыря.
 $h = 1 \text{ мм}$, вода, $G = 92,6 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $q = 246 \text{ Вт/см}^2$.

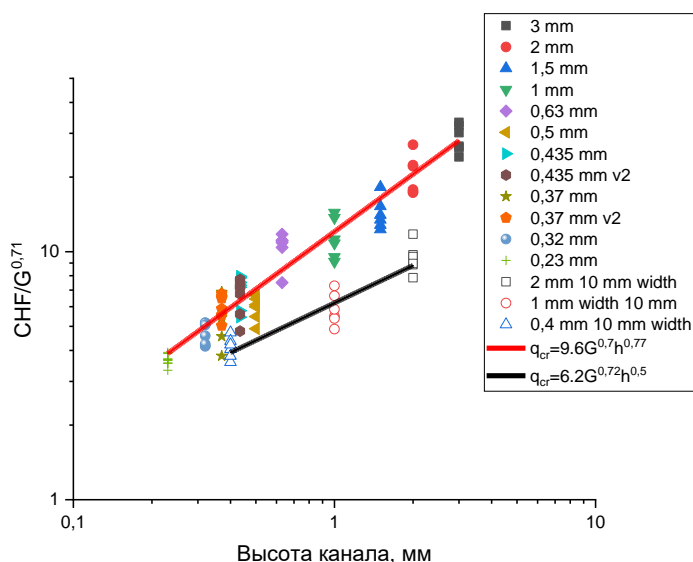


Рис. 2. Влияние высоты канала на критический тепловой поток (CHF) для однородного (черная линия) и неоднородным нагревом (красная линия).
Вода, размер нагревателя $10 \times 10 \text{ мм}$.

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

ВЛИЯНИЕ НАКАЧКИ НА ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИЕ ИМПУЛЬСЫ В ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И СКАЛЯРНЫМ ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА

Конобеева Н.Н., Трофимов Р.Р., Белоненко М.Б.

Волгоградский государственный университет, Волгоград

e-mail: yana_nn@volsu.ru

Как известно, параметр порядка – это величина, которая характеризует наличие в материальной среде упорядочения, возникающего при определенных физических условиях [1]. В качестве параметра порядка в зависимости от среды могут выступать следующие величины: спонтанная намагниченность (векторный параметр порядка) – у ферромагнетика, волновая функция куперовских пар (комплексный параметр порядка) – у сверхпроводника. Основным параметром порядка, используемый для характеристики сегнетоэлектрических свойств, это спонтанная поляризация. Неоднородное распределение данного параметра порядка наблюдается при нарушении однородности структуры сегнетоэлектриков [2].

При рассмотрении изотропных сред предложен метод определения величины параметра порядка (скалярного [3], так и векторного [4]) при помощи предельно короткого импульса. В настоящей работе изучается влияние скалярного параметра порядка на динамику импульса при его распространении в оптически анизотропной среде [5] с углеродными нанотрубками (УНТ) [6] с учетом облучения системы внешней электромагнитной волной накачки [7].

Для описания динамики системы используем уравнение движения, которое следует из теории фазовых переходов [8]:

$$\frac{dP}{dt} = -K_{\Gamma} \frac{\delta\Phi}{\delta P} \quad (1)$$

где K_{Γ} – кинетический коэффициент, P – параметр порядка (поляризация), Φ – плотность функционала свободной энергии, которая задается в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_0 + \alpha P^2 + \beta P^4 + \chi EP \quad (2)$$

Уравнение на компоненты векторного потенциала электрического поля:

$$\begin{cases} \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - \Gamma_x \frac{\partial A_x}{\partial t} = \Delta A_x + 4\pi \cdot j_x(A_x, A_y) \\ \frac{1}{v_e^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} - \Gamma_x \frac{\partial A_x}{\partial t} = \Delta A_x + 4\pi \cdot j_y(A_x, A_y) \end{cases} \quad (3)$$

здесь Γ_x , Γ_y описывают накачку электрического поля вдоль соответствующих направлений, (A_x, A_y) – ненулевые компоненты векторного потенциала, причем $E = -c^{-1} \partial A / \partial t$, (j_x, j_y) – компоненты плотности электрического тока, v_o , v_e – скорости обыкновенного и необыкновенного лучей в анизотропном кристалле, которые определяются через показатели преломления в направлении x и y соответственно.

Влияние накачки внешней электромагнитной волной на предельно короткий оптический импульс представлена на рис. 1.

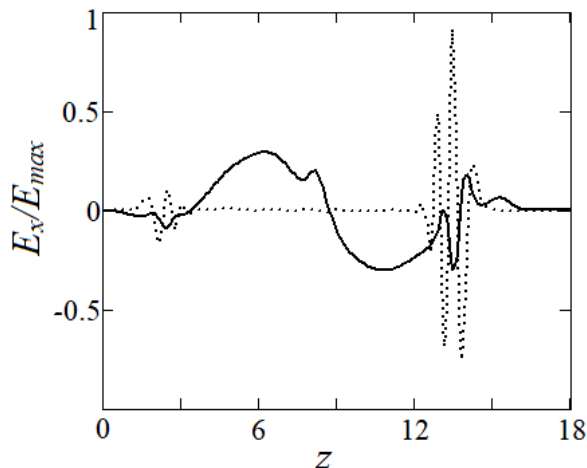


Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля для x -компоненты от координаты z : ($t=9$ отн. ед.): сплошная кривая соответствует случаю без усиления, точечная – с усилением. E_{max} – максимальное значение напряженности поля.

В результате проведенных исследований выявлено, что введение усиления приводит к стабилизации предельно короткого оптического импульса при его распространении в среде с анизотропными свойствами. Также показано, что динамика импульса может служить для определения точки фазового перехода.

Список литературы

1. Kleman M., Lavrentovich O.D. The Order Parameter: Amplitude and Phase. New York: Springer, 2003, P. 76–104.
2. Akdogđan E.K., Safari A. Thermodynamics of Ferroelectricity. Boston: Springer, 2008, P. 3–16.
3. Конобеева Н.Н., Белоненко М.Б. Влияние собственной нелинейности среды на распространение предельно коротких импульсов в массиве углеродных нанотрубок // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114(1). С. 173–176.
4. Konobeeva N.N., Skvortsov D.S. Modeling of two-dimensional light bullets propagation in an array of carbon nanotubes taking into account the mechanical tension and magnetic field // Mathematical Physics and Computer Simulation. 2020. V. 23 (3). P. 36–44.
5. Матвеев А.Н. Оптика. М. Высшая школа, 1985, 351 с.
6. Eitskii A.V. Carbon nanotubes, Physics-Uspexhi. 1997. V. 40 (9). P. 899–924.
7. Konobeeva N.N., Fedorov E.G., Rosanov N.N., Zhukov A.V., Bouffanais R., Belonebko M.B. Stabilization of ultrashort pulses by external pumping in an array of carbon nanotubes subject to piezoelectric effects // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 203103.
8. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука, 1982, 256 с.

Исследование выполнено за счет
гранта Президента РФ № МД-3173.2021.1.2
(соглашение 075-15-2021-337 от 20.04.2021)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПАРОВОЙ ФАЗЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ НАГРЕВА ЖИДКОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Левин А.А.^{1,2}, Сафаров А.С.^{1,2}, Чернов А.А.^{1,3}

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

³ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

e-mail: lirt@mail.ru

Описание динамики пузырька, окруженного недогретой жидкостью, является предметом ряда публикаций [1–5]. С другой стороны, разнообразие важных параметров и связанных с ними вопросов не позволяет создать общую единую теоретическую модель для всех возможных вариаций этого процесса. Поэтому для формирования гидродинамической картины в окрестности роста пузырька, его схлопывания и последующего образования быстро движущихся масс горячей жидкости потребовались как экспериментальные исследования, так и разработка теоретической модели. В основе этого подхода лежит гипотеза о сходстве между кипением, наблюдаемым при использовании лазерного нагрева биологических жидкостей, и кипением, вызванным образованием кумулятивной струи.

В [3] показано, что одним из ключевых факторов, влияющих на импульс струи горячей жидкости, является угол, под которым жидкость атакует ось оптического волокна (лазерного передатчика). Эта величина напрямую зависит от соотношения размера пузырька и диаметра волокна, что подтверждено численными расчетами [4]. Таким образом, наряду с тепловой картиной для изучения генерации затопленных струй под действием импульсного лазерного излучения в недогретой жидкости определяющим является взаимодействие жидкости с оптическим волокном, причем важны свойства этой системы и составляющих ее материалов. В данной работе рассматривается влияние геометрии торца волокна и некоторых теплофизических характеристик на поле скоростей при росте и схлопывании пузырька. В качестве граничного условия для математической модели были выбраны оцифрованные результаты оптического измерения размера пузырьков, полученные в физических экспериментах по кипению.

В работе представлены результаты численного моделирования динамики парового пузыря на конце оптического волокна, образующегося в результате поглощения водой энергии лазерного излучения. Построенная нами модель основана на применении модели Level-set, которая позволяет описать движение двух фаз (воды и пара) и положение границы раздела.

Для замыкающих соотношений использовались экспериментальные данные о формировании кумулятивной струи, возникшей в результате роста и последующего схлопывания парового пузыря на конце волокна. Показано, что сделанная нами ранее гипотеза об определяющем влиянии гидродинамической картины, а именно соотношения размера пузырька и диаметра волокна, подтвердилась численными расчетами. Определено влияние гидрофильности поверхности оптического волокна на амплитуду импульса кумулятивной струи. Влияние содержания солевых примесей на формирование струи оказалось предсказуемо малым из-за незначительного изменения вязкости водного раствора в диапазоне концентраций от 0 до 2% (применяемых в медицинской практике). В то же время существенное влияние оказывает температура жидкости ввиду существенного уменьшения ее вязкости при нагревании. В связи с этим возникает потребность в подробных эмпирических данных о температурном поле в окрестности растущего пузырька, получение которых при проведении физических экспериментов зачастую затруднено.

Список литературы

1. Gonzalez Avila, Silvestre Roberto and Ohl, Claus-Dieter. Fragmentation of acoustically levitating droplets by laser-induced cavitation bubbles // *Journal of Fluid Mechanics*, 2016. 805, 551–576.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Vladyko I.V., Lezhnin S.I. New semi-analytical solution of the problem of vapor bubble growth in superheated liquid // *Scientific Reports*, 2020. 10(1), 1652622570.
3. Chudnovskii V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 150, 119286.
4. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Levin A.A., Safarov A.S., Adamova T.P., Elistratov D.S. Laser-induced boiling of subcooled liquid: influence of the radiation power on the vapor bubble nucleation and growth: Laser-induced boiling of subcooled liquid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. 184. 122298.
5. Surtaev A., Serdyukov V., Malakhov I., Safarov A. Nucleation and bubble evolution in subcooled liquid under pulse heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 169, 120911.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 22-19-00092)*

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ КАЛОРИМЕТРЫ, МОДЕЛИРОВАННЫЕ В ФОРМЕ ШАРА:
ТЕПЛОВОЙ ЭКВИВАЛЕНТ, ПОВЫШЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННОСТИ**

Мацкевич Н.И.¹, Чернов А.А.²

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

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

e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

Твердотельные калориметры широко используются для определения теплоемкости, теплот фазовых переходов, теплот сгорания и др. [1–2]. В частности, в последнее время твердотельные калориметры нашли широкое применение в качестве болометров для поиска редких событий [2].

Однако, как известно, одной из проблем твердотельных калориметров является наличие градиентов температуры. В связи с этим встает вопрос об использовании традиционного метода теплового эквивалента для обработки результатов калориметрического опыта.

Ранее, в нашей работе [3] была рассмотрена модель твердотельного калориметра произвольной формы с двумя автоматически управляемыми адиабатическими оболочками. Было показано, что существует пропорциональность между количеством теплоты ($Q(P_q)$), выделяемом в точке P_q , и исправленным подъемом температуры ($\Delta T_{ob}(P_t)$), измеряемым в точке P_t . Было получено следующее соотношение:

$$\Delta T_{ob}(P_t) = Q(P_q) U_c(P_t, P_q) \left\{ \int_0^\infty [1 - U_1(P_t, t)] dt + F(u_1, u_2) \right\}^{-1}$$

Здесь: $U_c(P_t, P_q)$, $U_1(P_t, t)$ – характеристики калориметра, $F(u_1, u_2)$ – характеристика дифференциальных термодатчиков.

Входящая в вышеприведенное соотношение функция $U_c(P_t, P_q)$ зависит от конкретной формы калориметра. Для определения данной функции нет надобности решать нестационарную задачу, а достаточно решить стационарную задачу, то есть решить уравнение Лапласа для конкретной формы калориметра.

В настоящей работе мы рассмотрим твердотельный калориметр, моделированный в форме шара. Источник тепловыделения для простоты расположим в центре. Для данного калориметра, путем решения уравнения Лапласа, будет найден конкретный вид теплового эквивалента калориметра.

Для этого запишем уравнение Лапласа в сферических координатах.

$$\nabla^2 U_c = \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U_c}{\partial r} \right) = 0$$

Решение этого уравнения запишется следующим образом:

$$U_c = \left(\frac{1}{\alpha A} + \frac{R - r_t}{4\pi R \cdot r_t} \right)$$

Здесь: α – коэффициент теплоотдачи; A – поверхность; r_t – месторасположение термодатчика; R – радиус шара.

Как было показано [3], тепловой эквивалент калориметра можно найти, умножая функцию $1/U_c$ на

температуру охлаждения калориметра. Температуру охлаждения сферы равен:

$$k = \frac{a \cdot \mu_1^2}{R^2}$$

Здесь: $a = \lambda/C$, λ – коэффициент теплопроводности, C – полная теплоемкость калориметра-шара; μ_1 – наименьший корень трансцендентного уравнения: $\mu \operatorname{ctg} \mu = 1 - Bi$, где Bi – критерий Био, $Bi = \alpha \cdot R/\lambda$.

С учетом вышеизложенного, выражение для теплового эквивалента (H_e) шара можно записать следующим образом:

$$H_e = C / \left[\frac{\mu_1^2}{3} \left(1/Bi + \frac{R - r_t}{r_t} \right) \right]$$

Термоприемник может быть расположен в любой точке сферы. В зависимости от расположения термоприемника, тепловой эквивалент может, как увеличиваться, так и уменьшаться.

При этом можно подобрать такое положение термоприемника, когда тепловой эквивалент не зависит от условий теплообмена и равен полной теплоемкости калориметра. Для этого проведем следующие преобразования. Для случая слабого теплообмена со средой, разлагая выражение $\mu \operatorname{ctg} \mu$ в ряд, получим: $\mu^2 \approx$

$$3Bi \left(1 - \frac{1}{5} Bi \right).$$

И тогда можно записать:

$$H_e = C \left[1 - \frac{\mu_1^2}{3} \left(\frac{R - r_t}{r_t} - \frac{1}{5} \right) \right].$$

Как можно видеть из данного выражения, при расположении термоприемника в точке $r_t = \frac{5}{6}R$, тепловой эквивалент не зависит от условий теплообмена и равен полной теплоемкости калориметра-шара. Помещая термоприемник в данную точку, можно повысить прецизионность калориметра-шара.

Список литературы

1. Matskevich N.I., Shlegel V.N., Chernov A.A., Samoshkin D.A., Stankus S.V., Grigorieva V.D., Zaitsev V.P., Tkachev E.N. Heat capacity of lithium tungstate single crystal by DSC calorimetry data in the temperature range of 319–997 K // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2057. P. 012048.
2. Matskevich N.I., Shlegel V.N., Semerikova A.N., Samoshkin D.A., Grigorieva V.D., Stankus S.V., Kuznetsov V.A., Ponomareva S.A., Zaitsev V.P., Novikov A.Yu. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 12130–12136.
3. Мацкевич Н.И., Чернов А.А. Анализ модели твердотельного калориметра с двумя автоматически управляемыми адиабатическими оболочками // VI Всерос. Конф. «Теплофиз. Физ. Гидродинам.» Севастополь, 2021. С. 128.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00095-П)*

ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МОЛИБДАТОВ ЦЕЗИЯ И ЛИТИЯ

Мацкевич Н.И.¹, Чернов А.А.², Трифонов В.А.¹, Семерикова А.Н.¹, Самошкин Д.А.^{1,2}, Станкус С.В.², Шлегель В.Н.¹, Лукьянова С.А.¹, Кузнецов В.А.¹

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск

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

e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

Монокристаллы на основе молибдатов цезия и лития являются перспективными материалами для оптоэлектроники, микроэлектроники, оптической коммуникации, физики высоких энергий и других областей [1-3]. Они, в частности, хорошо зарекомендовали себя для исследований по поиску редких событий, таких как двойной безнейтринный бета распад и упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах. Для оптимизации процессов роста монокристаллов, для понимания процессов устойчивости и деградации, для определения границ областей применения необходимы всесторонние физико-химические, в частности, термодинамические, исследования монокристаллов.

В настоящей работе низкоградиентным методом Чохральского выращены кристаллы молибдата цезия (Cs_2MoO_4) и молибдата лития, замещенного цезием ($\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$).

Монокристалл Cs_2MoO_4 был выращен из собственного расплава. В качестве прекурсоров были использованы: высокочистый карбонат цезия (ОСЧ, ТУ 6-09-4759-79, 99.99%) и прошедший глубокую очистку оксид молибдена. Перед ростом монокристаллов проводили твердофазный синтез. Для этого тщательно перемешанные реактивы засыпали в платиновый тигель, нагревали до температуры 973 К и выдерживали несколько часов. Далее монокристаллы Cs_2MoO_4 выращивали на воздухе на неориентированные затравки.

Кристалл $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ был выращен из исходных компонентов: Li_2CO_3 (ОСЧ 20-2, ТУ 6-09-4757-84, Новосибирский завод редких металлов), глубоко очищенного MoO_3 и Cs_2MoO_4 (ТУ 6-09-04-80-82). Идентификацию кристаллов проводили методом рентгенофазового анализа.

Для определения теплоемкости использовали метод дифференциально-сканирующей калориметрии [4]. Измерения проводили на калориметре DSC 404 F1 со скоростью 6 К/мин в проточной атмосфере высокочистого аргона (99.992 об. %). Навеска кристалла $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ была взвешена на весах AND GH-252 с погрешностью 0.03 мг и составляла 73.32 мг. В качестве калибровочного образца использовали сапфир массой 85.28 мг.

Для определения энергетических характеристик монокристалла Cs_2MoO_4 , таких как стандартная энтальпия образования, энтальпия решетки, энергия стабилизации, был использован метод калориметрии растворения. Измерения проводились при температуре 298.15 К. Процедура измерений детально описана в работе [5].

Термохимический цикл был построен таким образом, что энтальпия растворения монокристалла Cs_2MoO_4 в 0.4 М КОН сравнивалась с энтальпией растворения оксида молибдена (MoO_3) и иона Cs^+ . Рассчитанная стандартная энтальпия образования Cs_2MoO_4 составляла: $\Delta_f H^0 = -1516.5 \pm 0.9$ кДж/моль.

На основе измеренной стандартной энтальпии образования с использованием цикла Борна-Габеры была рассчитана энтальпия решетки Cs_2MoO_4 : $\Delta_{\text{lat}} H^0 = -28510$ кДж/моль. Кроме того, была рассчитана энергия стабилизации: $\Delta_{\text{st}} H^0 = -425.4 \pm 1.9$ кДж/моль.

Измерения теплоемкости кристалла $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ проводили в интервале температур 320–710 К. Для определения теплоемкости было проведено 3 термических цикла. Данные всех трех нагревов хорошо совпадали между собой. Температурная кривая теплоемкости $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ изменяется плавно, то есть в исследуемом температурном интервале отсутствуют фазовые переходы. Теплоемкость третьего нагрева хорошо описывается кубическим полиномом: $C_p = 35.33138 + 0.51074T - 6.21588 \times 10^{-4} T^2 + 2.91805 \times 10^{-7} T^3$ (Дж/(К моль)). Отклонение аппроксимированных значений теплоемкости от экспериментальных не превышает 0.2%.

На основании величин по теплоемкости и энергии стабилизации можно заключить, что кристаллы Cs_2MoO_4 , $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ являются перспективными для применения, поскольку Cs_2MoO_4 является термодинамически устойчивым по отношению к распаду на простые оксиды, а $\text{Li}_{1.9}\text{Cs}_{0.1}\text{MoO}_4$ не имеет фазовых переходов в интервале температур 320–710 К.

Список литературы

- Xu F., Zhang G., Luo M., Peng G., Chen Y., Yan T., Ye N. // Natl. Sci. Rev. 2021. V. 8. P. 1–10.
- Matskevich N.I., Shlegel V.N., Semerikova A.N., Samoshkin D.A., Grigorieva V.D., Stankus S.V., Kuznetsov V.A., Ponomareva S.A., Zaitsev V.P., Novikov A.Yu. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 12130–12136.
- Kim H., Pandey I.R., Khan A., Son J.K., Lee M.H., Kim Y. Search for new molybdenum-based crystal scintillators for the neutrinoless beta decay search experiment // Crys. Res. Technol. 2019. V. 54. P. 1900079.
- Matskevich N.I., Shlegel V.N., Chernov A.A., Samoshkin D.A., Stankus S.V., Grigorieva V.D., Zaitsev V.P., Tkachev E.N. Heat capacity of lithium tungstate single crystal by DSC calorimetry data in the temperature range of 319–998 K // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2057. P. 012048.
- Matskevich N.I., Shlegel V.N., Sednev A.L., Semerikova A.N., Zaitsev V.P., Kuznetsov V.A., Novikov A.Yu., Zuev A.Yu. Thermodynamic characteristics of Li_2MoO_4 , $\text{Li}_2\text{W}_{0.85}\text{Mo}_{0.15}\text{O}_4$ single crystals and stability direction for alkali molybdates // J. Chem. Thermodynam. 2020. V. 143. P. 106059.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00095-П)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ТОЛЕРАНТНОЕ ТОПЛИВО АЭС

Молотова И.А.^{1,3}, Забиров А.Р.^{1,2,3}, Ягов В.В.¹, Виноградов М.М.¹, Молотов И.М.^{1,2}

¹ НИУ «Московский Энергетический Институт», Москва
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

³ ФБУ Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва
107140, Россия, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5

e-mail: Irina_molotova1705@mail.ru

После произошедшей аварии на АЭС «Фукусима Дайичи» были начаты научные исследования, направленные на исключение или смягчение парциркумиевой реакции, которая возникает при взаимодействии разогретых до высоких температур циркониевых оболочек твэлов (1200–1400°C) с парами воды при запроектных авариях на АЭС. Одно из направлений таких исследований связано с созданием новых материалов, используемых для изготовления топливной матрицы и оболочек твэлов, так называемое «толерантное топливо» (Accident Tolerant Fuel) [1]. До промышленного внедрения толерантного топлива в действующие энергетические реакторы требуется проведение исследований по изучению его характеристик, в том числе при поставарийном заливе активной зоны реактора, в случае которого необходимо добиться быстрого перехода от пленочного кипения к более интенсивным режимам охлаждения. Свойства теплоотдающей поверхности имеют при этом важное значение.

Проводимые экспериментальные исследования направлены на изучение теплообмена при охлаждении металлических цилиндрических тел, выполненных из различных металлов. Образцы имеют полированную или модифицированную поверхность (с нанесением покрытий с различными теплофизическими свойствами и шероховатостью). Температура в образцах измеряется в центре и вблизи с поверхностью с использованием термодатчиков, установленных внутри цилиндров. Процесс проведения экспериментов по охлаждению высокотемпературных цилиндров описан в работе [2]. В результате экспериментов получены зависимости температур от времени – термограммы охлаждения, пример которых представлен на рис. 1.

Результаты экспериментальных исследований используются для проверки физической модели возникновения высокоинтенсивного режима охлаждения [3], разработанной в 2018 г. и усовершенствованной в 2019 г. для учета влияния шероховатости поверхности:

$$T_w - T_{lim} = C_4 \sqrt{\frac{\rho_{liq} \lambda_{liq} (T_{lim} - T_s) h_{LG}}{(\rho c \lambda)_w}} \left(R_a \left(\left(\frac{g \Delta \rho h_{LG}}{\lambda_w \nu \Delta T z} \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{h_{LG}}{\lambda_w \Delta T} \sqrt{\frac{\rho_{liq} \rho_v g \beta \Delta T_{sub} z}{Pr_{liq}}} \right) \right)^n$$

T_{lim} – температура предельного перегрева жидкости; C_4 – численная константа; ρ , c , λ – плотность, теплоемкость, теплопроводность; T_s – температура насыщения жидкости; h_{LG} – теплота парообразования; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; g – ускорение свободного падения; z – линейный мас-

штаб; ν – вязкость; $\Delta T = T_{tr} - T_{lim}$, T_{tr} – температура поверхности, при которой начинается интенсивное охлаждение; β – коэффициент термического расширения жидкости; ΔT_{sub} – недогрев жидкости до температуры насыщения; Pr – число Прандтля. Индексы w , v , liq относятся к поверхности, пару и жидкости.

Получен большой массив данных, в том числе по охлаждению образцов из сплава FeCrAl, являющегося материалом толерантного топлива применительно к оболочкам твэлов. Экспериментальные значения температур перехода к высокоинтенсивному режиму охлаждения находятся в интервале $\pm 30\%$ от рассчитанных по указанной модели значений. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на проведении экспериментов на образцах, выполненных из других материалов толерантного топлива (циркония с хромовым покрытием, сплава 42ХНМ, SiC).

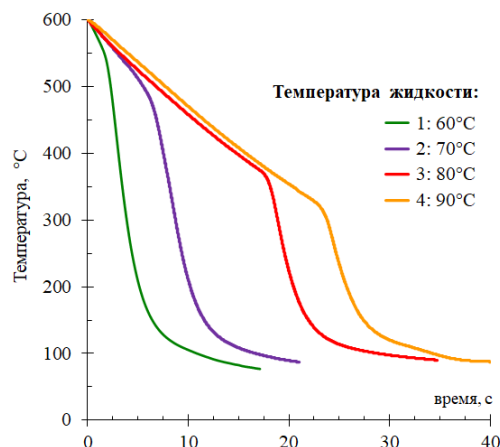


Рис. 1. Термограммы охлаждения цилиндра из сплава FeCrAl в воде с различными недогревами до температуры насыщения.

Список литературы

1. Zinkle S. J. et al. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – Т. 448. – №. 1–3. – С. 374–379.
2. Zabirov A. R., Yagov V. V., Kalita V. I., Radyuk A. A., Molotova I. A., Belyaev I. A. Heat transfer under quenching of cylindrical bodies in subcooled liquids // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Т. 383. – С. 111380.
3. Yagov V. V., Zabirov A. R., Kanin P. K. Heat transfer at cooling high-temperature bodies in subcooled liquids // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 126. – С. 823–830.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-79-10363)

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ТЕПЛООТДАЧУ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ

Морской Д.Н., Кукшинов Н.В., Хлопов А.Д., Французов М.С., Чирков А.Ю.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: seaperson@mail.ru

Работа современных центральных и графических процессоров сопровождается большим тепловыделением [1]. Наиболее эффективной является система охлаждения, в которой процессоры помещены в диэлектрическую жидкость, отводящую теплоту от чипов посредством фазового перехода. Образующиеся при этом пары теплоносителей необходимо сконденсировать, а конденсат вернуть в объем теплоносителя. При разработке систем двухфазного охлаждения нужно учитывать влияние угла наклона поверхности конденсации на коэффициент теплоотдачи.

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния угла наклона гладкой теплообменной поверхности на теплоотдачу при конденсации. Угол наклона изменялся в пределах от 0 до 90°. В ходе эксперимента использовались следующие теплоносители: вода, диэлектрические жидкости [2].

Эксперименты проводились на установке, представленной на рисунке 1. Конденсатор представлял собой цилиндрический сосуд, в полость которого подавался пар из испарителя. В верхнем основании сосуда располагалась калориметрическая вставка из нержавеющей стали. Конденсация паров происходила на внутренней, обращенной в полость конденсатора, поверхности калориметрической вставки. Теплота от калориметрической вставки отводилась с помощью системы водяного охлаждения, оснащенной помпой. Теплообменная поверхность системы охлаждения присоединялась к внешней поверхности калориметрической вставки, при этом контактное термическое сопротивление уменьшалось с помощью теплопроводной пасты. К внешней и внутренней поверхностям калориметрической вставки припаивались термопары для измерения температуры поверхности конденсации и определения плотности теплового потока, отводимого от пара. С помощью поворотного приспособления изменялось положение конденсатора, и угол наклона γ поверхности конденсации.

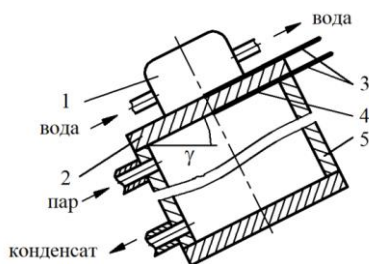


Рис. 1. Схема конденсатора.

1 – помпа; 2 – калориметрическая вставка;
3 – термопары; 4 – поверхность конденсации;
5 – конденсатор.

Заправленная рабочей жидкостью установка вывела на стационарный тепловой режим. Неконденсировавшийся газ и избыточное количество пара при повышении давления в конденсаторе стравливалось в атмосферу. По достижении стационарного теплового режима измерялись температуры теплообменных поверхностей калориметрической вставки. Плотность теплового потока, отводимого от поверхности конденсации q , Вт/м² через калориметрическую вставку, определялась с помощью закона Фурье.

Предполагалось, что жидкость находилась в состоянии насыщения, а температура пара принималась равной измеренной температуре насыщенной жидкости. Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара α , Вт/(м²·К) определялся с помощью уравнения Ньютона-Рихмана.

Результаты экспериментального исследования конденсации воды представлены в виде графика зависимости коэффициента теплоотдачи от угла наклона поверхности конденсации к горизонту (рис. 2).

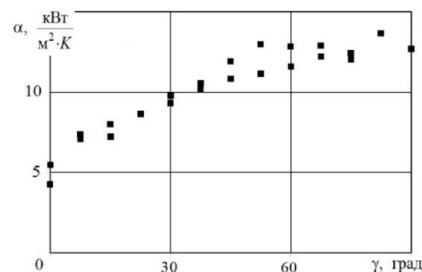


Рис. 2. Коэффициенты теплоотдачи при конденсации.

С увеличением угла наклона от 0 до 60° наблюдается возрастание теплоотдачи более чем в 2 раза. Такой характер изменения коэффициентов теплоотдачи можно объяснить уменьшением толщины пленки конденсата на поверхности при увеличении угла наклона. Дальнейшее увеличение угла наклона до 90° практически не приводит к росту коэффициента теплоотдачи, что связано с наличием остаточного слоя жидкости на поверхности конденсации, удерживаемого силами поверхностного натяжения.

Список литературы

1. Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 622–638. doi:10.1016/j.rser.2013.12.007
2. Cheng Liu, Hang Yu. Evaluation and Optimization of a Two-Phase Liquid-Immersion Cooling System for Data Centers. *Energies* 2021, 14, 1395.

ДИНАМИКА ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ НАНОЖИДКОСТИ С БИФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Старинская Е.М.¹, Миськив Н.Б.^{1,2}, Терехов В.В.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: prefous-lm@yandex.ru

Испарение капель с твердых поверхностей является важным фундаментальным процессом, используемым в различных областях науки и промышленности, а также имеет множество технических приложений, включая охлаждение поверхностей за счет фазового перехода, контролируемое нанесение самоорганизующихся поверхностных покрытий и многие другие [1]. Исследования процессов испарения наножидкостей с различных подложек важны как фундаментальная основа для развития методов осаждения наночастиц на твердые поверхности за счет испарения капель коллоидных растворов и могут быть использованы в качестве рекомендательной базы при решении различных задач в широком круге технологических приложений [2]. Так осадок наночастиц в форме «кофейного кольца», возникающий в результате испарения неподвижной капли наножидкости, получил много внимания в литературе [3]. Однако совместная задача о влиянии гравитационных сил, смачиваемости поверхности и не сферичности капель на эффективность испарения еще больше затрудняет понимание процессов осаждения [4].

В последние годы исследователи изучали поверхности с рисунком смачиваемости и продемонстрировали их большой потенциал для промышленных применений, таких как направленный и пассивный перенос жидкости, целенаправленное осаждение, а также, интенсификация теплообмена [5, 6]. Поверхности с рисунком смачиваемости обычно содержат совмещенные области двух или более различных смачиваемостей (супергидрофобных, гидрофобных, гидрофильных или супергидрофильных), что помогает достичь желаемых свойств смачивания и позволяет контролировать теплопередачу. Бифильные поверхности очень перспективны для многих приложений, так материалы с контрастной смачиваемостью могут применяться для интенсификации теплообмена, управлением движения жидкостью и т.д. Однако, в литературе пока встречается крайне мало работ на эту тематику, например, [6, 7]. В данном исследовании мы хотим расширить представление о процессе испарения капли жидкости с бифильной поверхности.

В настоящей работе проведена серия экспериментов по изучению динамики испарения сидячей капли наножидкости Fe_3O_4 массовой концентрацией 0,1 wt. %. С помощью инфракрасной термографии с фиксированным шагом определялось локальное распределение температуры капли в процессе испарения. В экспериментах использовалась инфракрасная камера NEC TH 7102WV с точностью около 0,08°C. Во время эксперимента форма капли регистрировалась высокоскоростной камерой Basler vcxg-04m. По полученным снимкам были измерены угол смачивания, размер

контактной линии и высота капли, по тепловизионным изображениям – температура поверхности.

Для подготовки бифильных подложек использовалась комбинация лазерной обработки и метода *HW CVD* для последующей функционализации фторполимерным покрытием [8, 9]. Данный материал позволяет проводить эксперименты по изучению тепло- и массообменных процессов, возникающих при испарении капель, варьируя ориентацию капли относительно гравитационных сил, при этом удерживая каплю на посадочном месте. В результате проведенных исследований было обнаружено, что при испарении капель наножидкости Fe_3O_4 0,1 wt. % с бифильной поверхности не образуется осадка в виде кофейного кольца. Полученный эффект может быть важен для развития методов осаждения наночастиц и формирования рисунка на твердых поверхностях за счет испарения.

Список литературы

1. Z. Pan, S. Dash, J.A. Weibel, S. V. Garimella. Assessment of water droplet evaporation mechanisms on hydrophobic and superhydrophobic substrates // *Langmuir*. 29 (2013) 15831–15841.
2. X.M. Lin, H.M. Jaeger, C.M. Sorensen, K.J. Klabunde. Formation of long-range-ordered nanocrystal superlattices on silicon nitride substrates // *J. Phys. Chem. B*. 105 (2001) 3353–3357.
3. M.A. Hampton, T.A.H. Nguyen, A. V. Nguyen, Z.P. Xu, L. Huang, V. Rudolph. Influence of surface orientation on the organization of nanoparticles in drying nanofluid droplets // *J. Colloid Interface Sci.* 377 (2012) 456–462.
4. T.P. Bigioni, X.M. Lin, T.T. Nguyen, E.I. Corwin, T.A. Witten, H.M. Jaeger. Kinetically driven self assembly of highly ordered nanoparticle monolayers // *Nat. Mater.* 5 (2006) 265–270.
5. C. Xu, R. Feng, F. Song, J.M. Wu, Y.Q. Luo, X.L. Wang, Y.Z. Wang. Continuous and controlled directional water transportation on a hydrophobic/superhydrophobic patterned surface // *Chem. Eng. J.* 352 (2018) 722–729.
6. W. Qi, J. Li, P.B. Weisensee, Evaporation of Sessile Water Droplets on Horizontal and Vertical Biphobic Patterned Surfaces // *Langmuir*. 35 (2019) 17185–17192.
7. T.K. Pradhan, P.K. Panigrahi. Evaporation induced natural convection inside a droplet of aqueous solution placed on a superhydrophobic surface // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 530 (2017) 1–12.
8. S. V. Starinskiy, A.A. Rodionov, Y.G. Shukhov, A.I. Safonov, E.A. Maximovskiy, V.S. Sulyaeva, A. V. Bulgakov. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // *Appl. Surf. Sci.* 512 (2020) 145753.
9. S. V. Starinskiy, A. V. Bulgakov, E.Y. Gatapova, Y.G. Shukhov, V.S. Sulyaeva, N.I. Timoshenko, A.I. Safonov. Transition from superhydrophilic to superhydrophobic of silicon wafer by a combination of laser treatment and fluoropolymer deposition // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 (2018) 255307.

Работа по исследованию процесса испарения поддержана РФФИ (грант № 21-52-53025)

Работа по изготовлению наножидкостей выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

Стерлягов А.Н., Низовцев М.И.

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

e-mail: sterlyagov@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований испарения капель воды и наножидкости, лежащих на поверхности различных материалов. В качестве подложки использовались пластины из материалов с различными коэффициентами теплопроводности: меди ($\lambda = 401 \text{ Вт/м}^2\text{С}$), тефлона ($\lambda = 0,25 \text{ Вт/м}^2\text{С}$) и экструзионного пенополистирола ($\lambda = 0,03 \text{ Вт/м}^2\text{С}$). В экспериментах рассматривалось испарение капель воды и наножидкости объемом 5 мкл при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха ($t_{\text{в}} = 24^\circ\text{С}$, $\phi = 40\%$). Приготовление наножидкости (смеси воды с наночастицами золота) выполнялось методом лазерной абляции. В полученной наножидкости концентрация наночастиц составляла около 0,1%.

В экспериментах с применением скоростной микросъемки исследовалось изменение геометрических параметров испаряющихся капель. Полученные данные показали, что для всех рассмотренных поверхностей капля наножидкости имела больший краевой угол смачивания чем капля воды. Вероятно, добавление наночастиц золота 0,1% по массе в воду приводит к увеличению вязкости жидкости. В результате наблюдались отличия в форме и динамике испарения капель воды и наножидкости. При одинаковом объеме площадь контакта капли наножидкости с поверхностью была меньше, чем у капли воды, и время испарения капель наножидкости было на 2÷4% меньше, чем капель воды.

В процессе испарения капель с использованием метода инфракрасной термографии определялось распределение температуры на поверхностях капель в различные моменты времени. На основании полученных данных были определены временные зависимости средних температур испаряющихся капель наножидкости и воды (см. рис. 1).

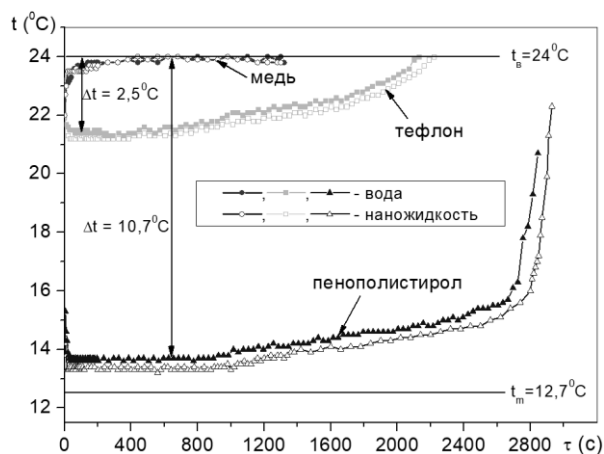


Рис. 1. Изменение температуры поверхностей капель воды и наножидкости, испаряющихся на поверхностях материалов с различной теплопроводностью.

Из полученных данных следует, что динамика изменения температуры поверхности испаряющихся капель существенно зависела от теплопроводности материала подложки. При этом качественно характер изменения температуры капель наножидкости практически не отличался от изменения температуры капель воды. Для капель, лежащих на медной пластине, наблюдалось резкое повышение температуры до температуры пластины, равной температуре окружающего воздуха. В дальнейшем температура капли не изменялась до ее полного испарения. Отличий по температуре капель наножидкости и воды не наблюдалось. На пластине из тефлона после резкого уменьшения температуры капель воды на $2,5^\circ\text{С}$, по сравнению с начальным значением, наблюдалось плавное повышение до температуры окружающего воздуха. При этом в течении всего процесса испарения температура капель наножидкости была ниже температуры капель воды на $0,2\div 0,3^\circ\text{С}$. На пластине из пенополистирола происходило резкое понижение температуры капли воды на $10,7^\circ\text{С}$, а затем наблюдались: стадия с продолжительным плавным ее повышением и резкий рост температуры до температуры окружающего воздуха на завершающем этапе испарения. При этом температура капель наножидкости была ниже температуры капель воды на $0,3\div 0,5^\circ\text{С}$.

Для условий проведения экспериментов температура адиабатного испарения воды составляла $t_m = 12,7^\circ\text{С}$. Полученные в экспериментах данные показали, что для капель, испаряющихся на поверхностях различных материалов, наименьшие значения температуры в процессе испарения превышали температуру адиабатного испарения, что было обусловлено подводом тепла от подложки к каплям. Чем меньше коэффициент теплопроводности материала подложки, тем меньше был тепловой поток от поверхности.

Полученные в экспериментах результаты на качественном уровне согласуются с данными других исследований по испарению капель, лежащих на поверхностях с различной теплопроводностью [1–3]. В работе получены данные по динамике изменения размеров и температуры поверхности испаряющихся капель наножидкости и их отличие от аналогичных результатов для капель воды.

Список литературы

1. David S., Sefiane K., Tadrist L. Experimental investigation of the effect of thermal properties of the substrate in the wetting and evaporation of sessile drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 2007, Vol. 298, pp. 108–114.
2. Dunn G.J., Wilson S.K., Duffy B.R., David S. and Sefiane K. The Strong Influence of Substrate Conductivity on Droplet Evaporation // *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, Vol. 623, pp. 329–351.
3. Nagornov O.V., Starostin N.V. Influence of substrate properties on evaporation of the sessile drop // *WSEAS Transactions on Heat And Mass Transfer*, 2014, Vol. 9, №1, pp. 221–225.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ СЛИЯНИИ ДВУХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ФОЛЬГЕ

Чеведа В.В.^{1,2}, Сомванши П.М.²¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: slava.cheverda@gmail.com

Процесс коалесценции жидких капель важно понимать при проектировании спрейной системы охлаждения, при создании лакокрасочных изделий, при создании антиобледенительной системы в авиации.

Спрейная система жидкостного охлаждения, когда пленка жидкости образуется в результате направленного потока капель и частично или полностью смачивает поверхность нагрева, является одной из наиболее перспективных систем охлаждения. Соответственно возникает необходимость более глубокого изучения динамики теплообмена при падении капли на твердую поверхность и их слиянии. Это связано со многими факторами: поверхностным натяжением, смачиваемостью, геометрией поверхности и др. [1, 2].

Для определения теплового потока при спрейном охлаждении в области контактной линии капель или при формировании слоя жидкости применяется метод тонкой фольги (25 мкм). Фольга из константана натянута между двумя латунными электродами. Размер фольги – длина 80 мм, ширина 35 мм. К фольге подключается источник питания и регулируется мощность, выделяемая на фольге. Жидкость подается на фольгу с помощью шприцевого насоса металлические иголки. На одной стороне фольги помещается капля, а другая сторона фольги покрывается черной краской. С помощью ИК-сканера Flir Titanium 540 производится съёмка этой стороны фольги. Боковые стенки предполагаются адиабатическими, а электрическая мощность измеряется источником питания.

Задача Коши для уравнения Лапласа общего вида относится к числу известных некорректных задач и ее решение неустойчиво. Неустойчивость решения задачи Коши становится очевидной при использовании любого численного метода ее решения. В данной работе мы использовали метод, сводящий решение задачи Коши к решению проблемы моментов [3].

Фото экспериментальной установки приведено на рис. 1. На рисунке видят латунные электроды с натянутой между ними фольгой.

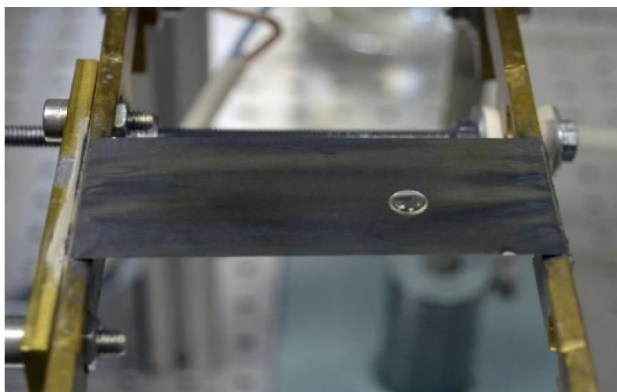


Рис.1. Фото капли на нагреваемой тонкой фольге.

Процесс слияния двух капель одинакового объема (10 мкл., число Бонда=0,11) приведен на рис. 2. В ходе эксперимента получено распределение температур для разной мощности, выделяемой на фольге, размера капли, а также высоты падения капли. В результате обработки экспериментальных данных измерялся тепловой поток со стороны капли и с обратной стороны.

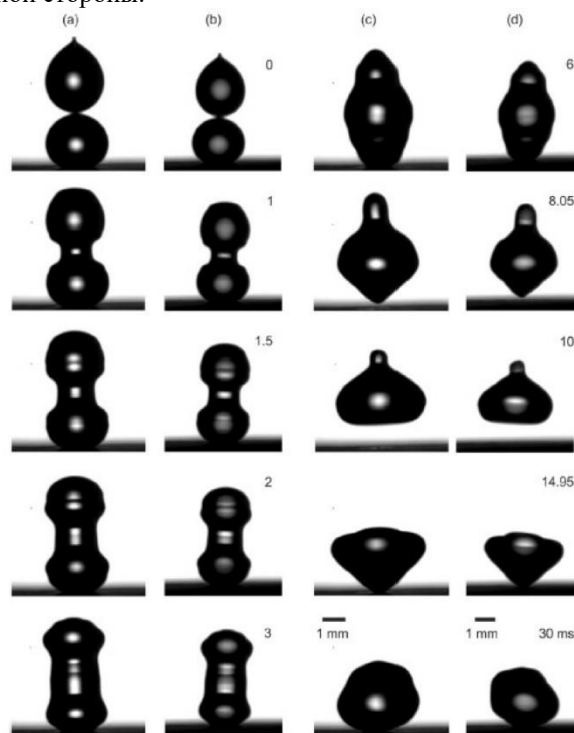


Рис. 2. Процесс слияния двух одинаковых капель (10 мкл). Число Бонда = 0,11.

Список литературы

1. Pautsch A G, Shedd T A Spray impingement cooling with single and multiple-nozzle arrays. Part I: Heat transfer data using FC-72 // Int. Journ. of Heat and Mass Trans., 2005, 49, 2610–2618
2. Roisman I V, Gambaryan-Roisman T, Kyriopoulos O, Stephan P and Tropea C Breakup and atomization of a stretching crown Physical Review E, 2007, 76 (2) 26302-1–26302-9
3. Karchevsky A.L., Marchuk I.V., Kabov O.A., Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // Applied Mathematical Modelling, 40 (2), 1029-1037, 2016

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 21-79-10373

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ДЕСОРБЦИОННОМ РОСТЕ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ПЕРЕСЫЩЕННОМ РАСТВОРЕ

Чернов А.А.^{1,2}, Пильник А.А.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

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

e-mail: a.chernov@g.nsu.ru

Для расчета и повышения эффективности работы пузырьковых абсорберов необходимо уметь правильно моделировать гидродинамические и тепломассообменные процессы, совместно протекающие при взаимодействии паровых пузырьков, всплывающих в неоднородно прогретой жидкости, а также процесс их коалесценции. При этом, для проверки достоверности результатов такого моделирования в осесимметричной постановке можно использовать результаты, полученные на вертикальном нагревателе.

В работах Накорякова, Григорьевой, посвященных пленочной абсорбции, была показана важность использования адекватных физических моделей и точных методов расчета, учитывающих ряд факторов, влияющих на рассматриваемый процесс, в частности, его неизотермичность, в значительной степени влияющую на интенсивность массообмена. В монографии [1] проведено обобщение многолетних теоретических исследований по данной тематике. Их базовые положения могут быть использованы для теоретического анализа процессов неизотермической абсорбции и десорбции. Кроме того, разработанный авторами метод теоретической оценки процессов тепломассопереноса открывает новые возможности к их моделированию. В работе [2] было проведено сравнение коэффициентов тепло- и массоотдачи для пузырькового и пленочного абсорберов. Было показано, что за счет того, что в пузырьковых абсорберах пузырьки хладагента находятся внутри раствора, они показывают существенно большую эффективность (позволяющую сократить объем теплообменника на 50% при той же мощности), чем пленочные. При этом, до сих пор не существует достаточно точных методов расчета процесса пузырьковой абсорбции/десорбции. Так, при анализе работы пузырькового абсорбера во многих исследованиях до сих пор используют упрощенные интегральные модели.

Процессы абсорбции и десорбции достаточно сложно моделировать, так как они сильно чувствительны к изменению таких параметров как температура, давление и концентрация абсорбента вблизи межфазной границы. Поэтому, при проектировании устойчивых режимов работы абсорбционного оборудования очень важно, чтобы расчетные модели корректно описывали происходящие при абсорбции/десорбции тепломассообменные процессы. В настоящей работе найдено полуаналитическое решение задачи о росте газового пузырька в пересыщенной газом жидкости с учетом неизотермичности процесса. Для оценки эффектов, имеющих место при десорбции, разработана приближенная псевдоодномерная (в сферически-симметричной постановке) модель эволюции газового пузырька. Модель строится на

классических уравнениях гидродинамики и тепло-массообмена. Диффузионная задача в предлагаемой постановке решается совместно с тепловой. Эти задачи сопряжены на межфазной границе путем задания соответствующих граничных условий, отражающих условие локального термодинамического равновесия и описывающих тепло- и массоотдачу с учетом происходящего фазового превращения. По сути, предложенная модель представляет собой краевую задачу с подвижной границей, которая решается с помощью введения переменных, в которых эта граница становится неподвижной. Подобный подход был успешно реализован авторами при моделировании динамики роста паровых и газовых (в условиях изотермичности) пузырьков [3-5]. Несмотря на усложнение уравнений, описывающих процесс, это позволило найти приближенное полуаналитическое решение, которое хорошо согласуется с решением, полученным путем прямого численного моделирования. Проведены расчеты, которые позволили описать все стадии рассматриваемого процесса. Определено, какие условия и какие механизмы на той или иной стадии процесса являются преобладающими. Отдельно выявлено влияние неизотермичности на интенсивность массоотдачи. Также проведены расчеты при больших отклонениях от равновесия, когда классические модели, а также полученные на их основе решения, описывающие так называемую диффузионную стадию роста пузырька, не применимы. Качественно описана динамика пузырька при изменяющихся внешних условиях, когда перевод системы в метастабильное состояние осуществляется с конечной, пусть даже и очень большой, скоростью.

Список литературы

1. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. Новосибирск: Наука, 2010. 113 с.
2. Kang Y. Tae, Akisawa A., Kashiwagi T. Analytical investigation of two different absorption modes: falling film and bubble types // International Journal of Refrigeration. 2000. V. 23. P. 430–443.
3. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., A.A. Pil'nik Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // Physics of Fluids. 2014. V. 26, № 11. P. 116602.
4. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Vladko I.V., Lezhnin S.I. New semi-analytical solution of the problem of vapor bubble growth in superheated liquid // Scientific Reports. 2020 V. 10, № 1. P. 16526.
5. Чернов А.А., Гузев М.А., Пильник А.А., Владко И.В., Чудновский В.М. Новый подход к аналитическому описанию роста парового пузырька в перегретой жидкости // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2020. Т. 495, № 1. С. 73–77.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00092)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОЙ МИШЕНИ СИСТЕМОЙ ЗАТОПЛЕННЫХ МИКРОСТРУЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Шамирзаев А.С., Мордовской А.С., Кузнецов В.В.

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

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Микроструйное охлаждение теплонапряженного оборудования с использованием диэлектрической жидкости активно применяется для охлаждения электронного оборудования, в том числе силовой электроники. Особенностью охлаждения такого оборудования является возможность прямого контакта охлаждающего теплоносителя с электронными компонентами. В этом случае необходимым является применение диэлектрических жидкостей с низкой электрической проводимостью, которые, как правило, имеют малую скрытую теплоту парообразования и низкие критические тепловые потоки при кипении [1]. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния скорости жидкости и плотности теплового потока на теплообмен при охлаждении цилиндрического нагревателя системой затопленных микроструй диэлектрической жидкости Noves 7100 в широком диапазоне тепловых потоков, от однофазной конвекции до критического теплового потока при недогретом кипении.

Эксперименты проводились при охлаждении теплонапряженной поверхности Noves 7100 с использованием 12 затопленных микроструй, расположенных в горизонтальном щелевом микроканале. Охлаждаемой поверхностью являлся торец медного нагреваемого цилиндра диаметром 10 мм. Сопла микроструй равномерно распределены по окружности диаметром 5 мм. Расстояние от решетки формирователя микроструй до охлаждаемой поверхности равно 1 мм. Эксперименты проведены с двумя размерами микроструй диаметром 174 и 327 микрон.

В результате серии экспериментов определены механизмы теплообмена и критические тепловые потоки, установлены зависимости коэффициентов теплоотдачи при микроструйном охлаждении теплонапряженной поверхности диэлектрической жидкостью от плотности теплового потока и массового расхода теплоносителя. Выполнено сравнение полученных данных по кривой кипения с расчётом, учитывающим вклад теплообмена при однофазной конвекции и недогретом кипении в виде

$$q_w^2 = \left(h_{con} \left(\frac{\mu_{L,W}}{\mu_{W,Sub}} \right)^N (T_W - T_{Sub}) \right)^2 + (h_{boil} (T_W - T_{Sat}))^2 \quad (1)$$

Здесь T_W – температура стенки T_{Sat} – температура насыщения, T_{Sub} – температура натекающей жидкости, h_{Boil} – коэффициент теплоотдачи при кипении по уравнению [2], h_{con} – коэффициент конвективной теплоотдачи при струйном охлаждении по уравнению [3]. Показатель степени N учитывающий интенсификацию конвективной теплоотдачи из-за изменения свойств жидкости на стенка равен – 0.14 для ла-

минарных струй ($Re < 2000$) и – 0.11 для турбулентных струй ($Re > 2000$).

На рис. 1 приведена кривая кипения для охлаждения мишени двенадцатью струями HFE7100 с диаметром 174 мкм при скорости струи $V_{jet} = 5.5$ м/сек. Точки показывают экспериментальные данные, полученные при последовательном увеличении и уменьшении теплового потока. Сплошная линия показывает расчёт по уравнению (1), пунктирная линия показывает расчёт для пузырькового кипения в большем объёме по [2]. Начальная температура охлаждающей жидкости в струях равна 20 °С. Полученные данные

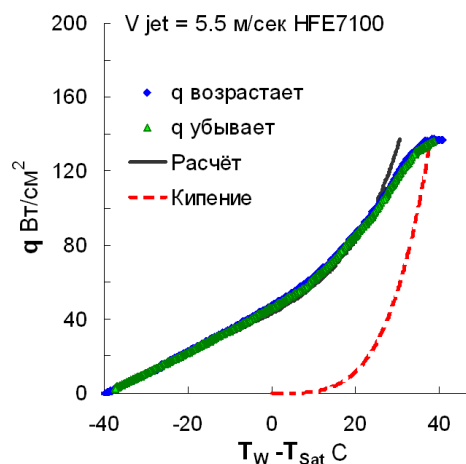


Рис.1. Кривая кипения для двенадцати струй HFE7100 с диаметром 174 мкм при скорости струи $V_{jet} = 5.5$ м/сек; точки – эксперимент, сплошная линия – расчёт, пунктирная линия – кипение в большем объёме.

показывают, что уменьшение диаметра и увеличение скорости струй существенно интенсифицирует теплоотдачу, но при этом так же вырастает перепад давления на формирователе микроструй. Критический тепловой поток для струй диаметром 174 микрона изменялся от 140 до 210 Вт/см² при изменении скорости струи от 5.5 до 20 м/с, что существенно меньше полученных ранее данных для воды.

Список литературы

1. Mira-Hernández, C., Clark, M. D., Weibel, J. A. and Garimella S. V., 2018, Development and validation of a semi-empirical model for two-phase heat transfer from arrays of impinging jets, International Journal of Heat and Mass transfer, 124, pp. 782–793.
2. Ribatski, G. and Jabardo, J. M. S., 2003, Experimental study of nucleate boiling of halocarbon refrigerants on cylindrical surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, pp. 4439–4451.
3. Martin, H., 1977, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, Advances in Heat Transfer, 13, pp. 1–60.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гран-та Российского Научного Фонда (проект № 21-19-00626)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Юнусов И.О., Поликарпов А.Ф.

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

e-mail: igor.iunusov@urfu.ru

Настоящая работа посвящена вопросам, связанным с повышением эффективности переноса тепловой энергии, интенсификацией теплообмена в многофазных системах наномасштаба. В центре внимания представленного в работе исследования находятся процессы тепломассопереноса, происходящие в системе жидкость-газ. В частности, существующие на сегодняшний день экспериментальные и теоретические работы, посвященные изучению влияния толщины слоя жидкости на его испарение [1, 2], свидетельствуют об актуальности данного направления и необходимости его дальнейшего развития.

Цель работы заключается в получении новых данных о физических особенностях нестационарного неравновесного испарения свободного плоского слоя жидкого аргона в вакуум и определении влияния толщины слоя жидкости на процесс испарения.

Исследования проводятся с помощью нестационарного неравновесного моделирования методом молекулярной динамики с использованием вычислительного пакета LAMMPS [3], согласно методике, описанной в работе [4]. Геометрия расчетной области представляет собой параллелепипед, на нижней грани которого находится плоский слой леннард-джонсовской жидкости, состоящий из частиц аргона (см. рис. 1). Термостатированный слой жидкости является источником тепла, для поддержания температуры которого используется термостат Ланжевена. У верхней границы расчетной области находится зона удаления частиц, с помощью которой создаются условия испарения в вакуум. В плоскости перпендикулярной поверхности жидкости вводятся периодические граничные условия. Расчеты проводятся для различных начальных толщин слоя жидкости $H_0=(20\div 50)$ нм и температур источника тепла $T_0=90$ К, $T_0=95$ К и $T_0=100$ К.

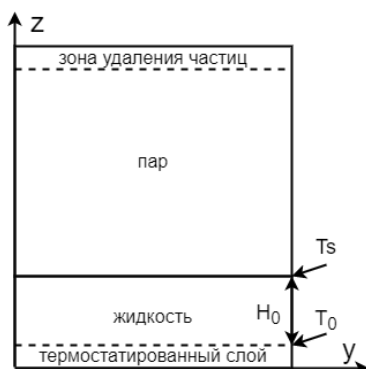


Рис. 1. Двумерная проекция геометрии задачи.

В результате молекулярного моделирования были получены временные и пространственные распределения макроскопических величин. Рассчитаны пар-

ные корреляционные функции в жидкой и газовой фазах для более точного определения состояния исследуемой системы. Получены функциональные зависимости изменения толщины слоя жидкости от времени и температуры источника тепла T_0 , массового расхода от температуры T_0 и толщины слоя жидкости. Обнаружено, что температура T_s и величина потока массы уменьшаются с увеличением толщины слоя жидкости. При этом значения массового расхода и температура жидкости на межфазной границе в большей степени зависят от температуры источника тепла. Установлен интервал времени, в котором величина потока массы несущественно меняется со временем, что позволило провести сравнение результатов моделирования с известными результатами кинетической теории Герца-Кнудсена с соответствующими модификациями и соотношениями неравновесной термодинамики Онзагера.

Результаты молекулярно-динамического моделирования тепломассопереноса в системе жидкость – пар хорошо согласуются с известными ранее полученными экспериментальными и теоретическими данными.

Список литературы

1. Heinen M., Vrabec J., Fischer J. Communication: Evaporation: Influence of heat transport in the liquid on the interface temperature and the particle flux // The Journal of Chemical Physics. 2016. V. 145, No. 8. P. 81–101.
2. Kreta V. M., The effect of the liquid layer thickness on the evaporation intensity // MATEC Web of Conferences. 2018. V.194, P. 6.
3. Plimpton S. J., Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics // Journal of Computational Physics. 1995. V. 117, No. 1. P. 1–19.
4. Cheng S., Lechman J. B., Plimpton S. J., Grest G. S. Evaporation of lennard-jones fluids // The Journal of Chemical Physics. 2011. V. 134, No. 22. P. 15.

*Работа поддержана Министерством
науки и высшего образования РФ
(грант № FEUZ-2020-0057)*



СЕКЦИЯ 4

Научные основы нефтегазовых технологий



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЧКИ НЕФТИ В ЦИФРОВУЮ МОДЕЛЬ КЕРНА С ПОМОЩЬЮ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Авдонин А.С.

Газпромнефть НТЦ, Санкт-Петербург

e-mail: avdonin.as@gazpromneft-ntc.ru

На сегодняшний день двухфазные расчеты на цифровых моделях ядра требуют больших вычислительных затрат, поэтому размеры образцов для расчетов сильно занижены. В данной работе рассматривается морфологический подход [1] для моделирования закачки нефти в цифровую модель ядра. Данный подход значительно понижает требования к вычислительным ресурсам по сравнению с двухфазным нестационарным решателем уравнений Навье-Стокса.

Морфологический подход использует приближение низких капиллярных чисел, при котором распределение фаз в поровом пространстве полностью определяется капиллярным давлением. Движение несмачивающей фазы (нефти) описывается геометрически, путем вписывания сфер в поровое пространство: для каждого вокселя рассчитывается радиус самой большой сферы, которая содержит данный воксель и вписывается в поровое пространство. Тем самым радиусы вписанных сфер отображают радиусы пор. Для того, чтобы заполнить пору несмачивающей жидкостью, необходимо преодолеть капиллярное давление, которое обратно пропорционально радиусу поры. Заполнение порового пространства нефтью происходит постепенно, повышая давление на входной грани. Несмачивающая фаза сначала занимает большие поры, далее при повышении давления - меньшие. Морфологический подход позволяет рассчитать капиллярную кривую и кривую относительной фазовой проницаемости (ОФП) на этапе закачки нефти в ядро.

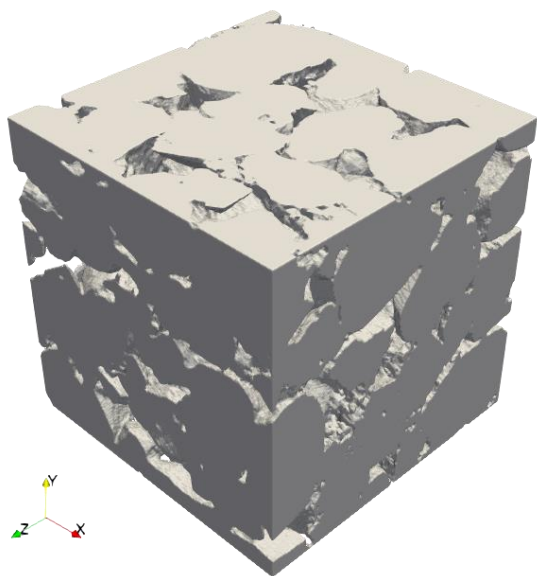


Рис. 1: Цифровая модель высокопроницаемого песчаника.

В этой работе морфологический метод сравнивается с прямым двухфазным нестационарным решателем уравнений Навье-Стокса [2] и решателем поровых сетей [3] на высокопроницаемом образце песчаника размером 300^3 вокселей (см. рис. 1). Решатель поровых сетей - простой и быстрый метод расчета капиллярной кривой и ОФП, применимый в промышленных масштабах.

Если максимальный размер цифровой модели ядра, построенной по снимкам компьютерной томографии, ограничен 1000^3 - 2000^3 вокселями, то размер модели для двухфазных нестационарных расчетов прямым решателем Навье-Стокса составляет не более 500^3 - 800^3 вокселей. Морфологический подход, в свою очередь, позволяет моделировать закачку нефти на цифровых моделях размером более 1000^3 вокселей. Решение двухфазных нестационарных уравнений Навье-Стокса на таких больших моделях за приемлемое время просто невозможно. По мнению автора, морфологический подход является единственным методом для моделирования закачки нефти, применимым в промышленных масштабах, не считая моделирования поровых сетей. При этом точность расчетов морфологическим методом будет выше, чем с помощью моделирования поровых сетей.

Список литературы

1. Vogel, H.-J., Tölke, J., Schulz, V. P., Krafczyk, M., & Roth, K. (2005). Comparison of a Lattice-Boltzmann Model, a Full-Morphology Model, and a Pore Network Model for Determining Capillary Pressure-Saturation Relationships. *Vadose Zone Journal*, 4(2), 380-388. <https://doi.org/10.2136/VZJ2004.0114>.
2. Raeini, A. Q., Blunt, M. J., & Bijeljic, B. (2012). Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method. *Journal of Computational Physics*, 231(17), 5653-5668. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.04.011>.
3. Valvatne, P. H., & Blunt, M. J. (2004). Predictive pore-scale modeling of two-phase flow in mixed wet media. *Water Resources Research*, 40(7). <https://doi.org/10.1029/2003WR002627>.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ «АВТОГРП» И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ

Базыров И.Ш., Калинин С.А.

ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург

e-mail: Basyrov.ISh@gazpromneft-ntc.ru Kalinin.SA@gazpromneft-ntc.ru

АвтоГРП – эффект самопроизвольной инициации или роста трещин гидроразрыва пласта в нагнетательных скважинах. Этот эффект характерен для коллекторов, разработка которых сопровождается интенсивным заводнением скважин при высоких давлениях закачки, в том числе под закачку переводятся горизонтальные скважины, предварительно простимулированные гидроразрывом пласта.

Наличие трещин автоГРП может вызвать существенные проблемы при работе системы поддержания пластового давления (ППД). Например, для линейной системы разработки (Рис. 1а) характерными проблемами, связанными с автоГРП, являются: непродуктивная закачка (падение приемистости из-за роста/ перераспределения порового давления при наличии автоГРП), проблемы бурения в зонах аномально высокого пластового давления (АВПД), «короткое замыкание» (большая часть жидкости напрямую уходит в добывающие скважины по трещинам автоГРП), прорыв в «пласты-паразиты» по высоте, дополнительные затраты на подъем и закачку вытесняющего агента. Для системы разработки с горизонтальными скважинами, пробуренными перпендикулярно региональному напряжению (Рис. 1б), рост трещин автоГРП в длину может привести к раннему прорыву нагнетаемой воды в добывающие скважины и быстрому обводнению их продукции, при этом нагнетаемая жидкость фактически будет просто циркулировать между нагнетательной и добывающей скважиной, не вытесняя пластовый флюид. В свою очередь способность контролировать трещины автоГРП позволит решить вышеперечисленные проблемы, увеличить стартовые дебиты и накопленную добычу нефти.

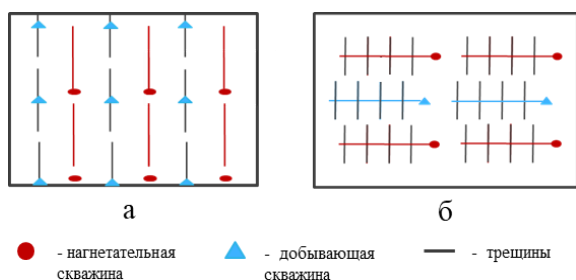


Рис. 1. Системы разработки: линейная рядная (а), с горизонтальными скважинами, пробуренными перпендикулярно региональному напряжению (б).

Моделирование процесса заводнения залежей с учётом эффекта автоГРП затруднительно в связи со сложной физикой взаимовлияния давления и деформаций (пороупругость) с одновременным ростом трещины автоГРП, неясным количественным вкладом сопутствующих эффектов (кольматация, температура, многофазная фильтрация при наличии авто-

ГРП, 3D-эффекты), а также в связи большими временными масштабами роста трещин автоГРП (порядок времени роста трещин автоГРП – годы). Детальный учёт всех процессов может значительно усложнить модель и значительно повысить требуемые вычислительные ресурсы, а упрощение модели может значительно понизить предсказательную способность модели. Существующие коммерческие симуляторы плохо приспособлены для моделирования автоГРП.

Значительные проблемы вызывает корректный сбор, учёт и интерпретация всего спектра измерительных данных (ГИС, ГДИС, керн, ПГИ и т.д.). Эта проблема является общей для задач моделирования в нефтяной индустрии, однако в контексте моделирования эффекта автоГРП принципиально важным становится восстановление начальных условий по пластовому давлению в секторе, где находится скважина с трещиной автоГРП. В процессе ППД происходит существенное перераспределение пластового давления, которое может приводить как к росту, так и снижению среднего пластового давления, а значит изменятся и критическое напряжение разрыва пласта. Помимо величины среднего пластового давления в секторе в данный момент разработки существенную роль играет величина горизонтального градиента пластового давления, которая зависит от динамики закачки воды и добычи пластового флюида. Особенно остро проблема моделирования начального распределения давления в секторе важна для характерных проницаемостей выше 1–5 мД. С учётом этой специфики особый интерес вызывают корректные операции проведения и интерпретации ГДИС. Однако текущие инструменты для моделирования ГДИС не имеют функционала для моделирования трещин переменной геометрии (трещин автоГРП), что даёт большую вариативность при интерпретации результатов ГДИС.

В связи со всем вышесказанным возникает необходимость в разработке инструмента, способного определять геометрию трещин автоГРП при ППД, а также способного проводить сбор, учёт и интерпретацию всего спектра измерительных данных, интегрировать решения, методики и автоматизировать процессы по регулированию закачки. Однако, созданию такого инструмента должна предшествовать научно-исследовательская работа по разработке моделей, способных помочь в понимании основных физических механизмов инициации и роста трещин автоГРП, в определении основных влияющих параметров на модель. Наряду с этим необходимо ставить задачи по подбору технологий заканчивания скважин для снижения рисков прорыва трещин автоГРП, созданию систем автоматизированного контроля оборудования по регулированию закачки, поиску новых способов разработки низкопроницаемых коллекторов с учётом автоГРП и другие смежные задачи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП НА НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ В ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЕ

Байкин А.Н.^{1,2}, Абдуллин Р.Ф.^{1,2}, Головин С.В.^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

e-mail: alexey.baykin@gmail.com

В нефтегазовой отрасли одним из основных инструментов повышения нефтеотдачи является создание системы поддержания пластового давления (ППД) за счет заводнения. Для этого часть добывающих скважин по определенной схеме переводят в нагнетание воды, которая вытесняет нефть к добывающим скважинам. Одной из возможных проблем данной технологии является самопроизвольное возникновение техногенной трещины гидроразрыва пласта (трещины автоГРП) на нагнетательной скважине, когда давление на забое скважины превышает давление инициации трещины гидроразрыва пласта (ГРП). Магистральные трещины автоГРП могут приводить к преждевременному обводнению добывающих скважин, находящихся на расстояниях нескольких километров друг от друга. С другой стороны, контролируемые трещины автоГРП можно использовать для управления масштабным заводнением, оптимизации схем расположения скважин. Для этого необходимо понимать, при каких условиях, в каком направлении и насколько далеко будет распространяться трещина автоГРП.

Трещины автоГРП имеют схожую природу с обычными трещинами ГРП: распространение трещины происходит под действием давления закачиваемой жидкости. Спецификой автоГРП является то, что закачка низковязкой жидкости происходит достаточно медленно в течение длительного промежутка времени. Это приводит к тому, что вокруг трещины создается обширная зона фильтрации и возникает дополнительное сжимающее напряжение («обратное напряжение» [1]) за счет влияния порового давления. Трещина автоГРП способна распространяться на километры, а фронты фильтрации — взаимодействовать с неоднородностями давления, обусловленными наличием других объектов в системе разработки. Таким образом, наличие и режим работы соседних скважин влияет на рост трещины автоГРП.

В данной работе для моделирования развития трещины автоГРП предложена модель, основанная на уравнениях пороупругости Био [2] для описания механики пласта. При условии, что распространение трещины ограничено продуктивным пластом, можно перейти к двумерной задаче для напряженно-деформированного состояния (НДС) горной породы в приближении плоского напряженного состояния. Отсюда находится сжимающее напряжение с учетом влияния порового давления, которое необходимо преодолеть для раскрытия трещины. Распространение трещины определяется законом сохранения массы в приближении теории смазки с утечками в пласт, рассчитываемым из уравнения двумерной филь-

трации. Упругая реакция горной породы определяется отдельно в рамках модели Enhanced PKN [3] для трещины ГРП фиксированной высоты.

Поставленная задача решается комбинированным методом конечных (МКЭ) и граничных элементов. Для расчета НДС пласта, фильтрации в пласте и сопряженного с ней течения жидкости в трещине используется МКЭ. Упругая реакция породы рассчитывается по методу разрывных смещений для модели Enhanced PKN [3]. Для эффективного решения задачи разработан алгоритм разделения по физическим процессам фильтрации, расчета НДС пласта с учетом пороупругости и раскрытия трещины. Известно, что «наивное» последовательное решение каждого из уравнений приводит к неустойчивой схеме, поэтому предложено ввести в исходные уравнения специальные стабилизирующие слагаемые. Представленный численный алгоритм был верифицирован на известных решениях задачи ГРП из литературы.

В результате численных экспериментов был проведен анализ чувствительности геометрии трещины автоГРП к параметрам модели. В частности, показано влияние вертикального сжимающего напряжения, коэффициента Био, проницаемости пласта, сжимаемости жидкости в скважине на развитие автоГРП.

На масштабе сектора разработки описано влияние соседних нагнетательных и добывающих скважин на распространение трещины автоГРП вследствие изменения «обратного напряжения» и скорости утечек. Также приведены примеры способов контроля трещины автоГРП с помощью подбора расписания закачки. Проведенное моделирование известного теста со ступенчатым увеличением расхода качественно показывает возможности интерпретации промысловой кривой давления для определения момента инициации трещины автоГРП на практике.

Авторы выражают благодарность Донцову Егору Владимировичу за участие в обсуждении постановки задачи и полученных результатов.

Список литературы

1. Golovin S.V., Baykin A. N. Influence of pore pressure on the development of a hydraulic fracture in poroelastic medium // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2018, V. 108, P. 198–208.
2. Coussy O. Poromechanics // Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004, 298p.
3. Dontsov E.V., Peirce A. P. Comparison of toughness propagation criteria for blade-like and pseudo-3D hydraulic fractures // Eng. Frac. Mech., 2016, V.160, P. 238–247.

Работа поддержана стипендией Президента РФ (грант № СП-1703.2022.1), проектом по госзаданию ГЗ_FWGG-2019-0002 (руководитель Головин С.В.) и Научно-техническим центром Газпромнефти

ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ МНОГОЛЕТНЕЙ ЗАКАЧКЕ НЕНАГРЕТОЙ ВОДЫ ПРИ ЗАВОДНЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ХОЛМОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бондарь М.Ю.¹, Осипов А.В.¹, Косихин А.С.²

¹ ООО Газпромнефть-Технологические партнерства, Москва

² АО Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз, Ноябрьск

e-mail: Bondar.MYu@gazprom-neft.ru

В процессе разработки нефтяных месторождений для поддержания пластового давления в них закачивается большие объемы воды, температура которой существенно отличается от начальной пластовой температуры. Типичная пластовая температура для месторождений Западной Сибири около 70–100°C, тогда как температура закачиваемой воды на устье скважин может составлять от 20 до 30°C в зависимости от времени года и способа подготовки жидкости. Это приводит к заметному, особенно на поздней стадии разработки месторождений, охлаждению нефтяных пластов. В свою очередь, температура пласта оказывает значительное влияние на условия вытеснения нефти водой (на вязкость нефти и воды, на коэффициент вытеснения нефти и т.д.), что может повлиять на конечный коэффициент нефтеотдачи. Кроме этого, охлаждение пласта необходимо учитывать при планировании методов увеличения нефтеотдачи (МУН), в частности, химических МУН, таких как полимерное, ПАВ-полимерное или щелочь-ПАВ-полимерное воздействие, вследствие того, что свойства закачиваемых химических агентов (вязкость, межфазное натяжение, совместимость с пластовыми водами, стабильность и т.д.) также зависят от температуры. Например, в [1] показано, что охлаждения пласта влияет на динамику добычи нефти при щелочь-ПАВ-полимерном заводнении и, что ПАВ необходимо подбирать не для температуры пласта, а для забойной температуры закачиваемой жидкости.

Все вышесказанное обуславливает важность проблемы оценки охлаждения пласта при многолетней закачке ненагретой воды в нефтяные пласты.

В данной работе было оценено охлаждение выбранного пилотного участка пласта Холмогорского нефтяного месторождения после более чем 10-летнего заводнения. В качестве инструментов оценки использовались аналитические зависимости и расчеты в гидродинамическом симуляторе.

Прежде всего, была оценена температура закачиваемой жидкости на забое нагнетательной скважины по известной устьевой температуре согласно формуле А.Ю. Намиота [2].

Результаты вычислений были сопоставлены с фактическими замерами забойной температуры на нагнетательной скважине пилотного участка, проведенными в период с 02 по 18.03.2022. Полученная сходимость расчетных и фактических данных подтверждают достоверность гипотезы, описанной выше.

Далее по формуле Маркса-Лангенгейма [3] было оценено распределение температуры в пласте при нагнетании ненагретой воды.

Расчеты были проведены для двух скважин Холмогорского месторождения с разными накопленными объемами закачанной воды. Вычисления и последую-

ющее моделирование показали, что фронт охлаждения пласта распространяется на 150–200 м (см. рис.1).

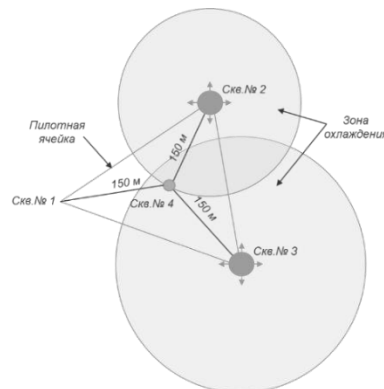


Рис. 1. Распространение фронта охлаждения в ячейке заводнения пилотного участка на Холмогорском месторождении.

На основании выполненных расчетов было получено, что существенная часть пилотного участка охлаждена в результате многолетней закачки ненагретой воды. Фронт охлаждения распространяется на 150–200 м от нагнетательной скважины.

Полученные результаты легли в основе новой методологии подбора ПАВ и полимера для химических МУН, в которой, например, ПАВ должен подбираться под прогнозируемый диапазон температуры, при котором ПАВ сохраняет свою нефтеотмывающую эффективность (способность снижать межфазное натяжение на границе с нефтью до сверхнизких значений) и стабильность в пластовых условиях. При этом ПАВ различной природы демонстрируют разную зависимость межфазного натяжения от температуры. Выбор полимера также необходимо проводить с учетом температурных градиентов ввиду того, что динамическая вязкость при понижении температуры растет, что влияет и на механизмы в пласте, и на инфраструктурные решения. Актуальность статьи состоит в том, что описываемое явление может быть распространено на многих месторождениях, где планируется применение ХМУН

Список литературы

1. Soltani A., Decroux B., Negre A., Le Maux T., Djarir M., Selmi F., Lantoine M. Evaluating the Impact of Reservoir Cooling on the Surfactant Flood Efficiency. IPTC-21351-MS, 2021.
2. Малофеев Г.Е., Мирсаатов О.М., Чоловская И.Д. Нагнетание в пласт теплоносителей для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008. – 224 с.
3. Marx J.W., Langenheim R.H. Reservoir heating by hot fluid injection // Petroleum Transactions AIME. – 1959. – Vol.216 – P.312–315.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАСТИНЧАТЫХ КОНДИЦИОНЕРОВ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ С ИСТОЧНИКОМ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

Валеев А.А., Душин Н.С., Душина О.А.

Институт энергетики и перспективных технологий Федерального исследовательского центра
«Казанский научный центр Российской академии наук»

e-mail: o.a.dushina@mail.ru

Интерес к методам управления гидродинамическими характеристиками течения в различных областях науки и техники существует давно. В расходомерии первые высказывания о необходимости коррекции течения появились в 70-х годах прошлого века и были мотивированы проблемой сокращения дистанции между местными сопротивлениями и расходомером. Тогда же были разработаны первые кондиционеры потока (устройства формирования потока с необходимыми характеристиками).

Сегодня основной мотивацией для совершенствования кондиционеров потока является повышение точности измерения энергоносителей и технологических сред. Для этого необходимо, чтобы кондиционеры потока формировали условия течения, близкие к условиям при градуировке расходомера на эталонной установке. Существующие модели кондиционеров потока в целом хорошо нивелируют негативные гидродинамические эффекты, но снизить акустические возмущения они не могут.

Акустические возмущения в трубопроводах могут генерироваться при обтекании элементов технологических устройств или элементов трубопроводов, а также за счет особенностей конфигурации самого трубопровода. Негативным следствием генерации акустики в трубопроводах является увеличение неопределенности измерения расхода расходомерами до 20%. Поэтому перспективной задачей является разработка кондиционеров потока с функцией глушения акустического шума.

В работе рассматривается один из возможных вариантов усовершенствованного кондиционера потока, внутреннее наполнение которого состоит из набора изогнутых перфорированных пластин. Такой кондиционер потока ориентирован на использование в сочетании с ультразвуковыми расходомерами. Размер перфораций в пластинах учитывает специфику работы ультразвуковых расходомеров, а изгиб пластин в форме букв “v” и “w” позволяет увеличить проницаемость устройства. Последний фактор достаточно важен, так как акустические возмущения чаще всего генерируются в трубопроводах низкого давления и высокие потери давления на устройствах недопустимы.

Эксперименты выполнены с несколькими вариантами наполнения кондиционера потока. Варьировались: форма изгиба пластин, коэффициент перфорации пластин (0,38 и 0,45), диаметр кондиционера потока, по отношению к диаметру трубопровода $D_{тр}$ (1; 1,56 и 2,5), количество последовательно установленных пластин (2 и 4).

Эффективность кондиционера потока оценивалась с трех точек зрения: снижение акустического воздействия, величина гидравлического сопротивления, способность выравнивать профиль скорости. Гидравлическое сопротивление исследуемых кон-

струкций определялось стандартным образом по перепаду давления в диапазоне чисел Рейнольдса от 7400 до 23000. Специфическим был подход к определению эффективности по двум другим направлениям исследования. В качестве исходного сигнала в этих случаях брались сигналы непосредственно с пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) ультразвукового расходомера. Это позволило учесть спектр чувствительности ПЭП, спектр подавляющего фильтра и ход ультразвуковых лучей внутри прибора.

При определении акустической эффективности сопоставлялись отношения сигнал-шум в трубопроводе без кондиционера потока и с кондиционером потока. В обоих случаях источник шума располагался на одинаковом расстоянии от входного сечения расходомера. В качестве источника шума использовалась труба с соплом, размещенная внутри трубопровода, соединенного с входом расходомера. Перепад давления на сопле составлял до 0,1 МПа. Сжатый воздух подавался от ramпы высокого давления, оснащенной регулятором давления.

В опытах по установлению эффективности выравнивания потока контролировалась частота поступления полезного сигнала ПЭП. Этот параметр непосредственно определяет измеряемый расходомером расход. Было исследовано 10 форм предвключенных участков трубопровода, различающихся пространственной конфигурацией и сечением составных элементов.

Наибольший коэффициент глушения шума (5,7) был получен в устройстве с четырьмя w-образными пластинами с коэффициентом перфорации 0,38, установленными в обечайке 1,56D_{тр}. Близкий коэффициент глушения шума (5,24) получен для такого же набора пластин, но размещенных в обечайке 2,5D_{тр}. Для последнего устройства также был получен наименьший коэффициент гидравлического сопротивления – 1,45, что в 1,73 раза меньше конструкции 1,56D_{тр}. Соответственно, w-образные пластины, размещенные в обечайке 2,5D_{тр}, дали и наилучшее значение отношения коэффициента акустической эффективности к гидравлическому сопротивлению.

Максимальная дополнительная погрешность измерения расхода, которую вносит кондиционер потока по сравнению с прямолинейным участком трубы длиной 30 калибров, при расходах $0,5Q_{наиб}$ и выше составляет $\pm 0,4\%$. При расходах менее $0,2Q_{наиб}$ величина дополнительной погрешности увеличивается до $\pm 0,65\%$. При этом максимальные отклонения получены для варианта предыстории течения, при котором в трубопровод устанавливались два колена, ориентированных в разных плоскостях.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-01392,
<https://rscf.ru/project/22-29-01392/>*

**МОДЕЛЬ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ПЛОТНОСТИ (ЭЦП)
В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
(ВИРТУАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ЭЦП)**

Габитов С.И.

ООО «Газпромнефть НТЦ»

E-mail: gsi94@yandex.ru

Забойное давление – параметр, влияющий на процесс бурения. Однако, в связи с оптимизацией бурения и экономией денежных средств, все чаще отказываются от датчика забойного давления (датчик ЭЦП). Другие альтернативные способы оценки с помощью математических методов и расчетов в гидравлических модулях не обеспечивают достаточную точность и оперативность расчетов.

Расчет забойного давления (ЭЦП) является важным аспектом для безопасного бурения. В связи с чем актуально создание виртуального датчика ЭЦП, который на основе параметров бурения, регистрируемых на устье скважины без внутрискважинных измерений, будет определять текущие значения циркуляционной плотности.

Основная цель исследования – создание виртуального датчика для расчета ЭЦП на основе параметров бурения, регистрируемых на устье скважины с использованием методов машинного обучения. Используемые данные были собраны во время бурения горизонтальных секций, которые охватывали технологические параметры бурения и замеры ЭЦП. Построенная модель (виртуальный датчик ЭЦП) позво-

ляет восстанавливать значения ЭЦП на скважинах с отсутствующим датчиком забойного давления с целью контроля бурения в границах «безопасного окна» и минимизации средств.

В исследовании представлена модель расчета ЭЦП с использованием алгоритмов машинного обучения. Для разработки модели виртуального датчика ЭЦП были собраны фактические промысловые данные со скважин, которые включают технологические параметры бурения, полученные с технического оборудования, расположенного на устье, и значения ЭЦП, измеренные с помощью датчика забойного давления в процессе бурения. Модель была обучена, протестирована и оптимизирована для обеспечения оценки ЭЦП.

В дальнейшем предполагается обучение модели на других месторождениях, расчет ЭЦП для других секций скважины и сопоставление с зарубежными аналогами. Также возможна автоматизация оценки ЭЦП с целью обеспечения безаварийного бурения (предупреждение и выдача рекомендаций при приближении и выходе за границы «безопасного окна» бурения.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИТОКА ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ
В СКВАЖИНУ С ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА
ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Мухаметова З.С.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: DavletbaevAY@rambler.ru

Вопросы добычи тяжелой нефти с помощью вертикальной и горизонтальной скважин обсуждаются в работах многих авторов [1–3]. Моделирование добычи с поэтапным электромагнитным (ЭМ) воздействием в скважине с одиночной трещиной гидравлического разрыва пласта обсуждается в работах [4]. Результаты численного моделирования притока к скважине с двумя перпендикулярными трещинами обсуждаются в работах [5]. В последних двух работах используется выражение для распределенных источников тепла, которое получено в работе Abernethy E.R [1].

В данной работе приведены результаты численного моделирования добычи высоковязкой нефти при поэтапном высокочастотном электромагнитном воздействии на продуктивный пласт в скважине после операции гидравлического разрыва пласта. Рассматривается приток высоковязкой нефти к скважине с трещиной, которая заполнена пропантом. Проводимость трещины существенно больше проводимости пласта. Диэлектрические и тепловые свойства трещин и пласта полагаются одинаковыми. В выражении для плотности тепловых источников использовалась поправка для ближней зоны, которая существенно влияет на абсолютные значения температуры в околоскважинной зоне. Выполнены расчеты для случаев с различной мощностью излучателя ЭМ волн, для «коротких» трещин с низкой проводимостью и трещин с различными длинами трещин, во всех случаях выполнено сравнение с технологией «холодной» добычи.

Рассматривается процесс фильтрации жидкости в трещине гидроразрыва пласта и в низкопроницаемом коллекторе, которое описывается уравнениями пьезопроводности и теплопроводности:

$$\varphi_f \beta_{ft} \left(\frac{\partial P_f}{\partial t} - \frac{\delta_o}{\beta_o} \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_f}{\mu_o} \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + \frac{g_f}{w_f h}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial t} - \varphi_f \eta_o \rho_o c_o \frac{\partial P_f}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ft} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) - \rho_o c_o v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + q^{(E)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varphi_m \beta_{mt} \left(\frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\delta_o}{\beta_o} \frac{\partial T_m}{\partial t} \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_m}{\mu_o} \frac{\partial P_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_m}{\mu_o} \frac{\partial P_m}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial t} - \varphi_m \eta_o \rho_o c_o \frac{\partial P_m}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) - \\ - \rho_o c_o \left(v_{mx} \frac{\partial T_m}{\partial x} + v_{my} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + q^{(E)}. \end{aligned} \quad (4)$$

До начала добычи жидкости из скважины предполагается, что в скважине осуществлен гидравлический разрыв пласта. Технология добычи высоковязкой нефти предполагает периодическое тепловое воздействие, которое состоит на нескольких этапах. На первом этапе предполагается «холодная» добыча без теплового воздействия. На втором этапе осуществляется добыча с постоянным перепадом давления и одновременным высокочастотным ЭМ воздействием на продуктивный пласт. На третьем этапе работа генератора ЭМ волн приостанавливается, но скважина продолжает добычу. При этом добыча нагретой жидкости продолжается до падения добычи и/или температуры в скважине до практически первоначальных (до начала воздействия) значений. При реализации в промышленных условиях длительности всех этапов могут корректироваться и варьироваться в зависимости экономических, энергетических, технологических и других соображений.

Моделирование показало, что реализация поэтапного теплового воздействия наиболее эффективна (с точки зрения увеличения добычи по сравнению с «холодной» добычей) в случаях с «короткими» трещинами с низкой проводимостью трещины гидроразрыва пласта. В промышленных условиях, например, может осуществляться «холодная» добыча в скважине после нескольких гидравлических разрывов пласта. После снижения добычи жидкости в связи с ухудшением проводимости и уменьшением эффективных длин трещин, как вариант, можно реализовать добычу с поэтапным ЭМ воздействием.

Список литературы

1. Abernethy E. R. Production increase of heavy oils by Electromagnetic heating // J. Can. Petrol. Technol, 1976. V. 15, No. 3, P. 91–97.
2. Kovaleva L.A. and Khaydar A.M. Physical and rheological properties of petroleum fluids under the radio-frequency electromagnetic field effect and perspectives of technological solutions // Applied Surface Science Journal, ELSEVIER. 2004. V. 238. No. 1–4. P. 475–479.
3. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Mathematical modeling and field application of heavy oil recovery by Radio-Frequency electromagnetic simulation // J. Petr. Sci. and Eng. 2011. V. 78. No. 3–4. P. 646–653.
4. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Heavy Oil Production by Electromagnetic Heating in Hydraulically Fractured Wells // Energy Fuels. 2014. V. 28. No.9. P. 5737–5744.
5. Davletbaev A.Y., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M., Babadagli T. Multi-Stage Hydraulic Fracturing and Radio-Frequency Electromagnetic Radiation for Heavy-Oil Production // J. of Unconventional Oil and Gas Resources. V. 12. 2015. P.15–22.

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-11-20042)

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ
ПРИ ДАВЛЕНИИ ЗАКАЧКИ ПРЕВЫШАЮЩЕМ
МИНИМАЛЬНОЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ**

Давлетбаев А.Я.^{1,2}, Губайдуллин М.Р.¹

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

² Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: DavletbaevAY@bnipi.rosneft.ru

На текущий момент значительная доля добычи углеводородов осуществляется на месторождениях Западной Сибири, которые характеризуются низкой проницаемостью и высокой расчлененностью продуктивных пластов. Практически во всех скважинах перед началом добычи углеводородов выполняется гидравлический разрыв пласта (ГРП). После периода добычи отдельные скважины в элементах разработки переводятся в нагнетание. При переводе в нагнетание закачка жидкости в эти скважины проводится с превышением давления над минимальным горизонтальным напряжением пласта. Большое количество промысловых исследований подтверждают наличие самопроизвольного развития трещин автоГРП в нагнетательных скважинах [1–2].

В данной работе обсуждаются результаты промысловых исследования нагнетательных скважин на установившихся режимах закачки. Исследования проводятся на нескольких режимах закачки с давлениями выше и ниже давления смыкания трещины автоГРП [2]. Зависимости расхода закачиваемой жидкости от давления, как правило, имеют нелинейный вид. При интерпретации таких исследований определяются пластовое давление, давление смыкания трещины автоГРП, коэффициенты приемистости.

Результаты промысловых исследований используются для оценки изменения полудлин трещин на режимах выше давления автоГРП с использованием зависимости скин-фактора от приведенного радиуса [3]. Этот подход имеет предпологает наличие трещины бесконечной проводимости, не учитывает нестационарную утечку жидкости на границе «трещина-пласт», изменение геометрии трещины на режимах, зависимость напряжений от давления и др. Для учета этих эффектов предлагается в гидродинамическом симуляторе «РН-КИМ» выполнить моделирование самопроизвольного развития трещины автоГРП при проведении исследования на установившихся режимах закачки.

Полагается, что трещина в нагнетательной скважине состоит из закрепленной и динамической части. При этом фильтрационные свойства закрепленной части трещины соответствуют характеристикам пропанта, а незакрепленная часть трещины динамическая величина и определяется превышением давления над минимальным горизонтальным напряжением [4–5]. Двухфазная фильтрация (вода, нефть) во всех областях описывается уравнениями Маскета-Мереса:

$$\operatorname{div} \left(\frac{K_o}{\mu_o B_o} (\nabla P_o - \rho_o g \nabla z) \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\varphi \frac{s_o}{B_o} \right), \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \left(\frac{K_w}{\mu_w B_w} (\nabla P_w - \rho_w g \nabla z) \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\varphi \frac{s_w}{B_w} \right), \quad (2)$$

где K – фазовая проницаемость, m^2 , μ – вязкость фазы, m^2 , B – объемный коэффициент фазы, д.ед. , P – давление фазы, Па , ρ – плотность фазы, кг/м^3 , φ – пористость, s – насыщенность фазы, индексы: o и w относятся к нефти и воде, соответственно; m – низкопроницаемый пласт (матрица); f – закрепленная часть трещины гидроразрыва пласта; d – динамическая часть трещины гидроразрыва пласта (автоГРП).

Развитие динамической части трещины имеет место при превышении давления закачки над минимальным горизонтальным напряжением $P_d > \sigma_{\min}(P_d)$. Проницаемость динамической части трещины автоГРП получена из выражения

$$k_d = \frac{w_d^2}{12} = \frac{C_d^2 (P_d - \sigma_{\min}(P_d))^2}{12} \quad (3)$$

где C_d – коэффициент податливости трещины, σ_{\min} – минимальное горизонтальное напряжение.

Предложенный алгоритм учета динамической части трещины автоГРП позволяет рассчитывать эволюцию трещины в процессе проведения гидродинамических исследований скважин на установившихся режимах закачки в гидродинамическом симуляторе ПК «РН-КИМ». Апробация подхода выполнена на промысловых исследованиях нагнетательных скважин.

Список литературы

1. Мальцев В.В., Асмандияров Р.Н., Байков В.А., Усманов Т.С., Давлетбаев А.Я. Исследование развития трещин автоГРП на опытном участке Приобского месторождения с линейной системой разработки // Нефтяное хозяйство. 2012. № 5. С. 70–73.
2. Давлетбаев А.Я., Озкан Э., Слабещкий А.А., Никишов В., Усманов Т. Исследование и анализ результатов многопластовых скважин Приобского месторождения // SPE 117411. 2008. <http://dx.doi.org/10.2118/117411-MS>.
3. Давлетбаев А.Я., Байков В.А., Бикбулатова Г.Р., Асмандияров Р.Н., Назаргалин Э.Р., Слабещкий А.А., Сергейчев А.В., Нуриев Р.И. Промысловые исследования по изучению самопроизвольного развития техногенных трещин в нагнетательных скважинах // SPE-171232. 2014. <http://dx.doi.org/10.2118/171232-MS>.
4. Давлетбаев А.Я., Мухаметова З.С. Моделирование закачки жидкости в скважину с развитием трещины гидравлического разрыва пласта // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. №4. С. 1074–1082.
5. Nordgren R. P. Propagation of a vertical hydraulic fracture // Soc. Petrol. Eng. J. 1972. No. 4. P. 306–314.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ОБРАЗЦОВ КЕРНА ПРИ ПОМОЩИ НАНОСУСПЕНЗИИ

Жигарев В.А.¹, Минаков А.В.^{1,2}, Гузей Д.В.^{1,2}, Пряжников М.И.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

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

e-mail: VZhigarev@sfu-kras.ru

До сих пор актуальной проблемой разработки нефтяных месторождений с применением заводнения является обводнение месторождений. Одной из основных целей в методах увеличения нефтеотдачи пластов является изменение смачиваемости породы, способствующее извлечению как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти. В традиционных технологиях модификация характера смачиваемости обеспечивается в результате введения в пластовые флюиды синтетических поверхностно-активных веществ, зачастую обладающих высокой токсичностью. Возникающие при этом экологические проблемы могут быть решены путем замены подобных ПАВ суспензиями наночастиц.

В работах [1, 2] было показано, что добавки наночастиц позволяют значительно увеличить коэффициент извлечения нефти. Так, в работе [1] для этой цели использовали наночастицы SiO₂ с размерами 20–70 нм. В результате было показано, что применение наножидкости позволяет повысить коэффициент извлечения нефти с 47 до 76% по сравнению с пластовой водой. Данный эффект авторы объяснили тем, что в результате адсорбции наночастиц материал породы приобретает свойства водосмачивания, что способствует вымыванию как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти.

В данной работе проведены экспериментальные исследования по вытеснению нефти из керна с помощью растворов суспензий наночастиц (наножидкостей). В качестве горной породы коллектора использовался песчаник Berea Sandstone – это осадочная порода, зерна которой преимущественно состоят из кварца, удерживаемого вместе кремнезёмом. Относительно высокая пористость и проницаемость Berea Sandstone делает его хорошей породой-коллектором, и общепризнанным тестовым материалом.

Процедура эксперимента проходила следующим образом, через насыщенные нефтью образцы керна прокачивался вытесняющий агент с постоянным расходом и с фиксацией объёма вытесненной жидкости с помощью мерных пробирок. Коэффициент вытеснения нефти ($K_{\text{выт}}$) определялся как отношение вытесненного объёма флюида к объёму насыщенного флюида, определённого по разнице масс ненасыщенного и насыщенного керна. Испытания каждого тестируемого состава выполнено не менее чем на двух независимых образцах кернах.

Первоначально исследовалась зависимость концентрации наночастиц в наносуспензии на эффективность вытеснения нефти наносуспензиями. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.01 до 0.5 мас. %, а их размер – от 10 до 35 нм. Исследуемые наножидкости были получены путем разбавле-

ния водой силиказоля. Получена зависимость коэффициента вытеснения нефти от порового объёма прокачиваемой жидкости в зависимости от концентрации наночастиц размером 10 нм.

С увеличением концентрации наночастиц коэффициент вытеснения очень существенно увеличивается. Причем заметное увеличение наблюдается уже при незначительных концентрациях наночастиц 0.01 мас. %. Эффект проявляется уже начиная с одного закачанного порового объёма и усиливается после закачки третьего порового объёма. Далее в диапазоне концентраций от 0.05 до 0.25 мас. % меняется слабо. Максимальное значение $K_{\text{выт}}$ достигается при концентрации 0.25 мас.%, и далее при увеличении концентрации наночастиц эффект снижается. Применение данных наносуспензий с концентрацией выше 0.25 мас. % нецелесообразно. При закачке водой подобное поведение не наблюдается. Проведённые фильтрационные эксперименты позволили установить зависимость $K_{\text{выт}}$ от размера наночастиц. Было показано, что при прочих равных условиях $K_{\text{выт}}$ при вытеснении нефти с помощью наносуспензий возрастает с уменьшением размера наночастиц. Такое поведение обусловлено зависимостью коэффициента межфазного натяжения на границе нефть/наносуспензия и краевого угла смачивания в точке контакта нефть/горная порода/наносуспензия от размера наночастиц. С уменьшением размера наночастиц коэффициент межфазного натяжения уменьшается, а гидрофилизирующая способность суспензии напротив увеличивается. Все это способствует вымыванию капиллярно удерживаемой в порах нефти и лучшему отмыванию поверхности зёрен песчаника от нефтяных пленок, что приводит к увеличению $K_{\text{выт}}$.

Список литературы

1. Roustaei A., Bagherzadeh H. Experimental investigation of SiO₂ nanoparticles on enhanced oil recovery of carbonate reservoirs // J. Pet. Explor. Prod. Tech. 2014. V. 5, P. 27–33
2. Ehtesabi H., Ahadian M.M., Taghikhani V. Enhanced Heavy Oil Recovery Using TiO₂ Nanoparticles: Investigation of Deposition during Transport in Core Plug. // Energy Fuels, 2015, No. 29(1), P.1–8.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВАЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОДЗЕМНОМ ПЛАСТЕ

Жигульский С.В.¹, Канин Е.А.², Гарагаш И.А.^{2,3}, Боронин С.А.²,
Гарагаш Д.И.⁴, Афанасьев А.А.⁵, Осипцов А.А.², Пенигин А.В.¹

¹ Научно-технологический центр «Газпром нефти», Санкт-Петербург

² Сколковский институт науки и технологий, Москва

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва

⁴ Университет Далхаузи, Галифакс, Канада

⁵ Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: Zhigulskiy.SV@gazpromneft-ntc.ru

В настоящее время активно развиваются технологии снижения антропогенного загрязнения атмосферы, в том числе, уменьшения выбросов углекислого газа (CO₂). Одним из перспективных направлений таких технологий является утилизация CO₂ путем его закачки в подземные пласты в сверхкритическом (сжиженном) состоянии [1]. Разработка эффективного метода размещения CO₂ должна включать в том числе, определение диапазона технологических параметров закачки, при которых не возникают нежелательные геомеханические эффекты в целевом пласте и окружающих его пластах (подошве и покрышке): возникновение новых трещин и неконтролируемый рост техногенных трещин гидроразрыва пласта, активация существующих тектонических разломов и трещин. Настоящая работа посвящена математическому моделированию процесса закачки сверхкритического CO₂ в подземный пласт, содержащий один или несколько тектонических разломов с целью определения сопутствующих геомеханических рисков.

Проводится сопряженное гидро- и геомеханическое моделирование фильтрации CO₂ в целевом пласте с использованием гидродинамического симулятора MUFITS [2, 3] и коммерческого механического симулятора FLAC3D [4]. Сопряжение расчетов проведено путем расщепления физических процессов: на каждом шаге по времени проводится расчет полей давления и температуры в пласте вследствие решения уравнений многофазной фильтрации и закона сохранения энергии при заданном распределении проницаемости и пористости в коллекторе (композиционная модель фильтрации [3]), затем на их основе в симуляторе FLAC3D проводится расчет напряженно-деформированного состояния пластовой системы, рассчитываются изменения пористости и проницаемости породы из-за деформаций, возникающих как результат изменения порового давления и температуры, в том числе, при активации тектонического разлома. В течение нового шага по времени в гидродинамическом симуляторе проводится расчет с измененными значениями фильтрационно-емкостных свойств пласта.

Предложена новая модель динамики проводимости породы в зоне разлома, состоящей из узкой зоны высоких деформаций, окруженной распределенной переходной зоной раздробленной породы - зоной повреждения [5] (см. рис.1).

Моделирование горной породы проведено в рамках упругопластической реологической модели среды с внутренним трением и дилатансией, что позволяет определить разуплотнение горной породы в зоне

разлома при сдвиге и связать коэффициент проницаемости трещин с интенсивностью пластических деформаций и коэффициентом дилатансии. Раскрытие трещин при сдвиге происходит в результате преодоления сил трения и взаимодействия шероховатостей и моделируется в рамках подхода Бартона-Бандиса [7], где величина раскрытия, обусловленная сдвигом, пропорциональна сдвиговому перемещению и тангенсу динамического угла дилатансии.

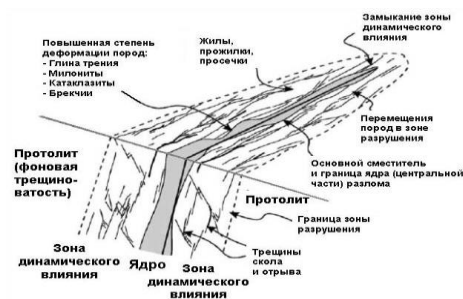


Рис. 1 Модель внутреннего строения зоны разлома [6].

Проведено параметрическое исследование размещения CO₂ в подземный пласт. Получен диапазон технологических параметров закачки, при котором не происходит активация тектонического разлома и, как следствие, не возникает сейсмической активности и разгерметизации зоны захоронения углекислого газа.

Список литературы

1. Bickle Mike J. Geological carbon storage // Nature Geoscience. 2009. V. 2, No. 12, P. 815–818.
2. Afanasyev A. MUFITS Reservoir Simulation Software. <http://mufits.org>.
3. Afanasyev A., Vedeneva E. Compositional modeling of multi-component gas injection into saline aquifers with the MUFITS simulator // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. P. 103988.
4. FLAC3D: Explicit Continuum modelling of non-linear material behavior in 3D, ITASCA consulting group, Inc. <https://www.itascag.com/software/flac3d>
5. Wibberley C. A. J., Yielding G., Di Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: A review // Geological Society, London, Special Publications. 2008, V. 299, No. 1, P. 5–33.
6. Shipton Z. K., Cowie P. A. Damage zone and slip-surface evolution over μm to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah // Journal of Structural Geology. 2001. V. 23, No. 12, P. 1825–1844.
7. Barton N. Modelling Rock Joint Behavior from In Situ Block Tests: Implications for Nuclear Waste Repository Design. ONWI-308, prepared by Terra Tek, Inc. for Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH. 1982 118p.

Работа выполнена при поддержке
Научно-технологического центра Газпромнефть

ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Калинин О.Ю.¹, Григорьев Г.С.¹, Зайцев С.В.², Ельцов Т.И.²

¹ ПАО «Газпром нефть»

² ООО «Газпромнефть-ЦР»

e-mail: Kalinin.Oyu@gazprom-neft.ru

На текущий момент крупные нефтегазовые компании все чаще обращают свое внимание на развитие альтернативных источников энергии. Подход компаний фокусируется на диверсификации бизнеса за счет инвестиций в новые направления, которые в перспективе могут принести значительную выгоду.

Одним из направлений развития низкоуглеродной энергетики является геотермальная энергия. Геотермальная энергия – это энергия земли, используемая для генерации электроэнергии или, в случае прямого использования, для обогрева объектов народного хозяйства. Геотермальная энергия является одним из наиболее перспективных источников электроэнергии на Земле. Потенциально, геотермальная энергия доступна в любой точке планеты, а ее ресурсы практически неисчерпаемы.

У геотермальной энергетики есть несомненные плюсы, среди которых:

1. Неиссякаемость.
При условии отсутствия значительных подземных изменений, ГеоТЭС может послужить практически неиссякаемым источником энергии.
2. Стабильность.
Полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года, в отличие от ветряных и солнечных ВИЭ.
3. Компактность расположения.
Одним из важных плюсов геотермальных электростанций стала их компактность: так как теплоноситель берётся в буквальном смысле из земли, на поверхности строится машинный зал с турбиной и генератором и градирня, которые вместе занимают очень мало места.
4. Экологичность.
Функционирование геотермальной станции практически безвредно: её выброс углекислого газа в атмосферу оценивается в 45 кг CO₂ на 1 кВт·ч выработанной энергии (в 20 раз меньше).
5. Источник тепловой и электроэнергии.
ГеоТЭС могут выполнять роль как отопительного сооружения, так и генератора энергии.

Однако, среди очевидных плюсов этой технологии, у нее есть определенные недостатки, такие как:

1. Необходимость фильтрации и утилизации рабочего флюида.
Пароводяная смесь из земных глубин насыщена газами и тяжелыми металлами, которые свойственны конкретному участку земной коры: свинец, кадмий, мышьяк, цинк, сера, бор, аммиак, фенол и т.д. ГеоТЭС закрытого цикла закачивают конденсат обратно под землю с помощью вспомогательных скважин.
2. Специальные геологические условия.
Как правило, ГеоТЭС создают в сейсмически активных зонах. Чтобы снизить затраты на бурение скважин, имеет смысл создание ГеоТЭС в районах с высоким температурным градиентом (>7°C на 100 м глубины).
3. Геологические риски.
Не все геологические изыскания на перспективном участке могут закончиться успешно (недостижение заданных температур, отсутствие достаточного пароводяного притока), требуется проведение ГРП.
Авторы в данной работе фокусируются на геологоразведочном этапе, а именно поисках высокотемпературных объектов. Образом результата на данном этапе является методика поиска и оценки энергетического потенциала геотермальных объектов, которая находить и классифицировать объекты по геотермальному потенциалу с высокой точностью. Работа включает в себя анализ и обзор современных методов поиска месторождений геотермальной энергии, разработку модели геотермального месторождения и проведение моделирования на ее базе, составление матрицы (дерева) решений с ранжированием выбранных методик геофизической съемки в зависимости от типа месторождения геотермальной энергии, региона съемки и этапа по результатам моделирования и разработку оптимальной методики поиска месторождений геотермальной энергии.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ В ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ МАКСВЕЛЛА С ДВУМЯ ВРЕМЕНАМИ РЕЛАКСАЦИИ**Кармушин С.Р.**

Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: stepan.karmushin@yandex.ru

Одной из характерных особенностей движения вязкоупругих сред, привлекающих внимание исследователей, является аномальное поведение жидкости при определенных параметрах течения. Ярким проявлением развития неустойчивости потока является эффект сдвигового расслоения (shear banding), когда в течении неньютоновской жидкости возникает конечное число однонаправленных слоев, отличающихся скоростью сдвига. Это явление охватывает широкий класс течений, характеризующихся возникновением внутренних разрывов и, в конечном итоге, приводит к резкому уменьшению сопротивления при транспортировке вязкоупругих жидкостей в каналах и трубах.

В работе [1] предложена и проанализирована нелинейная модель Джонсона – Сигалмана – Олдройда, которая объединяет в себе модель Джонсона – Сигалмана с несколькими временами релаксации и подход с введением искусственной ньютоновской вязкости в законе сохранения импульса. Ключевая особенность этой модели – немонотонная зависимость стационарного напряжения сдвига от скорости сдвига. Это приводит к образованию скачков скорости сдвига в стационарном течении, когда градиент давления превышает некоторое критическое значение. Благодаря этой особенности, модель позволяет описывать различные неустойчивости потока, включая shear banding. В работе [2] исследовано течение Куэтта в рамках модели

Джонсона – Сигалмана с двумя временами релаксации, но без ньютоновской вязкости и построена численная модель для расчета нестационарных решений с учетом сдвигового расслоения потока.

В данной работе рассмотрены одномерные нестационарные течения несжимаемой вязкоупругой жидкости между параллельными пластинами и в трубе (течение Пуазейля) в рамках модели Джонсона – Сигалмана с двумя временами релаксации. Проведены нестационарные расчеты различных режимов течения, продемонстрировано возникновение внутренних линий скольжения при увеличении скорости потока (shear banding). Построены стационарные решения и исследована их структура. Показано, что стационарные решения с внутренними линиями скольжения могут быть получены как численный предел нестационарных течений. На основе нестационарных расчетов построены диаграммы зависимости напряжения сдвига от скорости для течений Куэтта и Пуазейля. Проанализировано явление гистерезиса при циклическом изменении скорости потока.

Список литературы

1. D. S. Malkus, J. A. Nohel, B. J. Plohr Analysis of new phenomena in shear flow of non-newtonian fluids // SIAM J. Appl. Math. 1991. V. 51, N 4. P. 899–929.
2. В. Ю. Ляпидевский Течение Куэтта вязкоупругой среды максвелловского типа с двумя временами релаксации // Тр. МИАН. 2018. Т. 300. С. 146–157.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ КЕРНА В ДНЕВНОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ СВЕТЕ

Колосовская К.А.¹, Горбунов В.И.², Салимов Т.А.², Мамяшев Т.В.¹

¹ ООО «Газпромнефть НТЦ»

² ООО «КОРУС Консалтинг СНГ»

e-mail: Mamyashev.TV@gazpromneft-ntc.ru

С развитием технологий компьютерного зрения и систем искусственного интеллекта, а также с повышением требований к эффективности бизнес-процессов возникает необходимость адаптировать цикл лабораторных исследований керна к современным реалиям. От качества и состава поступающего каменного материала, скорости его приемки и анализа зависит оперативность и успешность принятия решений в рамках цикла ГРП. По этой причине, а также ввиду необходимости снижения трудозатрат, влияния человеческого фактора и унификации подходов к процессу проведения лабораторных исследований каменного материала, машинная обработка фотоизображений керна в дневном и УФ свете видится эффективным решением с большим потенциалом для развития.

В рамках данной задачи был проделан комплекс работ по сбору и анализу имеющегося массива данных. В частности, было подготовлено 17740 фотографий керна, исторические сведения в виде послойного литологического описания, данные об оценке качества керна. В результате анализа и балансировки массива данных на равно распределенные классы, с учетом территориальной принадлежности скважин-источников, была поставлена задача разработать алгоритм машинного обучения, который позволит определить по фото керна с заданной точностью: тип породы (песчаник, алевролит, аргиллит), целостность (разрушен, не разрушен), насыщение (нефтенасыщенный, не насыщенный), карбонатность (карбонатный, не карбонатный).

Впоследствии данный data-set был дополнен и обогащен сторонними экспертами с помощью специально разработанного инструмента сегментации и классификатора пород, в результате чего были получены дополнительные сведения для обучения принятой математической модели и повышена точность распознавания. Кроме того, после адаптации алгоритма сегментации удалось добиться преобразования

контрастных границ в горизонтальные. По мере развития подходов, алгоритмы оценки разрушенности были переработаны с целью повышения метрик качества работы модели путем применения аналитических методов предиктивного анализа. Также данные изменения позволили проводить оценку кондиционности керна.

Под термином «кондиционность» в рамках данного проекта подразумевалась возможность изготовления из выбранного участка керна образца заданного диаметра. В результате были разработаны модели классификации изображений кернов по параметру - спиленный/целый; нейросетевая модель сегментации керна по признаку разрушенности. Создан алгоритм оценки угла наклона керна, алгоритмы оценки кондиционности и определения разрушенностей, а также тип породы.

Список литературы

1. Воробьев К.А. Воробьев А.Е. Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн // Вестник Евразийской науки, – 2018. – №3.
2. Алтунин А.Е., Мальшаков А.В., Семухин М.В., Ядрышников О.А. ООО ТНЦ. Методы компьютерной обработки фотографий керна при изучении коллекторских свойств продуктивных пластов. // Нефтяное хозяйство – 2013. – №11. – с. 12-16.
3. Чистяков С.П. СЛУЧАЙНЫЕ ЛЕСА: ОБЗОР // Труды Карельского научного центра РАН – 2013. – №1. – с. 117-136.
4. Geurts, P., Ernst, D., Wehenkel, L. Extremely randomized trees // Machine Learning. – 2006. – №63. – p. 3–42.
5. Srivastava D., L. Bhambhu Data classification using support vector machine. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2010. – №12(1). – p. 1–7.
6. Н.М. Недоливко. Исследование керна нефтегазовых скважин // Изд-во ТПУ, – 2006. — 170 с.
7. Center Computer Science. Анализ изображений и видео. Глобальные признаки. 2017— Режим доступа: https://compscicenter.ru/media/courses/2017-autumn/spb-images-and-video-1/slides/images_and_video_1_lecture_031017.pdf (дата обращения: 14.12.2019). – Текст: электронный.
8. Официальный сайт документации Python: сайт. – URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 21.02.2020). – Текст: электронный.

ЗАКОН ФИЛЬТРАЦИИ С КАЖУЩЕЙСЯ ВЯЗКОСТЬЮ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ФЛЮИДОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Кравченко М.Н.^{1,2}, Аминев Д.А.²

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

² МГУ им. М.В. Ломоносова

e-mail: Kravchenko.m@gubkin.ru

Переход к разработке месторождений тяжелых углеводородов в низкопроницаемых пластах сопряжен не только с модификацией традиционных методов повышения нефтеотдачи, но и созданием обновленных теоретических подходов описания фильтрационных процессов в пористых средах. Используемые математические модели, как правило, базируются на классическом уравнении фильтрации Дарси, отражающем линейную зависимость приведенной скорости (w) от градиента давления (p). Для изотропных сред в качестве параметра пропорциональности используется скалярный коэффициент подвижности, отражающий отношение проницаемости пористого скелета (k) к вязкости насыщающего флюида (μ). Наличие нескольких фильтрующихся фаз, в том числе для анизотропных пластов, обобщается введением матрицы абсолютной проницаемости, и модификацией линейных законов фильтрации для каждой из фаз [1]. Если в пласте имеется сжимаемая фаза, используют двухчленный закон фильтрации (с линейной и квадратичной частью) при больших значениях фильтрационных чисел Рейнольдса. Однако, при обработке данных гидродинамических исследований (ГИС) на скважинах высоковязкой нефти, было замечено не удовлетворительное описание нестационарных режимов с использованием линейного или двухчленного законов, что стимулировало переход к описанию фильтрации по закону с предельным градиентом [2].

Изучение промыслового опыта и методов воздействия на низкопроницаемые коллектора показало, что наблюдается отклонение от линейного закона фильтрации в том числе и для маловязких жидкостей, реологические свойства которых идентифицируются с помощью ротационных вискозиметров, как ньютоновские. Эксперименты на ядрах выявили, что аномальное поведение жидкостей в пористых средах не описывается в полной мере и законом с предельным градиентом [3]. Попытки использования для фильтрационных течений степенных законов известны как в классической литературе, так и в практике интерпретации результатов ГИС на реальных скважинах при их остановке или запуске. Наиболее явное отклонение результатов моделирования наблюдается на начальных этапах лабораторных или промысловых экспериментов. Проблема проявилась наиболее остро при расчетах полимерного заводнения, используемого для выравнивания фронта вытеснения вязкого флюида (нефти) менее вязким (водным раствором). Качество процесса вытеснения существенно зависит от наличия в воде примесей солей или поверхностно активных частиц, в том числе полимеров. Даже малая концентрация полимерных частиц (полисахаридов или полиакриламидов) показало не только суще-

ственное изменение вязкости таких растворов, но и скорости сорбции, приводящей к изменению структуры образца [4]. Математическое моделирование с учетом изменения пор по размерам дало возможность получить адекватное описание эффекта повышения коэффициента нефтеотдачи при полимерном заводнении [5]. Однако на начальном этапе закачки полимерного раствора моделирование дало отклонение от экспериментальных точек, что привело авторов к решению модифицировать уравнение Дарси, с использованием «кажущейся» вязкости μ_* :

$$\vec{w} = -\frac{k}{\mu_*} \text{grad } p, \quad \mu_* = f(|\text{grad } p|) \quad (1)$$

Функциональная, зависимость вязкости от градиента давления устанавливается из эксперимента.

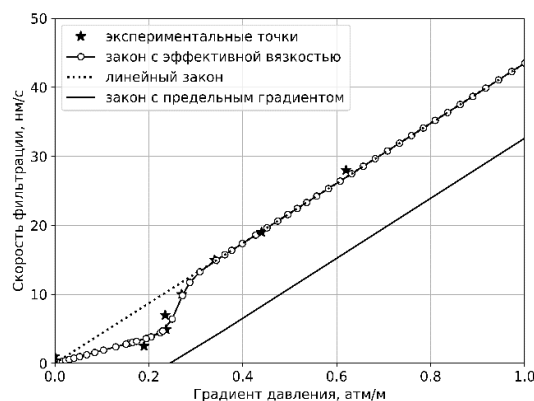


Рис. 1. Зависимость приведенной скорости от градиента давления при различных законах фильтрации в сравнении с экспериментальными данными.

Как видно из рис.1, использование закона фильтрации в форме (1) позволяет наилучшим образом провести моделирование процесса нестационарной фильтрации для реального эксперимента на [3].

Список литературы

1. Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Мамедов М.Т. Законы фильтрации с предельным градиентом в анизотропных пористых средах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. №2. С. 64–71.
2. Шагапов В.Ш., Белова О.В., Давлетбаев А.Я. Особенности фильтрации в низкопроницаемых коллекторах с проявлением предельного градиента // Инженерно-физический журнал.— 2014. Т. 87. № 6. С. 1269–1281.
3. Байков В.А., Колонских А.В., Евсеев О.В. и др. Способ определения застойных и слабодренлируемых нефтяных зон в низкопроницаемых коллекторах. Патент RU2524719 С1. 10.08.2014.
4. Kravchenko M.N., Ivlev M.I., Dieva N.N. Hydrodynamic approach to the processing of core sample tests considering microstructural changes // J. of Physics: Conf. Series, 2057 (2021). 7 PP.
5. Кравченко М.Н., Ивлев М.И., Пантелей К.Д. Математическое моделирование сорбционных процессов с учетом трансформации пористой матрицы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки., 2021. Т. 163. Кн. 2. С. 128–142.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФЛЮИДА С ПОРОДОЙ

Лисица В.В.¹, Хачкова Т.С.², Прохоров Д.И.¹, Базайкин Я.В.¹

¹ Институт математики СО РАН, Новосибирск

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

e-mail: lisitsavv@ipgg.sbras.ru

Одним из основных подходов к снижению содержания CO₂ в атмосфере и декарбонизации экономики является сбор и захоронение CO₂ в геологических формациях. Закачка CO₂ в пласт сопровождается рядом физических и химических процессов, которые могут приводить к существенному изменению физических свойств резервуара [Prasad et al., 2021]. В частности, растворение CO₂ в пластовом флюиде вызывает повышение кислотности среды, что, в свою очередь, приводит химическому взаимодействию флюида с вмещающей карбонатной породой (растворение матрицы породы, осаждение солей). В результате при относительно малом изменении пористости породы может существенно меняться проницаемость и механические свойства пласта. Поэтому при выборе пласта для захоронения CO₂ и при оптимизации процессов закачки необходим комплексный геофизический и геохимический анализ породы и пластовых флюидов. Одним из эффективных подходов к такому анализу является численное моделирование, в частности, моделирование химического взаимодействия флюида с породой с последующей оценкой изменений структуры порового пространства и физических свойств породы. В данной работе представлен численный алгоритм, реализующий такое моделирование с использованием технологии CUDA.

При моделировании воздействия химически-активного флюида на матрицу породы поток флюида может быть описан уравнением Стокса (в предположении, что время установления флюидопотока пренебрежимо мало в сравнении с характерным временем изменения геометрии порового пространства):

$$\nabla p - \mu \Delta \mathbf{u} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega(t),$$

где \mathbf{u} – скорость потока, p – давление, μ – динамическая вязкость жидкости, $\Omega(t)$ – расчетная область, зависящая от времени.

Перенос активного компонента удовлетворяет уравнению адвекции-диффузии:

$$C_t + \nabla \cdot (\mathbf{u}C - D\nabla C) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega(t),$$

где C – массовая концентрация активного компонента, D – коэффициент диффузии. На границе порового пространства и породы используются условия третьего рода:

$$D\nabla C \cdot \mathbf{n} = k_r(C - C_s), \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega,$$

где \mathbf{n} – вектор нормали, k_r – скорость реакции, C_s – равновесная концентрация. Движение границы задается нормальной скоростью в каждой точке границы:

$$v_n(\mathbf{x}, t) = k_r / \rho(C - C_s), \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega,$$

где ρ – плотность твердой фазы.

Для численного решения задачи применяется метод конечных разностей. Изменение геометрии границы моделируется методом поверхности уровня или level-set [Gibou et al., 2018]. Уравнение Стокса решается с использованием проекционного метода [Brown et al., 2001]. Для решения уравнения адвекции-диффузии применяется явная по времени схема, с использованием схемы WENO для аппроксимации конвективного члена. Детальное описание алгоритма представлено в работе [Prokhorov et al., 2022].

Для анализа изменения геометрии и топологии порового пространства в процессе взаимодействия с флюидом, а также фильтрационных свойств породы была проведена серия экспериментов, в которых варьировались: скорость потока флюида, скорость реакции, концентрация активного компонента при закачке, коэффициент свободной диффузии. В процессе моделирования оценивались значения пористости, проницаемости, что позволило выделить принципиально различные зависимости между пористостью и проницаемостью для разных условий закачки. Учет этих зависимостей необходим при проведении моделирования фильтрации химически-активного флюида на масштабе резервуара и последующей оптимизации процессов захоронения CO₂.

Список литературы

1. Prasad M., et al. CO₂ messes with rock physics // The Leading Edge. – 2021. – V. 40. – N. 6. – pp. 424–432.
2. Gibou F., Fedkiw R., and Osher S. A review of level-set methods and some recent applications // Journal of Computational Physics. – 2018. – V. 353. – pp. 82–109.
3. Brown D. L., Cortez R., and Minion M. L. Accurate Projection Methods for the Incompressible Navier-Stokes Equations // Journal of Computational Physics. – 2001. – V. 168. – N. 2. – pp. 464–499.
4. Prokhorov D., et al. Topology-based characterization of chemically-induced pore space changes using reduction of 3D digital images // Journal of Computational Science. – 2022. – V. 58. – pp. 101550.

Работа поддержана
Математическим центром в Академгородке
(договор №075-15-2022-281 от 05.04.2022)

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДИЗАЙНА ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА
НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ****Мальцев А.А.¹, Щербаков Г.Ю.²**¹ ООО «Газпромнефть НТЦ»² ООО «Газпромнефть Технологические Партнерства»

e-mail: maltsev.aa@gazpromneft-ntc.ru

Обработка призабойной зоны пласта (ОПЗ) является одним из самых распространенных методов интенсификации притока при добыче нефти. Причина заключается в достигнутой высокой рентабельности этого мероприятия. Основная технология ОПЗ – это закачка кислоты (КО) в призабойную зону пласта (ПЗП) с целью повышения продуктивности скважины (увеличения приемистости для нагнетательных скважин). В настоящее время эффективность кислотных обработок на месторождениях, приуроченных к терригенным коллекторам, находится в диапазоне 50–75%. Повышение эффективности программы ОПЗ может быть достигнуто путем совершенствования всей технологической цепочки. Большинство современных работ, посвящённых повышению эффективности КО в терригенных коллекторах основываются на разработке оптимального кислотного состава для рассматриваемого объекта (пласта).

В целом мало внимания уделяется кинетике реакций в условиях фильтрации КС в пористой среде, которая зависит от распределения кольматанта и минералов, фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) и геометрии забоя скважины. Хотя направление моделирование КО в карбонатных коллекторах с учетом кольматанта и горизонтальной геометрии заканчивания скважин проработано в достаточной степени. Специфика моделирования кислотной обработки в терригенных коллекторах заключается в большом количестве реакций из-за сложности минералогического состава, к тому же скорость растворения разных минералов сильно различается, к тому же продукты первичных реакций тоже вступают во взаимодействие с породой (вторичные и третичные реакции), что влияет на растворение породы в целом и влечёт за собой возникновение осадков, которые кольматируют поровое пространство породы-коллектора.

Основная идея заключается в достижении поставленной цели путём детального комплексного математического моделирования объектов и процессов, происходящих при закачке кислоты в полимиктовый пласт-коллектор, что повышает точность прогнозирования результатов обработки призабойной зоны пласта, что позволит повысить продуктивность скважины на основе решения оптимизационной задачи применительно к скорости и объёму закачиваемых в пласт реагентов.

В работе рассмотрены и проанализированы подходы к моделированию процесса очистки призабойной зоны. Рассмотрены и проанализированы влияние упрощений физико-химических и гидродинамических процессов в коллекторе и стволе скважины. На основе численного моделирования лабораторного эксперимента получены эмпирические коэффициенты для модели, на основании которых проведено моделирование процесса в масштабе скважины. Рассмотрены и смоделированы нелинейные эффекты возникающие при кислотной обработке полимиктового коллектора. Проведен анализ чувствительности применительно к моделированию геометрии заканчивания скважины, учета теплофизических характеристик и состава породы-коллектора.

Благодаря численной схеме модели кислотной обработки стало возможным проведение множества вычислительных экспериментов с варьированием параметров загрязнения призабойной зоны, загрязнения трещины ГРП и стенок трещины ГРП. Рассмотрены варианты и эффективность большеобъемных и малообъемных кислотных обработок.

На основе воспроизведения результатов лабораторных экспериментов рассмотрена возможно интенсификации притока на основе растворения минералогического скелета породы, относительно растворения кольматанта, в том числе для повторных и многократных обработок.

ВЛИЯНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА ВОДЫ С НАНОЧАСТИЦАМИ SiO₂ И РАСТВОРЕННЫМ SDS

Мелешкин А.В., Морозова М.А.

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики СО РАН

e-mail: mav@itp.nsc.ru

Газовый гидрат представляет собой клатратное соединение-включение, где молекулы газа заперты в кристаллическую решетку, сформированную молекулами воды и удерживаемые в ней силами Ван-дер-Ваальса. Фактически процесс гидратообразования является фазовым переходом первого рода, который происходит в случае контакта воды и газа при низких положительных температурах и повышенном давлении. Главной особенностью газового гидрата является возможность удерживания в себе значительного объема газа (до 170 объемов газа может содержаться в одном объеме гидрата). При этом каждый конкретный газ переходит в газогидратное состояние при оригинальных термобарических условиях, что открывает возможность их использования для улавливания конкретных компонентов газов из газовой смеси путём перевода этого компонента в гидратное состояние. Например, давление гидратообразования H₂ составляет 300 МПа, в то время как давление образования CO₂ составляет 2,91 МПа при 280 К.

Данная работа направлена на понимание фундаментальных основ процесса нуклеации газовых гидратов в присутствии поверхностно-активных веществ и наномасштабного пространственного ограничения на поверхности наночастиц. Полученные результаты лягут в основу гидратной технологии отделения газов из газовых смесей, что напрямую связано с задачей снижения антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу, эффективного улавливания углекислого газа в процессе конверсии «коричневого» и «серого» водорода в «голубой» водород, а также с разработкой энергоэффективных гидратных технологий транспортировки природного газа.

Работа была выполнена на установке, представляющей собой сосуд высокого давления (автоклав) изготовленного из нержавеющей стали диаметром 100 мм и высотой 300 мм. Максимальное рабочее давление сосуда составляет 2 МПа. Охлаждение выполнялось путём прокачки теплоносителя через охлаждаемую водяную рубашку, расположенную по периметру сосуда. Измерение температуры производилось при помощи термометра Pt100, а давления с помощью датчика давления ОВЕН ПД-100. Прокачка теплоносителя выполнялась с помощью криостата LOIP FT 316-40. Анализ спектров пропускания видимого света выполнялся на спектрографе СФ-2000.

Наножидкости были получены двухстадийным методом на основе дважды дистиллированной и деионизированной воды и наночастиц SiO₂ (Таркосил Т20, удельная площадь поверхности 27 м²/г, средний размер частиц 100 нм). В качестве стабилизатора было добавлено поверхностно-активное вещество додецилсульфат натрия. Концентрации SiO₂ и SDS составляли 300 и 1000 ppm соответственно. Смесь во-

ды, необходимого количества порошка наночастиц и стабилизатора обрабатывались в ультразвуковой ванне Sonogex Super RK 100H с частотой ультразвукового диспергатора 35 КГц и мощностью 80 Вт в течение часа при комнатной температуре.

Наножидкость объемом 300 мл помещали в экспериментальную установку. Далее происходило её охлаждение. После достижения температуры 4 °С отбирался первый образец раствора с помощью шприца. Далее установка герметично закрывалась и туда вкачивался углекислый газ до достижения давления до 3 МПа. В результате чего, после окончания времени индукции, в камере начинал происходить рост гидрата. После прекращения роста гидрата, производилось его полное разложение с помощью нагрева. Из оставшегося при этом раствора был отобран второй образец. Полученные образцы были исследованы с помощью спектрального анализа.

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 1. Был произведен анализ спектров коэффициента пропускания видимого света наножидкостью до и после гидратообразования. Анализ показал, что в изначальном растворе коэффициент составил 9,92, а после того, как из этого раствора был получен и разложен газовый гидрат – 19,92. Это свидетельствует о нарушении седиментационной устойчивости раствора в следствие недостаточной эффективности выбранной концентрации SDS. Для чего в будущем требуется подобрать оптимальную концентрацию ПАВ или использовать дополнительный стабилизатор.

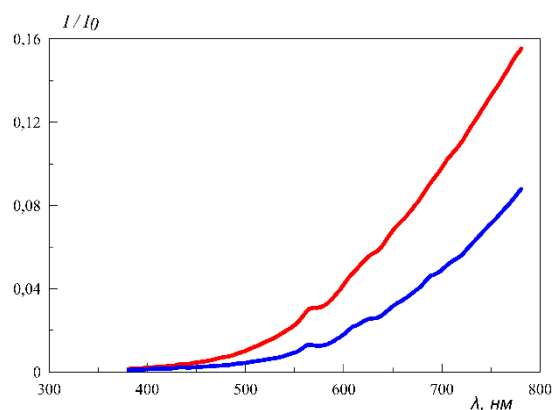


Рис. 1. Анализ спектров коэффициента пропускания видимого света наножидкостью до и после гидратообразования (синяя сплошная линия – образец до гидратообразования, красная сплошная линия – образец после гидратообразования).

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00428)

РАЗДЕЛЕНИЕ ВОДО-МАСЛЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**Мизёв А.И., Шмыров А.В., Мошева Е.А.**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: alex_mizev@icmm.ru

Одной из актуальных задач, возникающих при добыче и переработке нефти, является удаление примесного содержания воды, содержащейся в добываемой нефти в виде эмульсии. Содержание воды нежелательно как с точки зрения ускоренной коррозии оборудования, так и увеличенных энергозатрат на транспортировку по трубопроводам, связанную с повышенной вязкостью эмульсий. Кроме термической и химической обработки нефти, для разделения водонефтяных эмульсий на сегодняшний день применяется целый ряд технологий, основанных на воздействии различных силовых полей: гравитационных, инерционных, акустических, электрических. Все они основаны на использовании действующих на капли объемных сил, которые возникают вследствие различия физико-химических параметров (плотности, проводимости, диэлектрической проницаемости и др.) дисперсной фазы и дисперсионной среды. На сегодняшний день наиболее эффективными, с точки зрения скорости разделения и наименьшего влияния на нефть, считаются методы, основанные на использовании электрического поля. Основная идея электродегидраторов состоит в создании условий для электрокоалесценции, т.е. сближении и слиянии капель в электрическом поле, с последующим осаждением укрупненных капель в гравитационном или центробежном поле. При этом использование постоянных или низкочастотных (промышленная частота 50 Гц) переменных полей приводит к появлению нежелательных явлений, таких как выстраивание капельных цепочек, обратная эмульгация или возникновение ЭГД течений, что существенно ограничивает напряженность поля и, следовательно, эффективность метода.

В настоящем докладе мы предлагаем поменять концепцию метода, используя электрическое поле, в первую очередь, как инструмент для пространственного перераспределения капель за счет диэлектростатических эффектов, возникающих в неоднородных полях в силу в десятки раз большей диэлектрической проницаемости воды по сравнению с нефтью. Использование высокочастотных полей, когда период изменения поля много меньше характерных времен релаксации заряда в системе, позволяет избежать указанных выше нежелательных эффектов, сохраняя при этом явление электрокоалесценции. Адекватность предлагаемой идеи была проверена в ходе экспериментального исследования поведения модельных водо-масляных эмульсий в неоднородном высокочастотном электрическом поле. В качестве дисперсионной среды использована смесь бензола и хлорбензола равной с водой плотности, что позволило избежать гравитационных эффектов осаждения и сосредоточиться на изучении только электрофизических явлений. Объемная концентрация эмульсии ва-

рьировалась от 0.01 до 1%. В качестве дисперсной фазы использована вода высокой степени очистки или водные растворы хлорида натрия. Эксперименты проводились в стеклянной кювете $15 \times 15 \times 8$ мм. Неоднородное электрическое поле создавалось системой электродов стержень-пластина, которые формировали сектор цилиндрического конденсатора. Диаметр центрального стержня 1.5 мм, внешнего цилиндрического электрода – 30 мм. Электроды были присоединены к высокочастотному 15 кГц высоковольтному источнику питания с пиковой амплитудой напряжения до 5 кВ. В ходе проведения экспериментов в зависимости от разности потенциалов и характеристик эмульсии изучалась как динамика отдельных капель, так и интегральные характеристики, позволяющие оценить эффективность дегидратации. В последнем случае изучалось изменение со временем концентрации эмульсии в кювете.

Обнаружено, что после создания разности потенциалов капли воды начинают двигаться в область сильного поля к центральному электроду, где собираются в виде сплошного слоя в результате коалесценции. Скорость отдельных капель увеличивается с ростом их размера, с уменьшением расстояния до центрального электрода и с увеличением разности потенциалов. В то же время, скорость слабо меняется при увеличении содержания соли в воде. Обнаружено, что эффективность дегидратации увеличивается с ростом разности потенциалов и ростом среднего размера капель в начальной эмульсии. Обнаружено притягивание и коалесценция соседних движущихся капель, что приводит к увеличению скорости объединенной капли и, следовательно, увеличению эффективности дегидратации. Это же объясняет увеличение эффективности разделения по мере роста концентрации при прочих равных условиях эксперимента за счет увеличения случаев коалесценции капель при росте концентрации. Исследования показали, что при оптимальных параметрах для извлечения 90% капель из эмульсии требуется в разы меньше времени, чем при гравитационном осаждении при разности плотностей $0,1 \text{ г/см}^3$. В целом, результаты экспериментов подтверждают изначальную идею, что использование неоднородного высокочастотного электрического поля является потенциально эффективным инструментом пространственного разделения водо-нефтяных эмульсий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта (грант № 20-41-596009)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА И ВОДЫ В МИКРОМОДЕЛЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Ниценко В.А.¹, Мирзаянов А.А.^{1,2}, Казина Л.З.^{1,2}, Питюк Ю.А.^{1,2}, Ломухин А.Ю.³

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

² Башкирский государственный университет, Уфа

³ АО «Роспан Интернешнл», Новый Уленгой

e-mail: nitsenkova@bnpi.rosneft.ru

Для выбора и обоснования эффективных составов для ограничения водопритока в газовые скважины необходимо понимание поведения многофазной системы на масштабе отдельных пор. В свою очередь капиллярные силы зависят от межфазного натяжения и смачиваемости. В рамках данной работы использовались методы вычислительной микрофлюидики с использованием платформы OpenFOAM для анализа влияния смачиваемости породы на особенности многофазного потока в Т-образной модели пористой среды с трещиной.

Выбрана математическую модель, которая позволяет описать движение флюида в отдельных порах-каналах уравнением Навье-Стокса и движение в элементах пористой матрицы уравнением Дарси. Эта модель представлена Soulaïne и его соавторами [1,2]. Поле скорости, давления и насыщенности описывается уравнениями неразрывности, на насыщенность, движения, но в каждом уравнении используются свои многомасштабные параметры, которые зависят от пористости среды.

Сгенерирована сетка Т-образной пористой среды с применением сеточного генератора GMSH. На рис.1 представлена геометрия Т-образной пористой среды с трещиной ГРП, где пористость равна 1, что соответствует микроканалу, и «карманом» пористой матрицы с пористостью 0.15 и проницаемостью 1 мД. Т-образная модель в начальный момент времени насыщена водой (плотность – 1000 кг/м³, динамическая вязкость – 1 сПз), слева по трещине поступает газ (плотность – 1 кг/м³, динамическая вязкость – 0.0176 сПз) с постоянным расходом, на правой границе задан контроль по давлению, на стенках канала и матрицы – условие прилипания. Ширина длинного канала 1 мкм, а длина 50 мкм, размер сторон пористого «кармана» 10 мкм, поверхностное натяжение на межфазной границе вода-газа равно 0.03 Н/м.

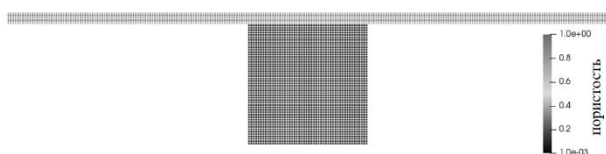


Рис. 1. Геометрия Т-образного канала.

Проведена серия расчетов для гидрофобной (рис. 2) и гидрофильной (рис. 3) поверхности. Из рис. 1 видно, что в случае гидрофобной поверхностью газ преимущественно движется по трещине с незначительным проникновением в пористую среду и вытеснением капель воды, которые движутся по трещине. В случае гидрофильной поверхности

(рис. 2) часть газа фильтруется в пористую среду, при этом происходит защемление трещины гидрофильными каплями воды, после чего движение газа продолжается по пористой среде. В случае гидрофобной поверхности большая часть воды остается в «кармане» пористой матрицы с незначительным проникновением газа в нее, что говорит об эффективности ограничения водопритока.

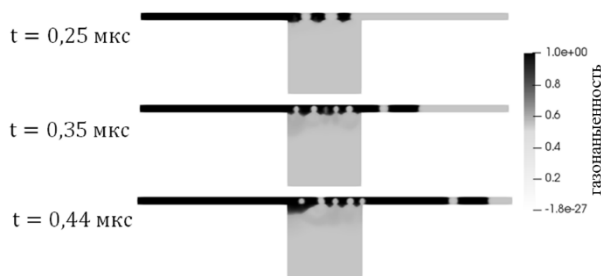


Рис. 2. Фильтрация газа и воды в случае гидрофобной поверхности трещины.

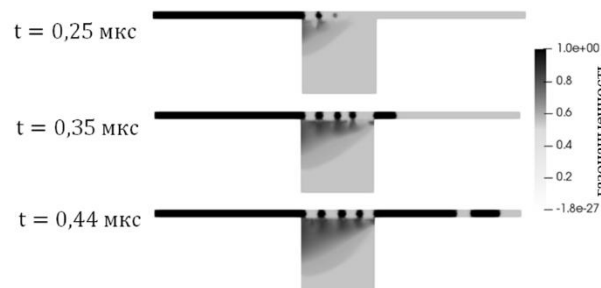


Рис. 3. Фильтрация газа и воды в случае гидрофильной поверхности трещины.

Таким образом, изменение смачиваемости поверхности различными составами приводит к изменению характера фильтрации газа и воды по трещине и пористой среде. Полученные результаты численного моделирования можно использовать для выбора эффективного агента ограничения водопритока в газовые скважины.

Список литературы

1. Cyprien Soulaïne et al. Micro-continuum Framework for Pore-Scale Multiphase Fluid Transport in Shale Formations // Transport in Porous Media, DOI 10.1007/s11242-016-0701-3.
2. Francisco J.Carrillo et. al. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach //Journal of Computational Physics. 2020. X 8. 100073.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТА НА ЕДИНИЧНЫХ СКВАЖИНАХ
С РАЗДЕЛЯЮЩИМИСЯ ХИМИЧЕСКИМИ ТРАССЕРАМИ
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАВ-ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ
НА ПРИМЕРЕ ХОЛМОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Осипов А.В., Бондарь М.Ю., Громан А.А., Чебышева О.В.

ООО Газпромнефть-Технологические партнерства, Москва

e-mail: Osipov.AVa@gazprom-neft.ru, osa23@mail.ru

ПАВ-полимерное заводнение рассматривается как эффективный третичный метод разработки зрелых нефтяных месторождений Западной Сибири, с потенциалом увеличения нефтеотдачи до 60–70% от начальных геологических запасов.

Для выбора эффективной смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ) и полимера для ПАВ-полимерного воздействия проводятся лабораторные испытания (оцениваются термическая стабильность, фазовое поведение, межфазное натяжение и реология составов) и фильтрационные эксперименты для оптимизации объемов закачиваемых оторочек и концентраций реагентов в них. На конечном этапе, для подтверждения результатов лабораторных испытаний в реальных полевых условиях проводятся тесты на единичных скважинах с разделяющимися химическими трассерами (т.н. SWCTT – Single Well Chemical Tracer Test). В случае подтверждения эффективности выбранной ПАВ-полимерной композиции в ходе SWCTT, можно переходить к опытно-промышленным работам.

Оценка эффективности ПАВ-полимерного воздействия с помощью SWCTT разделяется на следующие этапы:

1. в скважину закачивается вода в объеме 3–5 поровых объемов исследуемой зоны (призабойной зоны скважины или ПЗП) для достижения остаточной нефтенасыщенности после заводнения водой (S_{orw});
2. с помощью SWCTT определяется S_{orw} ;
3. проводится закачка в скважину выбранной ПАВ-полимерной смеси для снижения остаточной нефтенасыщенности.
4. с помощью SWCTT определяется остаточная нефтенасыщенность после ПАВ-полимерного воздействия (S_{orc});
5. определяется эффективность ПАВ-полимерного воздействия, выражаемая в снижении остаточной нефтенасыщенности и рассчитанного прироста КИН.

Методика проведения SWCTT заключается в следующем:

1. вначале производится закачка в скважину нефти и водорастворимого трассера. Как правило, таким трассером выступает этилацетат или другой сложный эфир. Трассеры продавливаются вглубь ПЗП оторочкой воды;
2. затем производится выдержка (остановка) скважины для прохождения реакции между этилацетатом и водой с образованием этанола (т.е. реакции гидролиза), который также является водорастворимым трассером;
3. на завершающем этапе скважина запускается в работу с отбором проб жидкости на устье и их анализом на содержание трассеров.

Поскольку этилацетат растворяется в нефти, его скорость течения будет меньше, чем этанола, который не растворим в нефти. Поэтому этанол будет появляться в скважинной продукции первым. Разница во времени выхода этанола и этилацетата позволяет определить нефтенасыщенность зоны исследования [1, 2].

В простых случаях, когда пласт однороден и остаточная нефтенасыщенность везде одинакова, для ее определения можно использовать аналитическую формулу [2], которая дает сходимый результат. Однако, если пласт неоднородный по разрезу, с разной проницаемостью и остаточной нефтенасыщенностью пропластков, то может наблюдаться два и более пиков выхода трассеров. Поэтому в этом случае аналитической формулой воспользоваться невозможно и необходимо проводить гидродинамическое моделирование для определения остаточной нефтенасыщенности в каждом пропластке.

Моделирование SWCTT проводилось в гидродинамическом симуляторе CMG STARS и включало моделирование следующих механизмов: химической реакции преобразования этилацетата в этанол; распределения этилацетата в нефтяной и водной фазах; диффузии трассеров из зоны с высокой концентрацией в зону с низкой концентрацией во время выдержки скважины.

В процессе моделирования производилась адаптация расчетных профилей концентрации выходящих трассеров к фактическим полевым данным. Переменными для адаптации являлись: коэффициенты диффузии этанола и этилацетата, скорость реакции гидролиза, коэффициент распределения этилацетата между нефтью и водой, объемы закаченного трассера и продавочной воды, нефтенасыщенность пропластков.

В работе приведены результаты моделирования SWCTT на двух скважинах Холмогорского нефтяного месторождения. В результате моделирования было получено, что прирост коэффициента извлечения нефти после ПАВ-полимерного воздействия составил 20-22% абс., что подтверждает высокую эффективность выбранных в результате лабораторных экспериментов химических композиций и позволяет перейти к опытно-промышленным испытаниям технологии.

Список литературы

1. Deans, H.A. «Using Chemical Tracers to Measure Fractional Flow and Saturation In-Situ», 1978, SPE 7076.
2. Mikhail Bondar, Andrey Osipov, Andrey Groman. «Evaluating Efficiency Of Surfactant-polymer Flooding With Single Well Chemical Tracer Tests At Kholmogorskoye Field». Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference 2021, SPE-207314-MS.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКАЧКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В НАГНЕТАТЕЛЬНУЮ СКВАЖИНУ

Павлова П.Л., Гузей Д.В., Михиенкова Е.И.

Сибирский федеральный университет

e-mail: ppavlova@sfu-kras.ru

Закачка диоксида углерода в нефтяной пласт является одним из методов увеличения нефтеотдачи пласта, который уже известен и применяется более 40 лет [1]. Как правило, закачку диоксида углерода применяют как третичный способ, когда первичный и вторичный способы нефтеотдачи на месторождении уже применялись. За счет закачки диоксида углерода в продуктивный пласт можно извлечь 10–20% остаточной высоковязкой нефти. Таким образом, закачка диоксида углерода может привести к значительным экономическим выгодам за счет продаж дополнительно добытой нефти и продления срока службы добывающих скважин, а также уменьшит выбросы диоксида углерода.

Последние экспериментальные исследования показывают, что диоксид углерода в сверхкритическом состоянии повышает коэффициент извлечения нефти из керна до 90% [2]. Поэтому вопрос получения и закачки сверхкритического диоксида углерода в скважине становится актуальной задачей.

Следует отметить, что на эффективность закачки сверхкритического диоксида углерода в нефтяной пласт будут влиять глубина скважины, температура и скорость его закачки [3, 4]. Поэтому в данной работе проведено предварительное исследование влияния данных параметров на закачку диоксида углерода и его переход в сверхкритическое состояние в нагнетательной скважине.

Для проведения исследования была построена двумерная модель нагнетательной скважины. В нагнетательную скважину диоксид углерода закачивается через насосно-компрессорные трубы. На входе в скважину задавалось постоянное значение скорости потока диоксида углерода.

Температуры закачки диоксида углерода устанавливались 10, 20, 30 и 50°C для скоростей 0,01, 0,066 и 0,27 м/с соответственно. Температура горных пород изменялась от 5 до 40°C. Итоги предварительных расчетов для скорости закачки 0,01 м/с представлены на рисунке 1.

Из расчетов следует, что при скорости закачки 0,01 м/с диоксид углерода переходит в сверхкритическое состояние на забое скважины. При закачке диоксида углерода в сверхкритическом состоянии данные температуры изменяются незначительно, но сверхкритическое состояние диоксида углерода поддерживается по всей длине нагнетательной скважины.

При закачке диоксида углерода в нагнетательные скважины необходимо учитывать влияние температуры горных пород, скорость закачки и начальную температуру закачки для перехода в сверхкритическое состояние диоксида углерода.

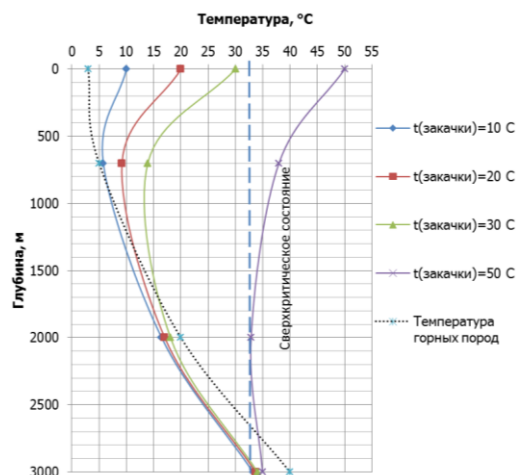


Рис. 1. Графики изменения температуры диоксида углерода при скорости закачки 0,01 м/с.

В итоге можем сказать, что для проектов по закачке диоксида углерода в нефтяной пласт с целью увеличения нефтеотдачи требуются тепловые расчеты. Мы считаем, что закачка диоксида углерода в жидком виде и с последующим переходом в сверхкритическое состояние с минимальной температурой на устье скважины с точки зрения технико-экономических показателей является наиболее выгодной. Также необходимо учитывать, что с увеличением температуры на устье скважины, увеличивается риск растепления многолетнемерзлых пород для месторождений, расположенных на Северных и Арктических территориях.

Список литературы

1. Павлова П.Л., Михиенкова Е.И. Анализ зарубежной техники и технологии закачки диоксида углерода в нефтегазоносный пласт: обзорная статья // Сетевое издание «Нефтегазовое дело», 2021. № 5. С. 58–97.
2. Pavlova P.L., Minakov A. V., Platonov D. V., Zhigarev V. A., Guzey D. V. Supercritical Fluid Application in the Oil and Gas Industry: A Comprehensive Review // Sustainability. 2021. V. 14(2). 692.
3. Vilarrasa V., Silva O., Carrera J., Olivella S. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. V. 14. P. 84–96.
4. Sebastian H., Wenger R., Renner, T. (1985). Correlation of Minimum Miscibility Pressure for Impure CO₂ streams. Journal of Petroleum Technology. 1985. V. 37(11). P. 2076–2082.

Разработка устройства для закачки диоксида углерода поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (грант № МК-2251.2021.4). Численное моделирование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер FSRZ-2020-0012)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИИ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И ОБСТАНОВОК ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РАЗМЕЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Пенигин А.В.¹, Афанасьев А.А.², Беловус П.Н.¹, Дымочкина М.Г.¹, Веденеева Е.А.²,
Гречко С.С.², Павлов В.А.¹

¹ ООО «Газпромнефть НТЦ»

² НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

e-mail: penigin.av@gazpromneft-ntc.ru

Одним из наиболее ответственных этапов в проектах CCUS (carbon capture storage and utilization – улавливание, размещение и использование углекислого газа), определяющим его будущую производительность (как по приемистости, так и по объему), капитальным затратам и объему мониторинговых мероприятий, является этап скрининга и отбора. В ходе этой оценки выбирается набор перспективных участков или один участок для дальнейшего геологического изучения, когда на сейсморазведку, бурение и лабораторные работы тратится значительная сумма денег. Помимо разработки сложной системы критериев выбора объектов для безопасного и надежного длительного хранения углекислого газа в зависимости от объема потенциального хранилища и существующих геологических предпосылок необходимо провести оценку чувствительности основных параметров процесса размещения для качественной оценки альтернатив в процессе выбора. Кроме того, такой анализ позволит оценить требования к точности и количеству исследований при проведении геолого-разведочных работ исходя из их влияния и, следовательно, их ценности.

Для оценки была проведена серия расчетов на гидродинамических моделях для количественной оценки влияния параметров и вариантов использования опций на результаты. Входные параметры включали:

- пористость, проницаемость, анизотропию, однородность, толщины, угол залегания, температуру;
 - параметры фазовых проницаемостей (концевые точки, степенные параметры N_w и N_g для модели Кори), сжимаемость породы, величину капиллярного давления;
 - содержание азота и метана в потоке закачки для моделирования проектов размещения CO_2 и увеличения нефтеотдачи, соответственно;
 - параметры диффузии, дисперсии и гистерезиса.
- Вариации этих параметров привели к разным результатам с точки зрения:
- длины и ширины шлейфа;
 - относительного вклада механизмов улавливания углекислого газа в пласте на различных стадиях жизненного цикла проекта;
 - эффективность хранения (в пересчете на занимаемую площадь и количество закачиваемого CO_2);
 - площадь и мощность шлейфа, где насыщенность CO_2 выше 0,3 для надежного обнаружения сейсморазведкой 4D или ВСП.

Результаты исследования позволяют сделать обоснованное предположение о том, какой из пер-

спективных комплексов размещения парникового газа будет лучшим выбором, принимая во внимание площадную эффективность (которая определяет требуемый размер лицензии, особенно в случае хабирования) и относительный вклад каждого из механизмов улавливания (в пользу растворимости CO_2 и гидродинамического улавливания).

Более того, из анализа стало очевидно, что диффузию (см. рис. 1), поперечную и поперечную дисперсию (см. рис. 2) также необходимо учитывать при предварительном моделировании, поскольку они позволяют прогнозировать поведение шлейфа CO_2 . Таким образом, на этапе скрининга и выбора команда CCUS-проекта может принять более обоснованное решение о том, какой комплекс хранения будет подходящим выбором для этапа разведки, используя эти результаты и разработанный подход к моделированию.

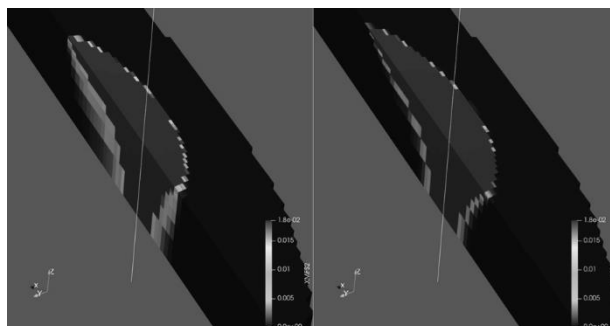


Рис. 1. Разница в растворимости CO_2 в воде при включенной/выключенной опции диффузии.

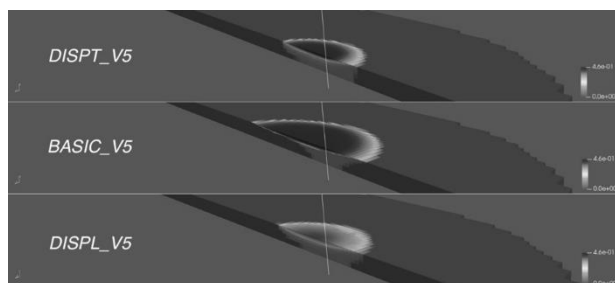


Рис. 2. Разница между базовым расчетом и включенными продольной и поперечной дисперсией.

*Работа выполнена при поддержке
Научно-технологического центра Газпромнефть*

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ И КАПИЛЛЯРНОГО ЧИСЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ В МОДЕЛИ ПОРОВОГО ДУБЛЕТА

Питюк Ю.А.^{1,2}, Саметов С.П.^{1,2}, Фазлетдинов С.У.², Батыршин Э.С.^{1,2}

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

² Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: PityukYuA@bnipi.rosneft.ru

Для разработки эффективных методов мобилизации остаточной нефти необходимо понимание физических механизмов, определяющих поведение многофазных систем на масштабе отдельных поровых каналов пористой среды. Известно, что основные механизмы, определяющие динамику межфазной поверхности, связаны с вязкими и капиллярными силами. Целью настоящей работы было численное и экспериментальное исследование влияния баланса этих механизмов на свойства многофазного потока в модели порового дублета, являющейся одной из наиболее известных элементарных моделей порового пространства [1].

В работе предложен численно-экспериментальный подход для исследования двухфазной фильтрации двух несмешивающихся жидкостей в моделях пористой среды. Физическая модель порового дублета была реализована в микрофлюидном чипе, изготовленном методом мягкой литографии. Экспериментальные исследования проводились с применением специализированного оборудования для микрофлюидных исследований: шприцевых насосов, контроллеров и датчиков давления, высокоточных расходомеров [2]. Для визуализации течений применялись методы оптической микроскопии и высокоскоростной съемки. Для численного моделирования использовалась платформа OpenFOAM и многомасштабный решатель, представленный в работе [3], который позволяет моделировать двухфазную фильтрацию в микроканалах пористой среды на микроуровне на основе уравнения Навье-Стокса и в элементах пористой среды на макроуровне на основе модели Дарси. Особенностями предложенного подхода является проведение численного моделирования двухфазной фильтрации в моделях пористой среды, соответствующих лабораторным исследованиям, масштабирование полученных результатов на характерные размеры ядра.

В рамках работы определена геометрия модели порового дублета, построена дискретизация расчетной области с применением сеточного генератора GMSH и созданы микрофлюидные чипы. Особенностью выбранной геометрии являлось сохранение суммарной площади поперечного сечения каналов. Проведены многопараметрические расчеты и серия лабораторных экспериментов вытеснения вазелинового масла (модель нефти) различными агентами в модели порового дублета при различной смачиваемости поверхности пор и капиллярного числа (Ca), характеризующего соотношение вязких и капиллярных сил. Для вариации капиллярного числа изменялись как скорость течения жидкостей, так и межфазное натяжение с помощью поверхностно-активных веществ. Получено хорошее согласование результа-

тов численного моделирования с экспериментальными данными для модели порового дублета в случае гидрофобной поверхности для разных значений капиллярного числа (см. рис. 1). В экспериментах с соотношением размеров каналов 1:2 при контролируемом постоянном перепаде давления, создающим поток, существует предельное значение перепада давления, ниже которого вытеснения из порового дублета не происходит (см. рис. 1а), для $Ca=1.8 \times 10^{-5}$ происходит захват масла в углах дублета и в узком канале (см. рис. 1б), для $Ca=2.7 \times 10^{-5}$ масло протекает через широкий и узкий каналы, но остается в углах и на выходе из дублета (см. рис. 1в).

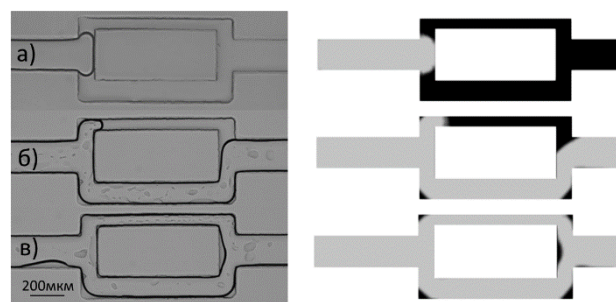


Рис. 1. Характерные картины вытеснения масла водой в модели порового дублета: эксперимент (слева), численное моделирование (справа).

В рамках работы построены зависимости объема захваченной нефти в модели порового дублета от смачиваемости пор и капиллярного числа. Изучались механизмы модификации смачиваемости поверхности каналов с использованием наножидкостей, а также изменения межфазного натяжения за счет применения ПАВ, в том числе таких составов, которые могут образовывать микроэмульсии и понижать межфазное натяжение на границе вода-масло на несколько порядков. Таким образом, предложенный в работе численно-экспериментальный микрофлюидный подход позволяет оценить вклад этих эффектов и может быть использован для выбора эффективного агента вытеснения для увеличения нефтеотдачи пласта.

Список литературы

1. Chatzis, I., Dullien, F.A.L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: theory versus experiment // *J. Colloid Interface Sci.* 1983. V. 91, No. 1, P. 199–222.
2. Shin J. H., Choi S. Open-source and do-it-yourself microfluidics // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2021. V. 347. P. 130624.
3. Carrillo F.J., Bourg I.C., Soulaine C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach // *Journal of Computational Physics.* 2020. V. X. 8:100073.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 21-79-10212)*

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СТВОЛА ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Самоловов Д.А.

ООО «Газпромнефть научно-технический центр»

e-mail: Samolovov.DA@gazpromneft-ntc.ru

Цель и содержание работы

Цель работы – разработка методики расчёта оптимальной длины горизонтального ствола газовых скважин с учётом гидравлических потерь в горизонтальном стволе и насосно-компрессорных трубах, ограничений по величине устьевой скорости. Задачи работы – определение основных факторов, определяющих степень влияния гидравлических потерь давления в горизонтальном стволе газовой скважины на продуктивность, разработка методики оценки продуктивности горизонтальных газовых скважин с учётом влияния гидравлических потерь давления в горизонтальном стволе, разработка аналитической интегрированной модели работы горизонтальной газовой скважины с учётом ограничений устьевой скорости.

Используемые методы, технологии, описание процесса

В работе используется аналитическая модель притока газа к горизонтальной газовой скважине, распределение давления в горизонтальном стволе и НКТ описывается уравнением Дарси-Вейсбаха, коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывается по обобщённой степенной корреляции. Учитываются ограничения на устьевую скорость газа. Далее система уравнений, описывающая интегрированную модель работы горизонтальной газовой скважины безразмеривается. Основные безразмерные факторы, влияющие на решение уравнения – безразмерный коэффициент продуктивности горизонтальной газовой скважины, безразмерная длина горизонтального ствола, безразмерное сопротивление горизонтального ствола и НКТ, безразмерное ограничение на устьевую скорость газа. Задача о расчёте продуктивности скважины решается аналитически. Решение системы уравнений представлено в виде безразмерных зависимостей продуктивности горизонтальной газовой скважины от входных параметров.

Результаты, выводы

В работе определены основные безразмерные факторы, влияющие на продуктивность горизон-

тальной газовой скважины с учётом гидравлического сопротивления хвостовика, НКТ и ограничения скорости газа на устье – безразмерный коэффициент продуктивности горизонтальной газовой скважины, безразмерная длина горизонтального ствола, безразмерное сопротивление горизонтального ствола и НКТ, безразмерное ограничение на устьевую скорость газа.

Получено уравнение в безразмерных переменных, описывающее распределение давления вдоль горизонтального ствола газовой скважины. Решение уравнения, описывающее расчёт продуктивности горизонтальной газовой скважины с учётом гидравлики и устьевой скорости, представлено в аналитическом виде. В ходе анализа результатов установлено, что влияние гидравлического сопротивления хвостовика горизонтальной газовой скважины может быть учтено корректировкой нелинейного коэффициента притока b в уравнении притока для газовой скважины, а влияние НКТ - переходом к устьевому давлению вместо забойного с поправкой нелинейного коэффициента b и некоторой корректировкой величины устьевого давления. Также установлен характер взаимодействия ограничений на устьевую скорость газа и влияния гидравлических потерь при расчёте продуктивности скважин - определены области в пространстве входных параметров, в пределах которых продуктивность скважины обуславливается только ограничением на устьевую скорость или только гидравлическими потерями.

Новизна работы и достижения

Новизна работы заключается в разработке аналитической интегрированной модели работы горизонтальной газовой скважины с учётом влияния гидравлических потерь давления в горизонтальном стволе и насосно-компрессорных трубах с учётом ограничения по устьевой скорости газа. Кроме того, наличие аналитического решения задачи позволяет проводить сравнительный анализ продуктивности горизонтальных газовых скважин различных объектов разработки в разрезе влияния гидравлических потерь и ограничений устьевой скорости.

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МИНИКЕРНА

Скопинцев А.М.^{1,2}, Гурин А.М.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: a.skopintsev@g.nsu.ru

Моделирование вытеснения жидкостей в пористых средах является объектом интенсивных исследований в ряде инженерных дисциплин, таких как управление водными ресурсами, химическая промышленность и, прежде всего, добыча углеводородов. Отдельной задачей является учет гетерогенной структуры течения с наличием границы раздела между фазами, что влечет за собой необходимость учета различных капиллярных поверхностных эффектов. На сегодняшний день существует множество подходов к моделированию двухфазных сред с границей раздела, но все они имеют те или иные недостатки, поэтому разработка новых методов и совершенствование существующих моделей является актуальной задачей.

В данной работе процесс вытеснения описывается уравнениями типа Навье-Стокса-Кана-Хилларда для течений двухфазной несмешивающейся несжимаемой жидкости в пористой среде при учете эффектов поверхностного натяжения. Для моделирования гетерогенной структуры течения жидкостей в микроканалах используется метод фазового поля. Метод фазового поля является математическим подходом представления гетерогенной системы с межфазной границей, в которой граница раздела при этом имеет малую, но конечную толщину и определяется с помощью поля концентрации (плотности или некоторого параметра порядка). В основополагающей работе Кана и Хилларда [1] было получено выражение для свободной энергии в предположении, что свободная энергия двойной системы зависит не только от концентрации, но и от пространственных производных от концентрации. В нашей работе в качестве концентрации рассматривается параметр порядка, который достигает физически значимых значений -1 и 1 в частях области, занимаемой маловязкой (вода) и сильновязкой (нефть) жидкостью соответственно.

Для оптимального дизайна операции повышения нефтеотдачи пластов часто предполагается закачка жидкостей в резервуар. Для расчета процесса двух- или многофазной фильтрации необходимо знать относительную фазовую проницаемость (ОФП) всех жидкостей. При этом ОФП являются сложным объектом для изучения сами по себе. Для низкопроницаемых пород определение ОФП требует нескольких месяцев экспериментальных работ, поэтому в мире набирает популярность тематика «цифрового ядра», связанного с численным моделированием ОФП по томографическому образу ядра – образца горной породы. Даже однофазную проницаемость у горной породы довольно сложно предсказать в численном эксперименте по ее типу, пористости и другим характеристикам [2]. Для многофазной фильтрации сопо-

ставляются результаты экспериментальных и численных исследований, где основной целью ставится предсказание фазовой проницаемости для различных жидкостей по структуре и минеральному составу пористого скелета выбранной породы [3].

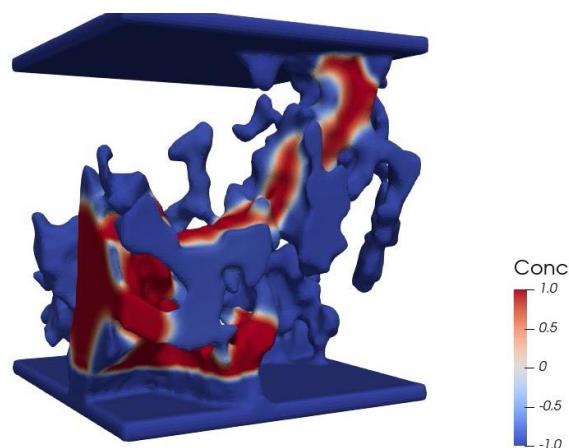


Рис. 1. Установившееся распределение в расчетной области миникерна нефти (красный цвет) и воды (синий цвет) при дренаже (закачке нефти через буферную зону).

Построенная в настоящей работе модель позволяет учесть для оценки ОФП такие факторы как влияние поверхностных сил натяжения, ширины межфазной границы, различные граничные условия на буферных зонах (т.е. входная и выходная области миникерна). Результаты численных экспериментов демонстрируют зависимость кривых остаточной водонасыщенности и фазовой проницаемости от величины поверхностной вязкости на границе раздела и ширины межфазной границы, анализируется возможное различие в распределении полей индикатора фазы при остаточной воде и нефти.

Список литературы

1. Cahn J.W., Hilliard J.E. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy // J. Chem. Phys. – 1958. – Vol. 28, no. 2. – Pp. 258-267.
2. Martins-Costa M.L., Angulo J.A.P., da Costa Mattos H. Modeling the connection between porosity and permeability: a mixture theory approach // Journal of Porous Media. 2017. V. 20. N 5
3. Kadet V.V., Galechyan A.M. Accounting for Fluid Rheology in the Hydrophobization Model of Relative Permeability Hysteresis // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017. V. 58. N 6. P. 1004–1012.

*Работа поддержана по проекту
ГЗ_FWGG-2019-0002 (руководитель Головин С.В.).
Автор благодарит Научно-технический центр
Газпромнефти (г. Санкт-Петербург) и НОЦ
«Газпромнефть-НГУ» за поддержку исследований*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В МИКРОМОДЕЛЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

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

Башкирский государственный университет, Уфа.
e-mail: olgasolnyshkina@gmail.com

Для прогнозирования поведения пластовых жидкостей в пористой среде и их исследования на макроуровне необходимо детальное изучение гидродинамических потоков в пористой среде в микромасштабе на уровне отдельных поровых пространств, принимая во внимание структурные особенности сред. Одной из общепринятых идеологий представления пористой среды является капиллярная модель, когда объем пористой среды рассматривается как сеть микроканалов сложных форм. Поскольку поровые каналы обладают естественными неровностями различного масштаба, то неизбежно возникающие особенности на их поверхностях и отклонение формы от идеализированной цилиндрической или плоскопараллельной, рассматриваемой в большинстве работ, должны быть учтены и тщательно исследованы как экспериментально, так и численно.

В рамках данной работы рассматривается периодическое течение вязкой несжимаемой жидкости и капель эмульсии в плоском канале прямоугольного сечения с неровными стенками при постоянном перепаде давления. Поскольку изучаемые течения в микроканалах порового пространства достаточно медленные, то силы вязкости, возникающие при течении жидкости, гораздо значительнее сил инерции, связанных с ускорением или торможением частиц жидкости, что дает возможность полностью пренебречь инерционными членами в расчетах. Все процессы рассматриваются в изотермических условиях, без учета сил Ван-дер-Ваальса. Таким образом, течение жидкости может описываться уравнением Стокса с соответствующими граничными условиями на межфазной границе, на поверхности канала и условии периодичности течения.

Для численного решения задач в данной работе применялся метод граничных элементов для трехмерных задач, ускорение которого произведено как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPUs и графические процессоры GPUs). Предложенный метод позволяет напрямую рассчитывать динамику деформируемых дисперсных объектов в каналах сложных форм с высокой дискретизацией поверхности, геометрия которых соответствует микроканалам пористого пласта. Прямые расчеты методом граничных элементов трехмерной динамики капель в не осесимметричных каналах с неровностями не представлены в литературе.

Была разработана качественная триангуляция нескольких вариантов конфигураций микроканалов с неровностями в форме квадратов и равносторонних треугольников (со сдвигом и без сдвига друг относительно друга) (см. рис.1). Проведены расчеты течения вязкой жидкости в указанных микроканалах. Получены картины течения для всех вариантов конфигураций микроканалов в нескольких плоскостях сечения. Показано, что на структуру потока влияет не

только форма неровностей, но их расположение друг относительно друга. Проведено исследование влияния расстояния между ловушками на картины течений. Также проводились расчеты динамики капель в каналах. Было показано, что изменение значений относительной скорости капель носит неравномерный характер для всех случаев расположения капель и сильно зависит от формы ловушек.

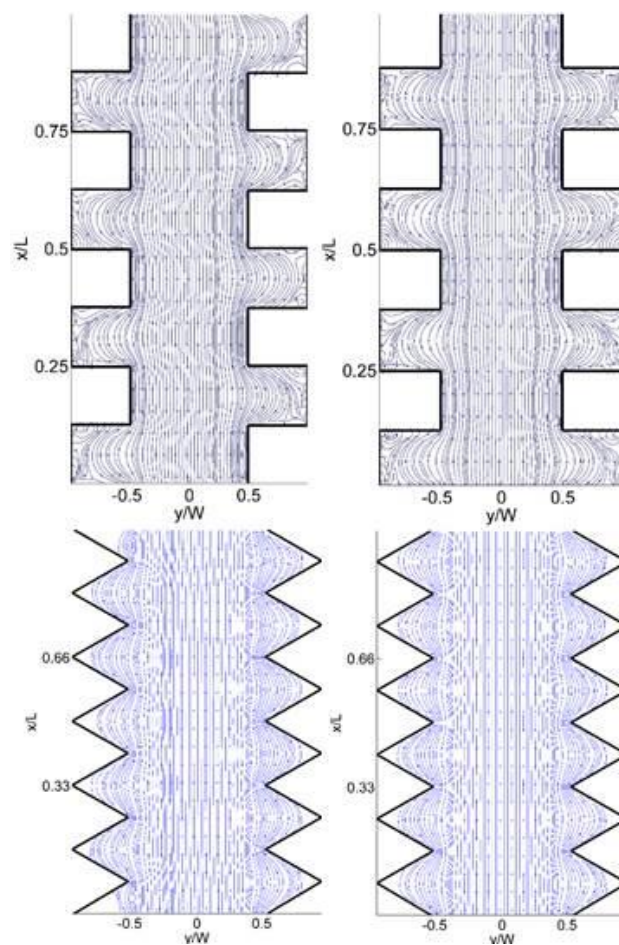


Рис. 1. Линии тока при течении жидкости в микроканалах с неровностями.

Таким образом, на базе апробированных высокоэффективных численных методов исследования выполнены практически значимые фундаментальные исследования влияния неровностей различного размера и формы на стенках микроканалов на гидродинамические потоки при течении вязкой жидкости и динамику капель эмульсии в различных микромоделах пористой среды. Продемонстрирована эффективность разработанного численного подхода для изучения однофазных и многофазных течений в микромоделах пористых сред.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-79-10212)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ В НАСЫПНЫХ МОДЕЛЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Фазлетдинов С.У.¹, Питюк Ю.А.^{1,2}, Муллаянов А.И.^{1,2}

¹ Башкирский государственный университет, Уфа

² ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

e-mail: spartak.fazlet@gmail.com

Понимание фильтрационных процессов в насыпных моделях с контролируемой геометрией порового пространства важны с точки зрения выбора эффективного агента для увеличения нефтеотдачи пласта. Насыпные пористые среды могут быть изготовлены на основе различных частиц, например, частиц песка [1], стеклошариков [2] и т.д. Такие модели широко применяются в исследованиях и являются идеализированными 2D пористыми средами, где частицы моделируют зерна горной породы, а пространство между частицами – поры. Целью настоящей работы было численное исследование эффективности вытеснения нефти в насыпных моделях пористой среды в зависимости от кривизны относительных фазовых проницаемостей (ОФП).

Для численного моделирования использовался пакет OpenFOAM с многомасштабным решателем hybridPorousInterFoam [3]. Для описания двухфазной фильтрации в насыпных моделях рассматривалась модель Дарси с ОФП, удовлетворяющими модели Brooks&Corey [Brooks and Corey, 1964]:

$$p_c(S_w) = p_{c,0} S_w^{-1/m},$$

$$k_{r,n}(S_w) = k_{r,n,max} (1 - S_w)^{(3m+2)/m},$$

$$k_{r,w}(S_w) = k_{r,w,max} S_w^{(3m+2)/m},$$

где $p_{c,0}$ – начальное капиллярное давление, $k_{r,n}, k_{r,w}$ – ОФП для несмачиваемой (n) и смачиваемой (w) фаз, соответственно, индексом max обозначены максимальные значения, S_w – насыщенность смачиваемой фазы, m – число, характеризующее кривизну ОФП.

Для физической насыпной модели размером $162 \times 25 \times 1$ мм из спеченных стеклошариков (рис. 1в) построена дискретизация расчетной области. Преимуществом этой модели является неизменяющаяся структура порового пространства. Аналогично лабораторным исследованиям фильтрация происходит при постоянном расходе 0.2–0.5 мл/мин справа налево, на границе задается условие прилипания, на выходе постоянное давление. На основе экспериментальных данных определена неоднородность пористой среды. Проницаемость высокопроводящих участков модели 62Д, низкопроводящих 0.1мД, пористость модели 0.25. Проведена серия расчетов для вытеснения вазелинового масла с динамической вязкостью 60 сПз и плотностью 800 кг/м³ водой с динамической вязкостью 1 сПз и плотностью 1000 кг/м³, соответствующих экспериментальным данным. Рассматривалось несколько режимов фильтрации и ОФП, с учетом и без учета капиллярного давления. На рис. 1а представлено распределение насыщенности, на рис. 2б поле давления и скорости в модели

пористой среды при расходе 0.2 мл/мин и $m=3$ без учета капиллярного давления после 10 мин закачки воды в модель. Численные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными. Из рисунков видно образование пальцев из-за большой разницы в вязкостях закачиваемой и вытесняемой жидкости, также наблюдается образование недренлируемых участков с низкой проницаемостью. Показано, что учет в модели капиллярного давления увеличивает скорость фильтрации. Это связано с тем, что капиллярные силы направлены по потоку, поскольку в данном эксперименте рассматривается вытеснение несмачиваемой фазой смачиваемой. Изменение кривизны ОФП существенно влияет на характер вытеснения нефти. С увеличением m вытеснение происходит медленнее, но эффективнее. Показано, что с учетом в модели капиллярного давления остаточная нефть на 10 мин закачки меньше, чем без учета.

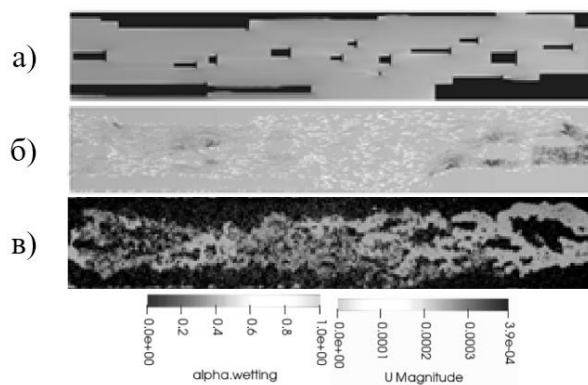


Рис. 1. Фильтрация воды (светлый) и масла (темный) в насыпной модели пористой среды.

Результаты проведенной работы показывают, что предложенный подход для изучения фильтрации в насыпных моделях с контролируемой геометрией можно использовать для выбора эффективного агента вытеснения с целью увеличения нефтеотдачи пласта.

Список литературы

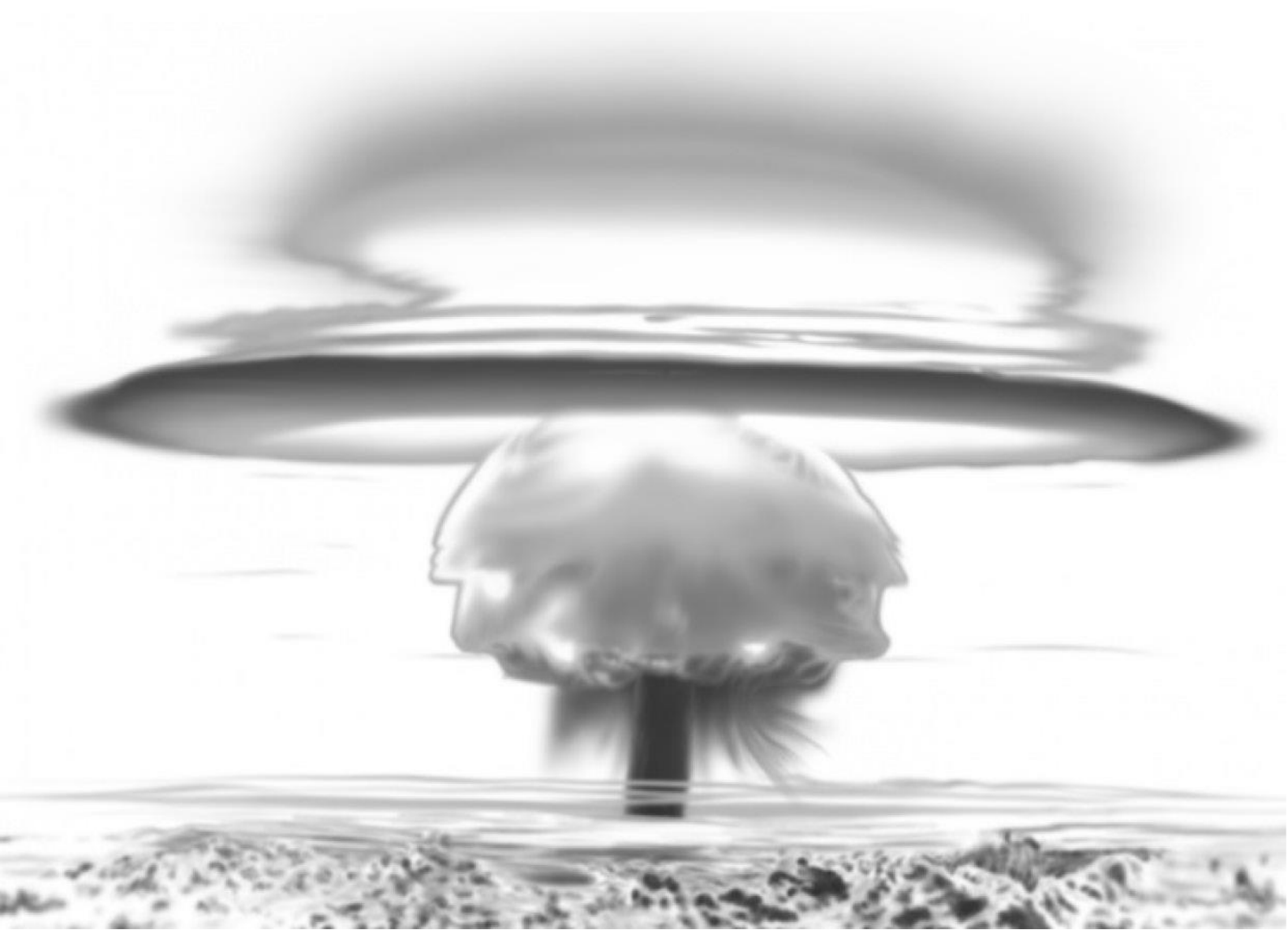
- Guerrero F., Bryan J., & Kantzas, A. Visualization of Chemical Heavy Oil EOR Displacement Mechanisms in a 2D System. // Energies. 2021. V. 14, No. 4, P. 950.
- Zhou X., Dong M., Maini B. The dominant mechanism of enhanced heavy oil recovery by chemical flooding in a two-dimensional physical model // Fuel. 2013. V. 108. P. 261-268.
- Carrillo F.J., Bourg I.C., Soulaire C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach // Journal of Computational Physics. 2020. V. X. 8:100073.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-10212)



СЕКЦИЯ 5

Гидрогазодинамика реагирующих сред,
детонационные процессы



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ УГЛЕЙ С ДОБАВКАМИ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ И ОТХОДОВ

Асильбеков А.К., Слюсарский К.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

e-mail: aka@tpu.ru

Развитие технологий глубокой переработки биомассы и отходов является одним из наиболее перспективных направлений развития современной энергетики. Процесс пиролиза является одним из наиболее распространенных методов, лежащем в основе большинства подобных технологий [1]. Несмотря на относительно высокий уровень проработки непосредственно процесса пиролиза, малое число работ в области комплексной организации и утилизации побочных материальных и энергетических потоков в литературе приводит к существенным затруднениям при проектировании подобных установок. Это, в свою очередь, приводит к достаточно ограниченным успехам в области практической реализации подобных проектов. Получаемые в результате пиролиза жидкие продукты пиролиза характеризуются высоким содержанием влаги и широкого спектра углеводов. Крайне широкий диапазон изменения свойств данных углеводов (в частности, температур кипения соответствующих веществ) делает их извлечение крайне проблематичным. В частности, высокие концентрации водорастворимых фенолов и кетонов в получаемой жидкости приводит к тому, что данные вещества будут присутствовать во всех жидкофазных продуктах пиролиза биомассы и отходов различного происхождения. Сжигание подобных компонент в составе смесей с традиционными твердыми топливами, является одной из наиболее доступных альтернатив. Ввиду простоты и малых объемом требуемых модификаций существующих систем для адаптации к использованию смесевых топлив [2]. В случае использования низкореакционных топлив (отходов углеобогащения, антрацитов и т.п.) будет достигаться максимальный промотирующий эффект ввиду синергии между характеристиками зажигания жидких компонент и высокими значениями адиабатных температур горения подобных веществ. Однако данные эффекты делает прогностическую оценку параметров зажигания и горения подобных смесей на основе принципа аддитивности невозможным, а отсутствие исследований в данной области не позволяет внедрить подобные системы на практике.

Целью работы является оценка влияния скорости зажигания антрацита с пиролизными маслами древесных отходов, нефтешлама и резинотехнических изделий, в условиях, характерных для энергетического оборудования. Были охарактеризованы промышленные образцы пиролизных жидкостей, полученные с использованием исходных веществ трех видов – древесных отходов, нефтешламов и резинотехнических изделий. Их характеристики представлены ниже (таблица 1). Технические характеристики пиролизных масел определялись по методикам, разработанным для мазута.

Свойства пиролизных жидкостей резинотехнических изделий и нефтешламов были близки и соответствовали традиционному жидкому топливу. Пиролизная жидкость опилок характеризовалась высокой плотностью и большим содержанием кислорода, а также значительно меньшей теплотой сгорания. Скорее всего, это вызвано высокой долей кислородсодержащих органических компонентов.

Таблица 1. Свойства жидких продуктов пиролиза.

Образец	Состав, масс.% daf				
	C	H	N	S	O
Древесные отходы	60,3	8,0	2,2	-	29,5
Нефтешлам	80,5	11,4	-	0,7	7,4
Резинотехнические изделия	86,3	11,0	0,6	0,8	1,4

Были получены зависимости времени задержки зажигания полученных смесей в диапазоне температур 500-800°C при варьировании концентрации добавки жидкого продукта пиролиза в образце в диапазоне 0–20 масс.%. Получены зависимости времен задержки зажигания от теплотворной способности смеси.

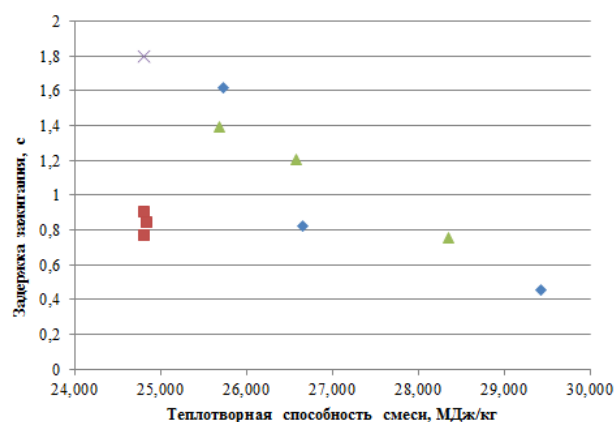


Рис. 1. График зависимости задержки зажигания по теплотворной способности антрацита с пиролизными маслами.

Список литературы

1. Kirill B. Larionov, Konstantin V. Slyusarskiy, Svyatoslav A. Tsibul'skiy, Albert Zh. Kaltaev, Nikolay I. Berezikov, Alexander S. Gorshkov, Sergey V. Lavrinenko, and Vladimir E. Gubin // Activation of anthracite combustion using pyrolysis oil from thermal conversion of waste car tires // ACS Omega 2021, 6, 19731–19739.
2. Ларионов К.Б., Толокольников А.А., Киргина М.В., Гвоздяков Д.В., Богданов И.А., Зенков А.В., Янковский С.А., Губин В.Е. // Жидкие углеводороды паровой газификации изношенных автомобильных шин: сравнение технических характеристик и процесса горения с традиционным нефтяным мазутом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-2563.2022.1.2)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В ФРОНТОВОМ УСТРОЙСТВЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ТОПЛИВА

Васильев А.Ю.¹, Тарасенко А.Н.^{1,2}, Силуянова М.В.²

¹ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

e-mail: antarasenko@ciam.ru

Разработка горелок (фронтальных устройств), способных работать на нескольких видах топлива или даже их смесях, достаточно актуальное направление для газотурбинных установок, причем на данный момент уже существуют работы, демонстрирующие работоспособность таких систем [1, 2]. Интерес к данной тематике связан прежде всего с необходимостью обеспечения работы таких силовых установок в экстренных ситуациях, когда привычное топливо отсутствует, но имеются альтернативы. Кроме того, отдельно исследуется вопрос о возможности повышения эффективности и безопасности таких ГТУ за счёт использования комбинированного топлива, например, метан-водородной смеси [3, 4].

В данной работе рассматривался процесс горения в модельном фронтальном устройстве камеры сгорания ГТУ при использовании нескольких типов топлива, а именно: авиационный керосин (в суррогатной форме $C_{12}H_{23}$), метан, водород, пропан-бутановая смесь, керосин-метановая смесь и метан-водородная смесь. В рамках исследования принималось допущение о том, что рассматриваемая горелка способна работать с каждым из перечисленных видов топлива.

Выбранная для исследования модель представляет собой простое одноярусное фронтальное устройство с одним рядом осевых лопаточных заверителей простого профиля, 4 местами подачи топлива и сопловой частью с простым коническим диффузором. Внешний вид горелки представлен на рис. 1.

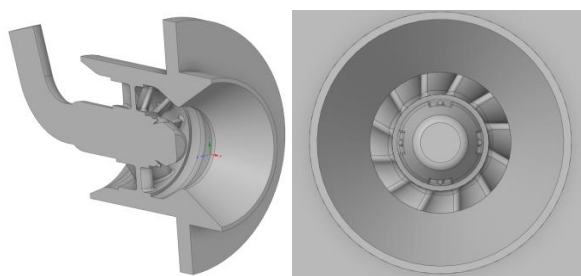


Рис. 1. Внешний вид рассматриваемого модельного фронтального устройства КС ГТУ.

Моделирование проводилось в стационарной трехмерной постановке. В качестве модели турбулентности использовалась модель $k-\omega$ SST с подключением субмоделей для низкорейнольдсовых течений и коррекции течения вблизи острых углов. Поскольку для ГТУ, также, как и для авиационных двигателей, актуален вопрос об эмиссии вредных веществ, в качестве модели горения использовалась модель частично перемешанной смеси, использующая одновременно модель тонкого фронта пламени (флеймле-

ты) для диффузионного пламени и модель Зимонта для кинетического пламени. Использование такого подхода позволяет рассматривать довольно большое количество компонент, в частности оксидов азота (NO_x) и оксидов углерода (CO , CO_2), но без необходимости привлечения значительных вычислительных ресурсов по сравнению с моделью конечно-скоростной химии [5].

Для получения более полной картины процессов была проведена серия расчётов с варьированием коэффициента избытка окислителя в допустимых для рассматриваемого топлива диапазонах. Для смесей диапазон выбирался по наименьшим допустимым значениям, чтобы горение на экстремальных режимах не приводило к богатому или бедному срыву пламени.

Проведенные численные исследования показывают, что использование альтернативных топлив, за исключением водорода, снижает максимальные температуры пламени по сравнению с привычным авиационным керосином при одинаковых расходах, однако при стехиометрическом соотношении топлива и воздуха ($\alpha = 1$) наблюдается обратная ситуация. Также, при обеспечении равных значений коэффициента избытка воздуха, газообразное топливо подается со значительно большей скоростью и при высоких расходах будет стремиться к $M \sim 1$. Таким образом, для обеспечения работоспособности горелки для использования нескольких топливах требуется достаточно точно попасть в интервал значений по коэффициентам избытка воздуха.

Список литературы

1. Vasilyev A.Yu., Chelebyan O.G., Maiorova A.I., Tarasenko A.N., Tarasov D.S., Zakharov V.M. The development problems of two-fuel burner for the gas turbine combustion chamber // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2021. V. 3A. 8 p.
2. Бубенцов А.В., Василук Д.К., Голубев П.А., Кириченко Р.Е., Ташкинов В.А., Шошин Б.В. Разработка малоэмиссионной двухтопливной камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. Т. 45. № 3. С. 25–33.
3. Аксютин О.Е., Ишков А.Г., Романов К.В., Тетеревлев Р.В., Хлопцов В.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. Потенциал метано-водородного топлива в условиях перехода к низкоуглеродной экономике // Газовая промышленность. Спецвыпуск. 2017. Т. 750. № 1. С. 82–85.
4. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях для энергетических установок // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22. № 1. С. 82–93.
5. Yang S., Wang X., Sun W., Yang V. Comparison of Finite Rate Chemistry and Flamelet/Progress-Variable Models: Sandia Flames and the Effect of Differential Diffusion // Combustion Science and Technology. 2020. V. 192. P. 1137–1159.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЧЕШУЙЧАТОГО ТИПА ДЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н.

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

email: antarasenko@ciam.ru

При разработке жаровых труб камер сгорания авиационных ГТД вопрос об организации системы охлаждения для них всегда имеет огромное значение. Высокая интенсивность тепловыделения в рабочем объеме, вызванная процессами горения, приводит к существенному повышению температуры стенок, что может вызвать деформации и даже привести к потере работоспособности. За все время существования авиационных ГТД, удалось добиться существенного повышения эффективности их работы. Также активно развивается направление жаростойких материалов. Тем не менее на данный момент существует еще один фактор, влияющий на конструкцию систем охлаждения жаровых труб. Связан он с внедрением технологий организации бедного горения в КС ГТД, что необходимо для того, чтобы выполнить нормы Международной организации гражданской авиации (ИКАО) по нормам эмиссии вредных веществ. Малоэмиссионные камеры сгорания для таких двигателей тесно связано с количеством доступного воздуха, часть которого, называемая вторичным воздухом, используется для работы охлаждения и для разбавления продуктов сгорания, при этом до 80% от всего воздуха должно быть направлено в головную часть для реализации горения. Следовательно, основным критерием эффективности является максимальный теплосъем при минимальном расходе оставшегося воздуха.

В данной работе был рассмотрен специальный тип конвективно-пленочных систем охлаждения, называемый чешуйчатым, и характеристики его работы в сравнении с привычными пленочными и конвективно-плёночными системами охлаждения, которые активно используются на протяжении всей истории авиационных ГТД. На рисунке 1 представлен общий вид рассматриваемых систем охлаждения.

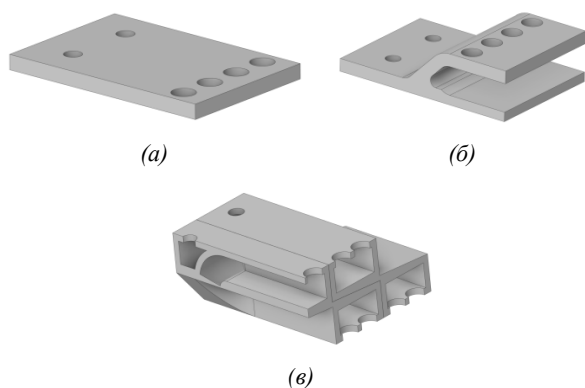


Рис. 1. Рассматриваемые типы систем охлаждения: модель с прямой перфорацией (а), модель пленочно-конвективного охлаждения с «козырьком» (б), «чешуйчатого» типа (в).

В качестве основного метода исследования на первом этапе работы было предложено проведение численного эксперимента на основе CFD-подхода. Несмотря на то, что только эксперимент может однозначно подтвердить объективную реальность, при грамотном владении методами трехмерного численного анализа становится возможным получать достаточно достоверные данные. В дальнейшем планируется проведение валидации данных расчётов, но в рамках формирования качественной оценки, авторы не считают это обязательным условием. В таблице 1 приведены основные сведения об использованной стратегии и граничных условиях проведенных расчётных исследований.

Таблица 1. Основные данные по стратегии проведения расчётных исследований.

Расчетные сетки	1. Базовая модель с прямой перфорацией: полиэдрическая неструктурированная сетка объемом 1.2 млн ячеек 2. Модель с козырьками: полиэдрическая неструктурированная сетка объемом 1.6 млн ячеек 3. Модель «чешуйчатого» типа: полиэдрическая неструктурированная сетка объемом 2.2 млн ячеек
Решатель	По давлению (алгоритм установления сопряженный), псевдостационарная постановка
Модель турбулентности	k- ω SST (модель Ментера)
Задание теплофизических свойств	1. Плотность – идеальный газ 2. Теплоёмкость – кусочно-заданный полином 3. Теплопроводность – по кинетической теории 4. Вязкость – по модели Сазерленда
ГУ входа	По расходу для обоих входов
ГУ выхода	По давлению для основного выхода, по расходу для выхода, имитирующего отбор
Схема дискретизации	Сопряженная первого порядка до появления сходимости, затем сопряженная второго порядка

Для получения более полной картины процессов была проведена серия расчётов с варьированием скорости набегающего потока. Поскольку в данной работе не рассматривались процессы горения напрямую, в расчётной модели поток продуктов сгорания имитировал горячий поток воздуха.

Проведенные численные исследования показывают, что рассматриваемая система охлаждения «чешуйчатого» типа применима в камерах сгорания авиационных ГТД и позволяет обеспечить более равномерное охлаждение стенок жаровой трубы.

ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА СИЛЬНО ЗАКРУЧЕННОЕ ПЛАМЯ

Гореликов Е.Ю.^{1,2}, Литвинов И.В.^{1,2}, Шторк С.И.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: gorelikoey@gmail.com

Закрученные потоки активно используются для аэродинамической стабилизации пламени предварительно перемешанной обедненной смеси. При высокой интенсивности закрутки потока образуется центральная рециркуляционная зона, которая сопровождается формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) [1].

Исследования показывают, что ПВЯ может сложным образом взаимодействовать с пламенем [2, 3] в том числе почти полностью подавляться [4]. В этой связи, возникает задача по управлению потоком и изменению амплитудно-частотных характеристик течения в условиях горения и присутствия крупномасштабной вихревой структуры в виде ПВЯ. Как отмечается в работе [5] реакция формы пламени на низкоамплитудное акустическое возмущение линейно, а высокоамплитудное вызывает сильный нелинейный отклик. Целью данного исследования является изучение влияния периодического акустического возмущения на форму предварительно перемешанное закрученное пламя с присутствием ПВЯ. Исследования проводились на горелочном устройстве радиального типа (рис. 1).

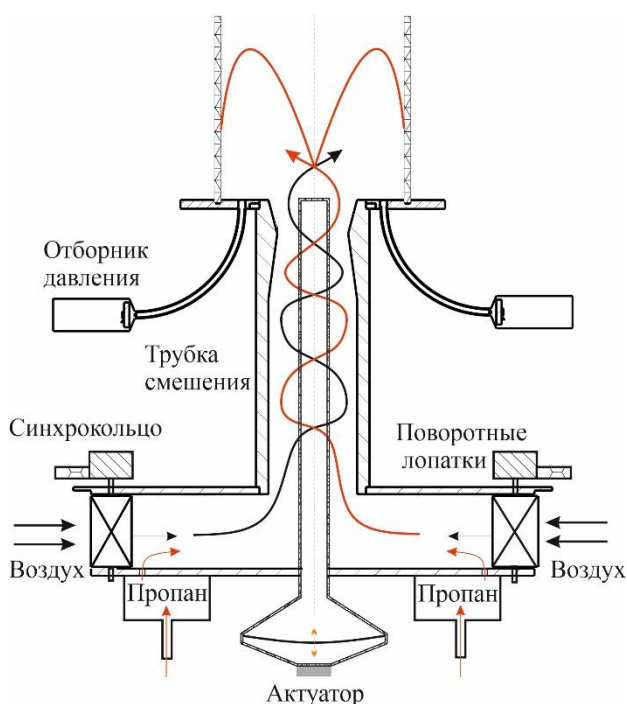


Рис. 1 Схема экспериментальной установки.

Воздух поступает через радиальный завихритель и закручивается при помощи 20 лопаток, установленных равномерно по углу и через смешительную

трубку диаметром 50 мм, направляется в открытое пространство. На выходе смешительной трубки установлен защитный экран диаметром 250 мм для предотвращения эжекции воздуха снизу. Направляющий аппарат состоит из 20 лопаток длиной 36,5 мм, шириной 9 мм и радиусом закругления хвостовика 4,5 мм. Все лопатки соединены синхронизирующем кольцом, которое позволяет одновременное поворачивать лопатки на одинаковый угол. В основании нижнего диска, около каждой лопатки, имеется отверстие диаметром 2 мм для подачи газообразного топлива, которое эффективно перемешивается закрученным потоком. По центру трубки смешения установлен актуатор внешним диаметром 20 мм. Эквивалентный диаметр составляет 30 мм. На конце актуатора установлен звуковой динамик низкой частоты с длинным ходом мембраны мощностью 15 Вт. Синусоидальный сигнал генерировался при помощи генератора звуковой частоты и через усилитель передавался на динамик. Форма пламени при воздействии активного управления при различных частотах регистрировалась на скоростную камеру. Анализировались также пульсации давления с помощью 4-х датчиков, расположенных по периметру факела.

По результатам данного исследования экспериментально установлено, что одновременное использование сильной закрутки и периодического акустического воздействия позволяет влиять на характер турбулентного горения, что важно для снижения вероятности нежелательных резонансных явлений в камере сгорания.

Список литературы

1. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. (1984). "Swirl Flows", Abacus Press, Tunbridge Wells, UK.
2. Syred, N., "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (pvc) in swirl combustion systems". Prog. Energy Combust. Sci., 32(2), pp. 93 – 161, 2006.
3. Stohr, M., Oberleithner, K., Sieber, M., Yin, Z., and Meier, W., "Experimental study of transient mechanisms of bi-stable flame shape transitions in a swirl combustor". Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 140, p. 011503, 2018.
4. Oberleithner, K., Terhaar, S., Rukes, L., and Oliver Paschereit, "Why Nonuniform Density Suppresses the Precessing Vortex Core." ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. December; 135(12): 121506, 2013.
5. S. V. Alekseenko, V. M. Dulin, Yu. S. Kozorezov & D. M. Markovich Effect of High-Amplitude Forcing on Turbulent Combustion Intensity and Vortex Core Precession in a Strongly Swirling Lifted Propane/Air Flame, Combustion Science and Technology, 184:10-11, p. 1862-1890, 2012

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00769)

ВЫДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Горячев В.Д.¹, Рыбакин Б.П.², Михальченко Е.В.²

¹ Тверской государственной технический университет, Тверь

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: gdv.vdg@yandex.ru

Рост быстродействия современных вычислительных комплексов дает возможность осуществлять все более подробные и точные расчеты, но, с другой стороны, приводит к необходимости создавать более универсальные системы визуализации этих расчетов для выборочного и комплексного отображения выходных данных огромного объема.

В данной работе обсуждаются возможности авторизованной комплексной системы визуализации (КСВИ) в вычислительной гидродинамике. Система используется при обработке результатов моделирования в прикладной газодинамике, теплофизике, при численном решении задач горения и детонации, и в других междисциплинарных исследованиях. В ее среде можно осуществлять комплексную обработку результатов вычислений, проводить интерактивный анализ изменения основных переменных с генерацией новых, производных и символических данных, эффективно отражающих газодинамические процессы.

В работе обсуждается программная реализация КСВИ для визуализации сверхзвуковых и гиперзвуковых течений с ударными волнами и газодинамическими разрывами. Для выделения особенностей высокоградиентных зон течений используется встроенный калькулятор расчета производных полей скалярных, векторных и тензорных величин. При дополнении сцен визуализации новыми графическими образами повышается качество интерпретации результатов вычислительных экспериментов.

КСВИ создана как многоплатформенная графическая Java среда. Интерактивная обработка данных в системе ведется на основе выборочных данных, полученных от используемых вычислительных систем моделирования. Система имеет набор функций восстановления информации при преобразовании физических полей, с выделением их особенностей в высокоградиентных и перемежаемых пограничных зонах, вблизи ударных волн и скачков, и в других, важных для анализа областях течений. Рендеринг сцен видеозаписей ведется по данным в узлах блочно-структурированных сеток, отфильтрованных по значимости, с выборочной генерацией более подробных АМР-сеток, встраиваемых в необходимых областях для повышения точности расчетов и информативности. Обработка данных в КСВИ сопровождается архивацией и видео с анимацией нестационарных режимов моделируемых процессов.

Возможности КСВИ показаны с использованием результатов расчета ряда задач газовой динамики [1], [2]: детонационных процессов в пиропатронах, моделирования сверхзвукового течения и горения в ротационно-детонационном двигателе. Проведен визуальный анализ процесса столкновения молекулярных

облаков и образования предзвездных зон. В среде КСВИ определена структура вихреобразования при столкновениях высокоскоростных потоков молекулярного газа, выявлены особенности распространения ударных волн и дефлаграционного горения при разных режимах работы РДД.

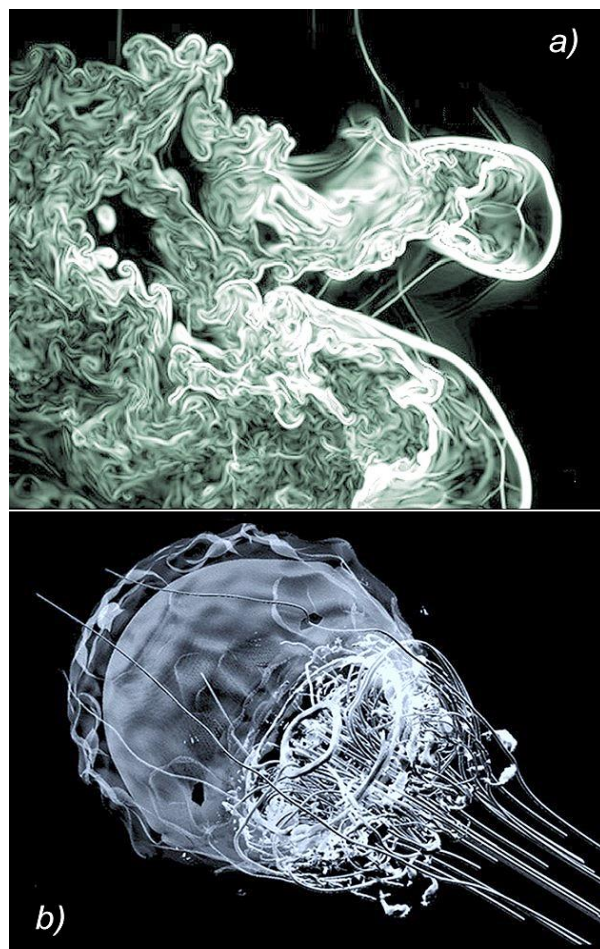


Рис. 1. Формирование вихревых структур при взаимодействии ударной волны от взрыва сверхзвуковой с молекулярными облаками. а) численный шилрен вихревого распределения плотности (RM и КН неустойчивости); б) филаментный распад МО (показ поверхностей Q -критерия).

Список литературы

1. B.P. Rybakin, V.D. Goryachev. Shape Morphing in Molecular Cloud-Cloud Collision Affected by Coherent Instabilities // Computers and Fluids, Vol.205, 2020, 104549.
2. E.V. Mikhailchenko, V.F. Nikitin, V.D. Goryachev. Simulation of the Operation of a Detonation Engine // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 98–107, 2022.

Работа поддержана РФФИ
(грант № 19–29–09070 mk)

ЧИСЛЕННОЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Гуськов О.В.¹, Кукшинов Н.В.^{1,2}, Мамышев Д.Л.^{1,2}

¹ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»,
111116, ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, Россия
² «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ)»,
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, Россия

e-mail: dlmamyshev@ciam.ru

Исследование выгорания спутных высокоскоростных струйных потоков при различных определяющих факторах до сих пор остаётся актуальной задачей [1]. Использование численного моделирования позволит расширить влияние многопараметричности на характеристики исследуемой задачи по сравнению с затратными экспериментальными исследованиями.

В работе рассматривается цилиндрический канал с 3-мя участками равной длины и диаметром = 100 мм. Конец цилиндрического канала соединяется с расширяющимся участком той же длины с выходным диаметром = 150 мм. Поток в канале создается за счёт профилированного сопла, обеспечивающего число Маха на срезе = 2. Для горения рабочей смеси водород подаётся соосно набегающему потоку из канала с диаметром = 10 мм.

Расчеты проводятся на структурированной многоблочной сетке, содержащей около 200 000 ячеек (рис. 1.). На входе в расчетную область задаются полные параметры потока (давление $p_0 \approx 5, 4, 3$ МПа и температуры T_0 , превышающие в ~ 2.5 раза температуру самовоспламенения) и состав квазिवоздуха, рассчитываемого на основе термодинамического равновесия для разных температур (создание высокой температуры воздуха обеспечивается с помощью огневого подогревателя, в котором формируется квазिवоздух). На форсунке задается расход в зависимости от варьируемого коэффициента избытка окислителя и полная температура $T_0 = 300$ К. На выходе – условие экстраполяции. На стенках – условия прилипания и заданной температуры. В качестве модели турбулентности используется $k-\omega$ SST модель [2], а в качестве химико-кинетического механизма модель [3]. Учёт взаимодействия турбулентности и химической кинетики (TCI) проводится с использованием модели LFR. Валидация расчетных моделей на основе известных экспериментов проведена в ряде работ, в частности, в [4, 5, 6]. Сходимость по сетке проводится на основе коэффициента полноты сгорания топлива и распределения давления на стенки вдоль канала.

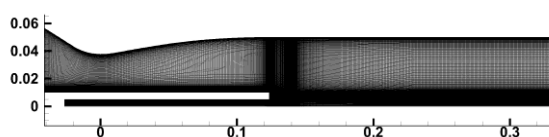


Рис. 1. Область расчетной сетки вблизи форсунки.

В результате моделирования получены расчетные поля температур, давления, чисел Маха и компонент при горении водорода в высокоскоростном потоке воздуха в модельном канале. Определены коэффициенты полноты сгорания топлива, значения которых не превышает 15%, в зависимости от полных параметров на входе, а также в зависимости от температуры стенок. Построена кривая зависимости коэффициента полноты сгорания от коэффициента избытка окислителя ($\alpha = 0.6 \dots 5$). Характерное распределение коэффициента полноты сгорания вдоль канала, определяемого по расходу, представлено на рис. 2. Определена разница результатов при использовании численного моделирования, а также интегрального метода, описанного в [7].

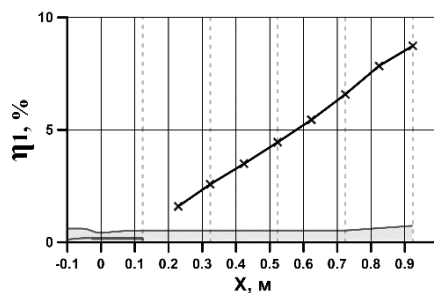


Рис. 2. Характерное распределение коэффициента полноты сгорания вдоль канала для различных поперечных сечений.

Список литературы

1. Аннушкин Ю.М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва, Т. 9, № 4, 1973. С. 473–483.
2. Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper, No. 93-2906, 1993. P. 21.
3. Hong Z., Davidson D. F., Hanson R. K. An improved H₂/O₂ mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements // Combustion and Flame, Vol. 158, 2011. pp. 633–644.
4. Kukshinov N.V., Batura S.N. Numerical simulation of hydrogen combustion in oxidizer supersonic flow in flowpaths of various configurations // J.Phys.:Conf.Ser, No. 1359 012064, 2019.
5. Kukshinov N.V., Mamyshev D.L. Numerical simulation of the shock-wave structure of a reacting hydrogen-air mixture in a model channel // J.Phys.:Conf.Ser, No. 2057 012067, 2021.
6. Zakharov V.S., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoy V.N. Computational and experimental study of the influence of the shape of nozzle supersonic part on the flow structure in the gas-dynamic flow path of a model high-altitude test facility // Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28(2), стр. 153–173.
7. Арефьев К.Ю., Кукшинов Н.В., Серпинский О.С. Методика экспериментального определения полноты сгорания потоков топливной смеси в каналах переменного сечения // Изв. РАН МЖГ. 2017. №5. С.90–102.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ ТОПКИ

Дектерев А.А.^{1,2}, Тэпфер Е.С.¹, Кузнецов В.А.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Сибирский федеральный университет

e-mail: dekterev@mail.ru

Тепловые станции на угольном топливе еще длительное время будут оставаться одним из основных источников тепла и электроэнергии. В России большинство пылеугольных энергоблоков уже выработали свой ресурс и требуют реконструкции.

Схема низкотемпературного четырехвихревого сжигания предложенная СибВТИ [1] является одним из наиболее перспективных вариантов реконструкции. Четырехвихревая схема была реализована при реконструкции на котлах Красноярской ТЭЦ-1 и Гусиноозерской ГРЭС и за длительное время эксплуатации показала хорошие результаты.

Настоящая работа посвящена расчетному изучению особенностей сложной пространственной структуры закрученных турбулентных потоков в топочных устройствах, анализу распределения температуры и тепловых потоков, оценке уровня токсичных выбросов, недожога топлива и определению зон вероятного шлакования, все это необходимо для обоснования схем реконструкции топочных камер.

Для описания взаимосвязанных физико-математических процессов происходящих в топочной камере при сжигании пылеугольного топлива используется комплексная модель, реализованная в программном комплексе ANSYS Fluent.

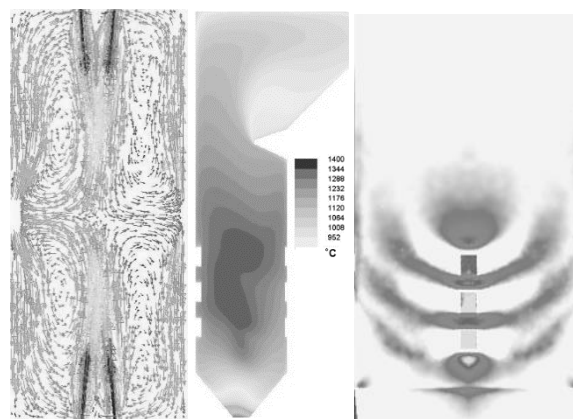
Первоначально для гидродинамического стенда четырёхвихревой топки были проведены экспериментальные и расчётные исследования структуры потока [2]. Показано, что в топочной камере формируются четыре устойчивые вихревые структуры с вертикальными осями и с противоположным направлением вращения. Наблюдается интенсивное нестационарное взаимодействие струй, которое обеспечивает интенсивное перемешивание топочной среды и при этом отсутствует наброс струй на стенки топки. URANS MSST методика моделирования турбулентности хорошо воспроизводит структуру как средних, так и пульсационных характеристик течения в топочной камере и результаты расчетов согласуются с данными эксперимента.

Далее исследовалась полномасштабная топочная камера котла сжигающего шлакующиеся бурые угли.

Математическое описание горения пылеугольного топлива в топочном пространстве включает в себя комплекс моделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы горения и движения угольных частиц т.д. Для численного моделирования нестационарного турбулентного течения топочной среды использовалась URANS методика. Движение угольных частиц описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и тяжести. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется

на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Процесс горения угольной частицы рассматривается в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент, и горение коксового остатка. Для расчета скорости выхода летучих веществ используется двухстадийное приближение на основе модели Кобайаши. Расчет горения газообразных компонент определялся с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Скорость горения коксового остатка рассчитывается согласно диффузионно-кинетической модели. Для описания процесса шлакования использовалась модель Кунке [3].

Проведено вариантное численное моделирование топочных процессов при сжигании бурых углей.



Результаты моделирования топки: а) поле скорости; б) температура; в) области шлакования топочных экранов

Показано, что четырёхвихревая схема сжигания угля в котле обеспечивает стабильное воспламенение и горение разных сортов бурого угля при допустимом уровне выбросов NO_x и низкой интенсивности шлакования топочных поверхностей нагрева.

Список литературы

1. Срывков С.В., Процайло .М.Я., Пронини М.С., Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Призматическая экранированная топка. Патент № 2032853, 10.04.95 г.
2. S.V. Alekseenko et al. Investigation of transfer processes in swirling flows in application to vortex furnaces for coal fuel // International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 161.
3. Bhuiyan, A. A., & Naser, J. (2016). Modelling of slag deposition and flow characteristics of coal combustion under oxy-firing condition in a 550 MW tangentially fired furnace. Applied Thermal Engineering, 106, 221–235.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00443)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЖИГАНИЯ УГЛЯ СОВМЕСТНО С АЛЮМОСИЛИКАТНЫМИ КАТАЛИЗАТОРАМИ

Козлов А.Н., Пензик М.В., Сосновский И.К., Баденко В.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

e-mail: kozlov@isem.irk.ru

В настоящее время исследования различных научных коллективов во многих странах направлены на решение задачи сокращения выбросов вредных веществ (NO_x, SO_x и др.) и парниковых газов (CO₂, H₂O и др.) от тепло- и электрогенерирующих установок. В связи с ужесточающимися требованиями экологической безопасности решение проблемы выбросов вредных веществ в атмосферу актуально и активно разрабатывается во всем мире. Стоит отметить, что рост потребления угля к 2025 году прогнозируется более чем на 30% к существующему уровню и на его долю будет приходиться до 1400 ГВт вырабатываемой электроэнергии. В связи с этим, необходимо разрабатывать эффективные экологически чистые технологии получения тепловой и электрической энергии при сжигании угля. В случае крупных энергоисточников применяются технологии, в основе которых лежат ПГУ на различные параметры пара или с внутрицикловой газификацией. Для данных технологий предусмотрены и разработаны способы улавливания и захоронения CO₂, а также методы очистки газа от соединений азота и серы. Используемые методы снижения выбросов рентабельны только в случае крупных энергоустановок. В случае малых и сверхмалых энергетических установок совершенствование технологий очистки дымовых газов и их реализация сталкиваются со значительными финансовыми затратами. В связи с этим необходимо развивать альтернативные пути улучшения сжигания угля в таких установках, с учетом экологичности и эффективности процесса. Одним из таких способов является добавление катализаторов при сжигании углей. Использование катализаторов ускоряет процесс горения, снижает температуру воспламенения, улучшает условия сжигания, увеличивает скорость тепловыделения, а также подавляет образование загрязняющих веществ, например SO_x.

В связи с этим, целью данной работы является изучение закономерностей совместного сжигания угля с алюмосиликатными катализаторами. Аллюмосиликатные катализаторы имеют хорошую каталитическую активность и недороги в производстве.

Исследования выполнены с использованием интегрированного комплекса синхронного термического анализа STA 449 F1, совмещенного с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 C (Netzsch). В качестве

материалов для исследований были взяты бурый азейский уголь (Иркутский угольный бассейн) и алюмосиликатные катализаторы ZSM, которые имеют разное соотношение между Al₂O₃/SiO₂. Кроме того, варьировали также соотношение угля и катализатора (5, 10, 15, 30%). На рис. 1 приведен пример сжигания угля с катализатором (15%) и без него.

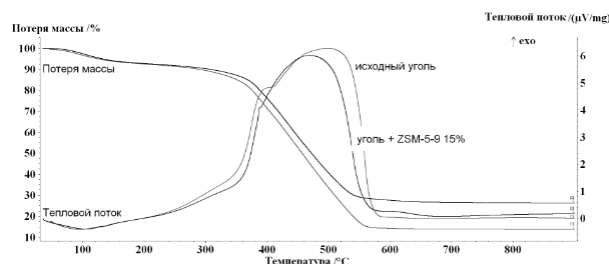


Рис. 1 Термоаналитические кривые сжигания угля с катализатором и без него.

В результате выполнения работы определены температуры воспламенения реакционной смеси при разном соотношении Al₂O₃/SiO₂ и уголь/катализатор. Рассчитаны кинетические коэффициенты и установлен механизм взаимодействия.

Определен состав продуктов сжигания изучаемых реакционных смесей. Установлен механизм образования основных компонентов газовой смеси (CO₂, SO₂, NO и др.).

С использованием электронной сканирующей микроскопии изучена поверхность и состав зол после совместного сжигания угля и катализатора.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-58-80016)

Department of Science and Technology of India (DST)
№CRG/2018/004610, DST/TDT/TDP-011/2017

Ministry of Science and Technology of the People's
Republic of China (MOST), № 2018YFE0183600

National Research Council of Brazil (CNPq)
№ 402849/2019-1

National Research Foundation of South Africa (NRF)
№ BRIC190321424123

Исследования выполнены на оборудовании
ЦКП «Высокотемпературный контур»

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В настоящем докладе представлены результаты численного моделирования распространения пламени в угле-метано-воздушной смеси в цилиндрическом канале. Постановка задачи основана на подходах механики двухфазных реагирующих сред [1] и допущениях работ [2, 3]. Уравнения, определяющие физико-математическую постановку задачи, записываются в консервативной форме в двумерном осесимметричном приближении. Математическая постановка задачи описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, уравнениями сохранения массы компонентов окислителя и горючего в газе, уравнением счетной концентрации частиц. Граничные условия определяются условиями симметрии на оси канала и условиями непротекания на закрытых стенках. В случае расчета открытого канала на правом открытом торце задавалось вытекание в атмосферу.

Методика решения задачи основана на методе Ван Леера [4] для определения потоков газа и методе А. Н. Крайко [5] для определения потоков для частиц на границах расчетных ячеек. Шаг по времени определялся условием Куранта-Фридрихса-Леви для случая двумерной постановки задачи [6].

Физико-химические параметры расчета задавались аналогично [2, 3]. В работе варьировались радиус и массовая концентрация угольной пыли. Объемная доля метана в газе задавалась постоянной и равной 7%. Результаты решения задачи приведены на рис. 1.

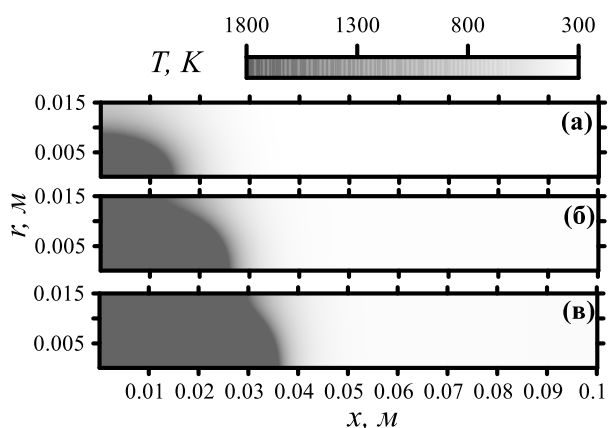


Рис. 1. Распределения температуры газа по пространству в момент времени $t = 5$ мс. (а) - Открытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.2$ кг/м³. (б) - Закрытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.2$ кг/м³. (в) - Закрытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.1$ кг/м³.

На рис.1 представлены распределения температуры газа в случае горения угле-метано-воздушной смеси в открытом (рис.1а) и закрытом (рис.1б,в) канале. На рисунке 1а представлено распределение температуры газа при горении газозвеси угольной пыли с радиусом частиц 10 мкм, массовой концентрацией угольной пыли 0.2 кг/м³ в открытом канале.

Момент времени 5 мс для выбранного состава газозвеси соответствует началу горения и развитию фронта пламени. Пламя не успело достигнуть стенок канала. В случае закрытого правого торца наблюдается ускорение горения газозвеси заданного состава на начальном этапе воспламенения. Это объясняется действием отраженной волны и увеличением концентрации несгоревшей смеси вблизи фронта горения. Уменьшение массовой концентрации частиц от 0.2 кг/м³ до 0.1 кг/м³ приводит к ускорению горения газозвеси (рис.1б, в). Это объясняется конкурирующим характером химических реакций в смеси. Горение идет в недостатке окислителя и увеличение массовой концентрации крупных частиц приводит к торможению скорости распространения пламени.

Распределения массовой концентрации частиц, соответствующие рис.1 приведены на рис.2.

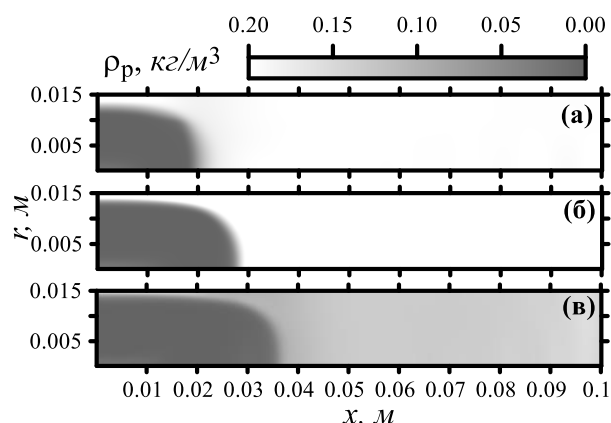


Рис. 2. Распределения массовой концентрации частиц по пространству в момент времени $t = 5$ мс. (а) - Открытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.2$ кг/м³. (б) - Закрытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.2$ кг/м³. (в) - Закрытый канал. $r_{pb} = 10$ мкм, $m_p = 0.1$ кг/м³.

Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987.
2. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // ИФЖ. 2018. Т.91, №5. С. 1328–1334.
3. Дементьев А.А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными // ИФЖ. 2016. Т. 89, №6. С. 1538–1546.
4. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. 32 (1). 101–136.
5. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // ПММ. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.
6. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва: Наука, 1976.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-71-10034)

СТРУКТУРА СТАЦИОНАРНОЙ ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В СИСТЕМЕ «ЖИДКИЙ СВИНЕЦ – ВОДА»

Мелихов В.И.^{1,2}, Мелихов О.И.^{1,2}, Салех Башар¹¹ НИУ «Московский энергетический институт», Москва² Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС

e-mail: basharsaleh10@gmail.com

Энергетические реакторы на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими охладителями представляют собой одно из шести направлений перспективных реакторов четвертого поколения, работа над которыми активно ведется во многих странах [1]. Парогенераторы этих реакторов представляют собой сосуды низкого давления, в которые поступает горячий теплоноситель из реакторов. В парогенераторе расположены теплообменные трубки высокого давления, к которым подводится питательная вода, а от них отводится пар, идущий на турбину.

Разрыв трубки парогенератора рассматривается конструкторами, как проектная авария, что делает ее предметом многочисленных исследований [2, 3]. В результате такого разрыва может образоваться многофазная смесь из капель воды, окруженных паровой пленкой и находящихся в жидком свинце [4]. В работе [2] было сделано предположение, что в такой системе возможен так называемый обратный паровой взрыв, вызванный дроблением капель воды в ударной волне, в отличие от традиционного парового взрыва из-за фрагментации капель расплава [5]. В [6] данная система анализировалась методом адиабат Гюгонио. Для условий экспериментов [7] было получено, что вычисленные с помощью данного метода работа расширения смеси и коэффициент конверсии достаточно хорошо совпадают с экспериментом.

Настоящая работа является продолжением исследования [7], в ней на основе уравнений механики многофазных сред [8] анализируется стационарная волна термической детонации в системе «жидкий свинец – вода».

Рассматривается следующая исходная неравновесная многофазная смесь при давлении 0,8 МПа: непрерывная (сплошная) фаза жидкого свинца температурой 700 – 800 К, в которой находятся капли воды, окруженные паровой оболочкой при температуре насыщения, соответствующей давлению в системе (443,5 К) и пузыри водяного пара такой же температуры.

На фронте ударной волны скачком меняется состояние этой смеси, вследствие чего возникает скоростная неравновесность фаз и далее, в зоне релаксации, начинается дробление капель воды на более мелкие капли (фрагменты) и происходит скоростное выравнивание фаз, а затем и термическое.

Для равновесного состояния многофазной смеси на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, связывающих равновесную смесь с исходной неравновесной смесью, на плоскости «удельный объем смеси – давление смеси» строится адиабата Гюгонио, определяющая возможные состояния равновесной смеси. Наклон прямой, соединяющей на этой плоскости точку, характеризующую исходную

смесь, и произвольную точку на адиабате Гюгонио определяет скорость волны термической детонации.

После вычисления скорости волны детонации находятся параметры смеси на ударной волне. Для этого используются соотношения, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии по обе стороны разрыва, дополненные предположением, что температура жидкого свинца на разрыве не меняется.

Далее эти параметры применяются в качестве краевых условий при интегрировании одномерных стационарных уравнений механики многофазных сред, описывающих процессы в релаксационной зоне.

Каждая рассматриваемая фаза описывается своими объемной долей, скоростью и температурой. Давление во всех фазах принимается одинаковым. Теплообмен и трение между фазами описываются соотношениями, представленными в [5, 8] Скорость фрагментации капель воды вычисляется по корреляции Пилча и Эрдмана [9].

С помощью описанного метода были определены распределения давления, скоростей и температур фаз в зоне релаксации и их тренды при варьировании параметров исходной смеси.

Список литературы

1. Alemberti A., Smirnov V., Smith C.F., Takahashi M. Overview of lead-cooled fast reactor activities // *Progr. Nucl. Energy*. 2014. V. 77. P. 300–307.
2. Dinh T.N. Multiphase flow phenomena of vapor generator tube rupture in a lead-cooled reactor system: a scoping analysis // *Int. Congr. on Advances in Nucl. Power Plants ICAP 2007*. Nice, France, 2007. Paper 7497.
3. Iskhakov A.S., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Vapor generator tube rupture in lead-cooled fast reactors: estimation of impact on neighboring tubes // *Nucl. Eng. Des.* 2019. V. 341. P. 198–208.
4. Безносов А.В., Пинаев С.С., Давыдов Д.В. Молодцов А.А., Бокова Т.А., Мартынов П.Н., Рачков В.И. Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель-рабочее тело // *Атомная энергия*. 2005. Т. 98 №3. С. 182–187.
5. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов // М.: Изд-во «ИПМех РАН», 2020. 276 с.
6. Iskhakov A.S., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Hugoniot analysis of energetic molten lead-water interaction // *Annals Nucl. Energy*. 2019. V. 129. P. 437–449.
7. Cheng S., Matsuba K., Isozaki M., Kamiyama K., Suzuki T., Tobita Y. An experimental study on local fuel-coolant interactions by delivering water into a simulated molten fuel pool // *Nucl. Eng. Des.* 2014. V. 275. P. 133–141.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 464 с.
9. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // *Int. J. Multiphase Flow*. 1987. V. 13. P. 741–757.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00709)

СМАЧИВАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА

Мисюра С.Я., Бильский А.В., Гобызов О.А., Рябов М.Н., Морозов В.С.

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

e-mail: misura@itp.nsc.ru

Смачиваемость поверхности стенки зависит от материала, шероховатости, свойств используемой жидкости. Исследование смачиваемости поверхностей важно для развития современных технологий: струйной печати [1], охлаждения микроэлектроники [2], изготовления микролинз [3]. Исследование влияния шероховатости на смачиваемость медных и стальных поверхностей представлено в [4]. Шероховатость и текстура влияют на испарение и тепломассообмен в жидкости [5]. Применение термической обработки медной фольги сопровождается удалением поверхностных примесей и оксидов, изменением дефектов, размера и кристаллической ориентации зерен. Скорость этих процессов зависит от степени чистоты материала, температуры и времени отжига, используемых газов при отжиге [6]. Цели данной экспериментальной работы: 1) сравнение шероховатости поверхности медной подложки до и после высокотемпературного отжига в атмосфере H_2 ; 2) определение влияния отжига на изменение диаметра и краевого угла капли.

В экспериментах использовалась медная фольга M2 (масс. 99.7%) с толщиной стенки 40 мкм. Отжиг осуществлялся в печи при температуре 1000 °С.

2D-изображения полученные с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) поверхности меди до отжига и после показаны на рис. 1 (а, б). В табл. 1 показаны средние значения Ra и Rq для десяти длин OL поверхности меди (рис. 1 (а)). Значения шероховатости были получены с вычетом волнистости, связанной с изготовлением меди фольги методом прокатки. Полученные данные показывают, что при длительном отжиге фольги в атмосфере H_2 значения Ra и Rq уменьшаются.

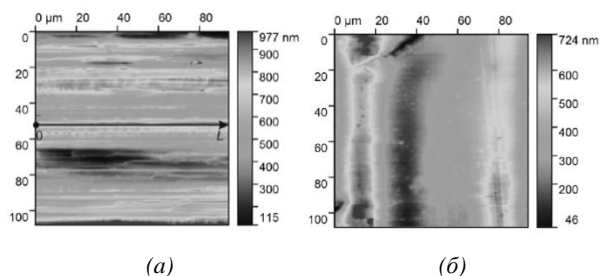


Рис. 1. Морфология медной фольги: (а) без отжига; (б) с отжигом (отжиг 2 часа).

Таблица 1. Средние значения профилей шероховатости по длине OL : Ra – средняя шероховатость, Rq – среднеквадратическая шероховатость.

	Без отжига	Отжиг (2 ч)
Ra , nm	9.4	4.3
Rq , nm	11.9	6.5

На рис. 2 показано изменение диаметра и статического краевого угла капль бидистиллята на медной фольге с течением времени. После отжига и охлаждения меди до комнатной температуры в атмосфере H_2 образцы выносились из печи на воздух и измерялись геометрические параметры капль. Капли наносили дозатором в различные точки поверхности меди. После каждого измерения капли удаляли с поверхности и создавали новые в другом месте поверхности.

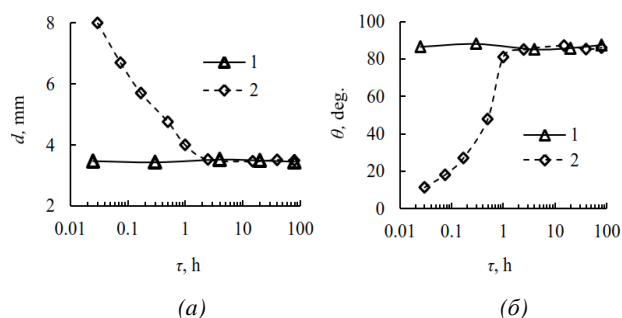


Рис. 2 (а) Изменение начального диаметра капль дистиллята во времени на поверхности медной фольги; (б) Изменение начального статического краевого угла капль во времени: 1 - медь без отжига; 2 - медь с отжигом. Объем капль $V = 10$ мкл, отжиг 2 часа в атмосфере H_2 .

В отличие от поверхности меди без отжига отжиг привел к увеличению d в 2.2–2.4 раза и уменьшению θ в 7.5–7.7 раза (время нахождения образца на воздухе $\tau = 0.03$ ч). Дальнейшее изменение диаметра и краевого угла на поверхности образца после отжига связано с адсорбцией углеводородных примесей из воздуха на поверхность медной фольги из окружающего воздуха. Адсорбция углеводородов приводит к снижению смачиваемости поверхности меди. Для $\tau > 1$ ч кривые 1 и 2 совпадают, т.е. на поверхности меди образуется слой углеводородных примесей и эффект отжига отсутствует.

Список литературы

- Sirringhaus H., et. al. High-Resolution Inkjet Printing of All-Polymer Transistor Circuits // Science 2000. V. 290, P. 2123–2126.
- Arcamone J., et. al. Evaporation of Femtoliter Sessile Droplets Monitored with Nanomechanical Mass Sensors // J. Phys. Chem. B 2007. V. 111, P. 13020–13027.
- Bonaccorso E., et. al. Fabrication of Microvessels and Microlenses from Polymers by Solvent Droplets // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, P. 124101.
- Kuznetsov G.V., et. al. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces // Surf. Coat. Technol. 2021. V. 422, P. 127518.
- Misyura S.Y. The influence of convection on heat transfer in a water layer on a heated structured wall // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2019. V. 102, P. 14–21.
- Ibrahim A., et. al. Effects of annealing on copper substrate surface morphology and graphene growth by chemical vapor deposition // Carbon 2015. V. 94, P. 369–377.

Работа поддержана РНФ (грант № 21-19-00732)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАКРЫТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет, Томск

e-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

Доклад посвящен исследованию горения пропано-воздушной смеси в замкнутом цилиндрическом канале. Актуальность исследования связана с необходимостью изучения процессов распространения пламени в газовых смесях в условиях закрытых объемов.

Постановка задачи формулируется на основе физико-математической модели [1, 2] и записывается в двухмерном осесимметричном приближении. Учитывается тепловое расширение и движение газа. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Химическая реакция определяется по закону Аррениуса со вторым порядком реакции, первым по кислороду и первым по пропану.

Метод решения задачи основан на методе Ван Лера [3] для определения потоков на границах расчетных ячеек. Шаг по времени определялся условием Куранта-Фридрихса-Леви для случая двухмерной постановки задачи [4].

Параметры расчета задавались аналогично [1, 2], константы скорости химической реакции определялись в [1, 2] путем сравнения с данными по скорости горения [5]. Результаты приведены на рис. 1, 2.

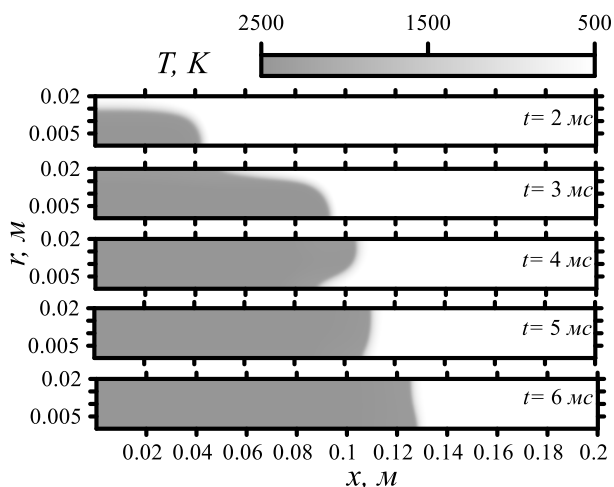


Рис. 1. Распределения температуры газа в различные моменты времени. $a_{vol}=3\%$.

На рис.1 представлены распределения температуры газа в случае горения пропано-воздушной смеси с содержанием пропана 3% по объему. Согласно рис.1 пламя достигает боковых стенок канала, после чего идет резкий скачок в скорости распространения пламени в сторону правого торца канала. После этого начинается продвижение пламени в сторону правого торца с изменением формы. По мере продвижения пламени фронт пламени выравнивается вдоль радиального направления. Скорость пламени при этом стремится к стационарному значению.

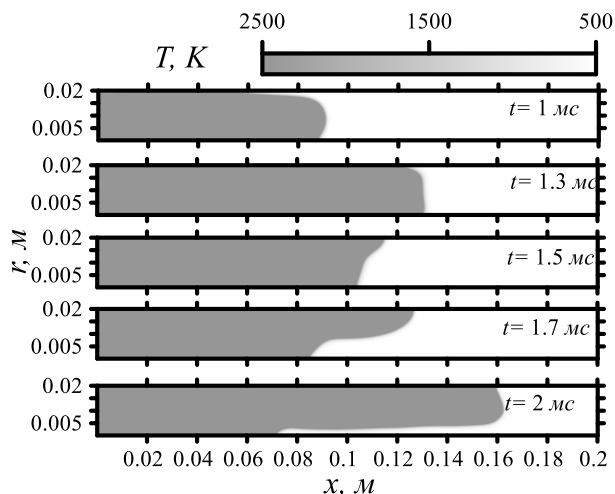


Рис. 2. Распределения температуры газа в различные моменты времени. $a_{vol}=4\%$.

На рис.2 представлены распределения температуры газа по пространству в различные моменты времени при горении пропано-воздушной смеси с содержанием пропана 4%. Из сравнения рис.1, 2 видно увеличение скорости распространения пламени, а также переход к неустойчивому-пульсирующему вдоль продольного направления пламени в случае горения смеси с составом, соответствующим стехиометрии (4%).

Из расчетов получено, что видимая скорость распространения пламени в узком закрытом канале имеет несколько пиков, связанных с продвижением пламени по каналу. В частности, первый пик для смеси любого состава возникает при достижении пламенем боковых стенок канала. Второй пик возможен в отраженной волне за счет прихода в зону пламени дополнительной энергии и дополнительных несгоревших компонентов газа.

Список литературы

1. Кантарбаева А., Моисеева К. М. Особенности распространения пламени в угле-пропано-воздушной газозвеси // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2021. №74. С. 95–102.
2. Moiseeva K M, Krainov A Yu, Krainov D A Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 696. 012011.
3. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. 32(1). 101–136.
4. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва: Наука, 1976.
5. Льюис Б., Эльбе Г. [Lewis B, Von Elbe G]. Горение, пламя и взрывы в газах/ пер. с англ. под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова. М.: Мир, 1968.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-71-10034)

ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ БИОМАССЫ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Пензик М.В., Козлов А.Н., Баденко В.В., Сосновский И.К.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

e-mail: penzik@isem.irk.ru

Рациональное использование возобновляемых источников энергии является потенциальным решением для снижения потребления ископаемого топлива и развития углерод-нейтральных технологий получения энергии.

Известно, что при пиролизе и газификации биомассы образуется газ, жидкие продукты и древесный уголь, которые можно использовать для получения энергии (тепловой и электрической) и ценных химических соединений. Однако, эти процессы сопровождаются образованием смолы, которая создает препятствия для их широкого внедрения в промышленных масштабах.

Высокочастотный индукционный нагрев (ИН) позволяет обеспечить равномерный и быстрый нагрев смесей углеродсодержащих материалов, что существенно повышает эффективность процессов переработки биомассы и качество образующихся продуктов.

В настоящее время опубликовано достаточно мало исследований, посвященных использованию ИН для термохимической конверсии углеродсодержащего сырья [1–3]. В отличие от ранее опубликованных исследований, в данной работе изучен ИН смеси биомассы (сосновые опилки 1–2 мм) и металлических частиц (стальные шарики диаметром 4 мм) в кварцевом реакторе при расходе воздуха 1л/мин. На рис. 1 представлен температурный профиль внутри слоя металлических частиц при мощности индукционного нагревателя 700 Вт в слое металлических частиц.

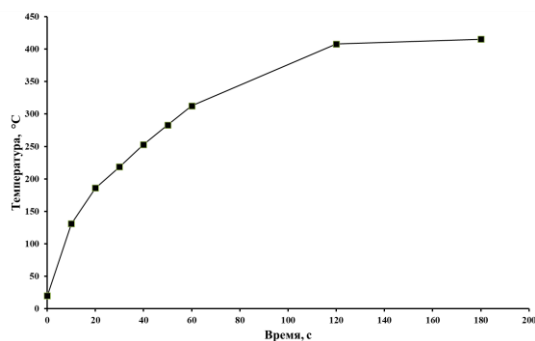


Рис. 1. Температура внутри слоя металлических частиц в зависимости от времени ИН.

На рис. 2. показаны значения температуры образующихся газов при термохимической конверсии биомассы.

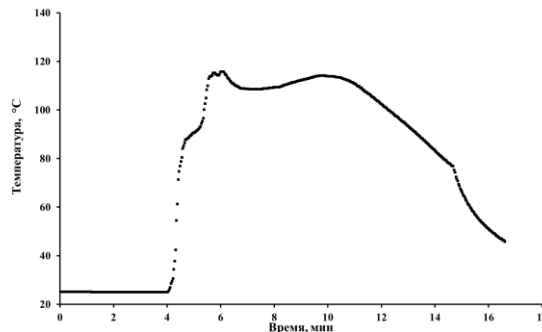


Рис. 2. Температуры образующихся газов при термохимической конверсии биомассы под действием ИН.

Анализ выделяющихся газов проводили с помощью масс-спектрометрии. На рис. 3. приведены кривые ионных токов образующихся соединений. Основными выделяющимися компонентами в условиях эксперимента являются: CH_4 (m/z 15), H_2O (m/z 18), CO (m/z 28), фрагменты углеводородов C_3H_7 , $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}$ (m/z 43), диоксид углерода CO_2 (m/z 44). При этом наблюдается снижение содержания кислорода O_2 (m/z 32), что связано с его участием в окислительных процессах.

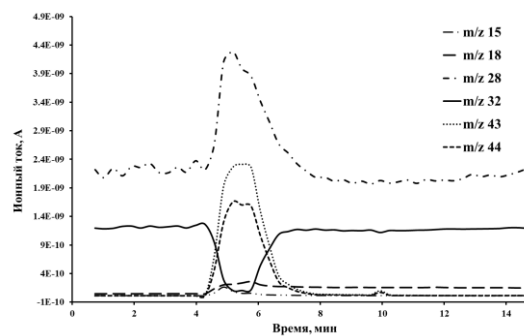


Рис. 3. Кривые ионных токов основных продуктов при термохимической конверсии биомассы под действием ИН.

Список литературы

- Muley, P. D., Henkel, C., Abdollahi, K. K., Marculescu, C., & Boldor, D. (2016). A critical comparison of pyrolysis of cellulose, lignin, and pine sawdust using an induction heating reactor. *Energy conversion and management*, 117, 273–280.
- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, D. Y. (2006). Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 76(1–2), 230–237.
- Sabogal, O. S., Valin, S., Thiery, S., & Salvador, S. (2021). Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste. *Chemical Engineering Research and Design*, 173, 206–214.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-58-80016)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИКО-ВИХРЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ИНЖЕКТОРЕ, НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ СМЕШЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ СПУТНОЙ ПОДАЧЕ

Серебряков Д.И.

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

e-mail: diserebryakov@ciam.ru

Для решения задачи интенсификации смешения и горения водорода при спутной подаче предлагается использовать акустико-вихревые колебания, генерируемые в инжекторе.

В работе представлены результаты расчётных исследований влияния акустико - вихревых колебаний на интенсификацию смешения и горения газообразного водорода в модельном канале, проведённых в двумерной нестационарной постановке. В расчётах использовалась упрощённая модель горения водорода в воздушном потоке, состоящая из одной реакции. Модельный канал представляет собой канал переменного сечения, в который поступает воздушный поток. Спутно воздушному потоку через форсунку инжектора подаётся водород (рис. 1). При этом на форсунке реализуется звуковой перепад давлений. Непосредственно в канале инжектора устанавливается прямоугольный в поперечном сечении профиль. В результате поочерёдного схода отрывных зон с верхней и нижней сторон профиля создаётся цепочка вихрей, представляющая собой дорожку Кармана [1]. Генерируемые таким образом акустико-вихревые колебания в канале инжектора вызывают пульсацию водородной струи на выходе из форсунки как по параметрам, так и по направлению (рис. 2).

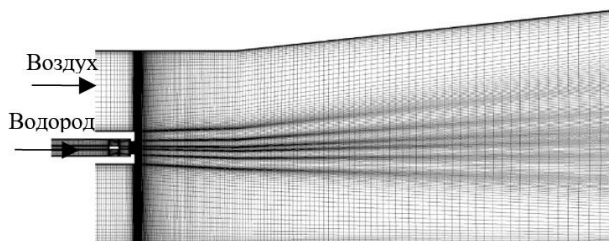


Рис.1. Область расчётной сетки вблизи инжектора.

Проведена оценка степени влияния акустико-вихревых колебаний на интенсификацию смешения и

горения водорода путём сравнения полученных результатов со случаем при стационарном истечении водорода из форсунки. Было получено что в рассмотренном диапазоне параметров расчётной модели в случае пульсации водородной струи под воздействием акустико-вихревых колебаний в канале инжектора массовое содержание несгоревшего водорода на выходе из модельного канала на 6–10% меньше чем в случае стационарного истечения водорода.

В ходе проведения расчётных исследований было получено, что при использовании модели турбулентности $k-\epsilon$ в следе за инжектором реализуется слабо выраженная дорожка Кармана в отличие от расчётных случаев где использовались модели турбулентности $k-\omega$ и Spalart-Allmaras. Это может быть связано с тем что данная модель турбулентности даёт завышенные значения турбулентной вязкости. Аналогичный эффект был отмечен в работе [2].

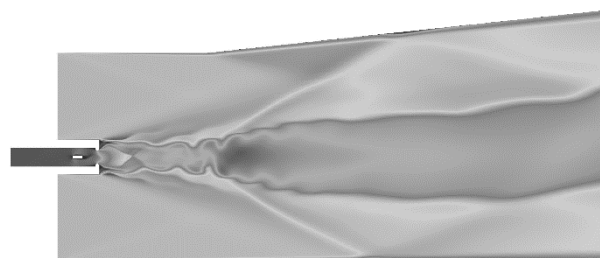


Рис.2. Пульсации потока, вызванные акустико-вихревыми колебаниями в инжекторе

Список литературы

1. Милн -Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. – М.: Мир, 1964. 660–661 с.
2. Zakharov V.S., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoy V.N. Computational and experimental study of the influence of the shape of nozzle supersonic part on the flow structure in the gas-dynamic flow path of a model high-altitude test facility // Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28(2), 153–173 с.

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО СИГНАЛА

Сидоров Р.С.

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

e-mail: rodik@myrambler.ru

В экспериментах параметры периодически проходящих ударных или детонационных волн определяются, как правило, при помощи датчиков пульсаций давления [1, 2]. Детонационные волны можно также исследовать при помощи оптических методов [1, 3]. При измерении пульсаций давления в высокотемпературном потоке датчики соединяются с камерой посредством достаточно длинной (около 1 метра) приёмной части волновода, чтобы исключить их контакт с горячим газом. После прохождения ударной или детонационной волны в месте отбора давления по волноводу распространяется затухающая ударная волна, которая на некоторой длине вырождается в акустическую. Поэтому длина и диаметр приёмной части волновода должны быть выбраны таким образом, чтобы ударный фронт сохранялся вплоть до его регистрации датчиком. При этом, как показало проведенное исследование, ударные волны затухают гораздо сильнее акустических (рис. 1).

В данной работе произведено численное исследование газодинамических и тепловых процессов в волноводе при его заполнении продуктами сгорания и периодическом прохождении по нему ударных волн.

В качестве источника периодических ударных волн была выбрана кольцевая кислород-водородная детонационная камера диаметром 40 мм [3]. Волновод устанавливался на торцевой стенке камеры. Моделирование подачи горючей смеси производилось с использованием специального граничного условия с «микросоплами», описанного в [3].

В исследовании было применено граничное условие с периодической временной зависимостью полного давления и постоянной полной температурой, которое допускает знакопеременный расход. Также были разработаны нуль- и одномерная математические модели для оценки времени заполнения волновода продуктами сгорания и установившегося давления в нём.

Показано, что снижение температуры газа до начальной температуры стенок волновода происходит на длине порядка 50 калибров. Произведено исследование затухания ударных волн, проходящих с разной частотой. Получена зависимость амплитуды колебаний давления от длины канала. Так, на расстоянии 1 м от места отбора давления амплитуда пульсаций частотой 2 кГц уменьшается приблизительно в 20 раз.

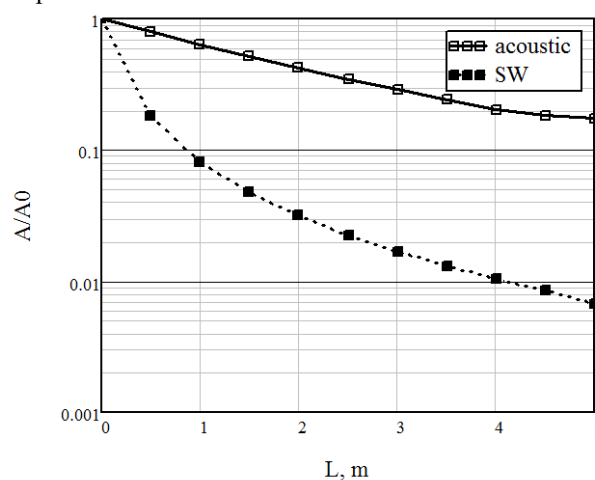


Рис.1. Затухание акустического и ударно-волнового сигналов частотой 750 Гц в волноводе.

Список литературы

1. В.Ю. Александров, К.Ю. Арефьев, А.А. Баскаков, М.А. Ильченко. Детонация воздушно-метановых смесей в сверхзвуковом сносном потоке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2017, №2.
2. В.С. Иванов, С.С. Сергеев, С.М. Фролов и др. Измерение давления в непрерывно-детонационных камерах сгорания // Горение и взрыв, 2020, Т 13 №1, С 55–65.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Изд-во СО РАН, 2013.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНВЕРСИИ СМЕСЕЙ АНТРАЦИТА С ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТЬЮ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Слюсарский К.В., Асылбеков А.К.

Томский политехнический университет, Томск

e-mail: konstantinsv@tpu.ru

Пиролиз является привлекательным решением для переработки биомассы и отходов различного происхождения в продукты с высокой добавочной стоимостью [1]. В результате пиролизической переработки образуются продукты в твердой, жидкой и газовой фазе. Жидкие продукты пиролиза (называемые пиролизной жидкостью) являются подходящими топливами для использования в энергетике [2]. Между тем, сжигание пиролизной жидкости, как биомассы и отходов различного вида в целом, сопряжено с рядом сложностей, таких как волатильность свойств и низкая теплота сгорания [3]. Использование данных топлив в смеси с углем позволяет нивелировать указанные негативные эффекты.

Большинство представленных в литературе работ по зажиганию и горению подобных смесей выполнены применительно к водоугольным топливам [4–6]. Замена воды в составе подобных топлив на пиролизную жидкость позволяет существенно улучшить его свойства: снизить вязкость (на 55%, согласно [6]) и времена задержки зажигания (на 54% согласно [5]). При этом практически во всех приведенных работах отмечается, что наиболее значительный положительный эффект достигался при использовании пиролизной жидкости совместно с низкорекционными твердыми топливами, такими как антрацит [7], фильтркек [8] или твердыми продуктами пиролиза [9].

Ранее в [7] было сделано предположение о термическом механизме воздействия добавок пиролизной жидкости на зажигание и горение смеси антрацита с жидким продуктом пиролиза покрывшек. Однако данная гипотеза применима только в отношении жидких добавок с высокой теплотой сгорания и при температурах грающей среды выше 700 °С

Для исследований использовался антрацит Красноярского месторождения, идентичный представленному в [7]. В качестве жидкой добавки использовались образцы пиролизной жидкости, полученные на промышленных предприятиях по переработке древесных отходов, нефтешлама и резинотехнических изделий (РТО). Состав данных жидкостей представлен в таблице 1.

Таблица 1. Свойства пиролизной жидкости.*

Образец	Состав, масс.%					А, масс. %	Q, МДж/кг
	С	Н	N	S	О		
Древесные отходы	60	8,0	2,2	-	29,5	1,4	25,0
Нефтешлам	80	11,4	-	0,7	7,4	-	42,6
РТО	86	11,0	0,6	0,8	1,4	-	43,3

*Элементный состав приведен в пересчете на сухую беззольную массу, зольность и низшая теплота сгорания – на рабочую массу.

Исследовались смеси антрацита с добавкой указанных пиролизных жидкостей с массовой концентрацией 5, 10, 20 и 25 масс.%. Исследование проводилось в помощью термогравиметрического анализа-

тора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в среде атмосферного воздуха в температурном диапазоне 50–1000 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин. Были определены значения энергии активации по методу Коатс-Рэдферна.

Полученные данные представлены на рис. 2. Установлено, что для всех исследованных образцов пиролизной жидкости, энергия активации меняется незначительно в зависимости от её массовой концентрации, что свидетельствует о доминирующем вкладе пиролизной жидкости в энергию активации процесса конверсии в среде воздуха.

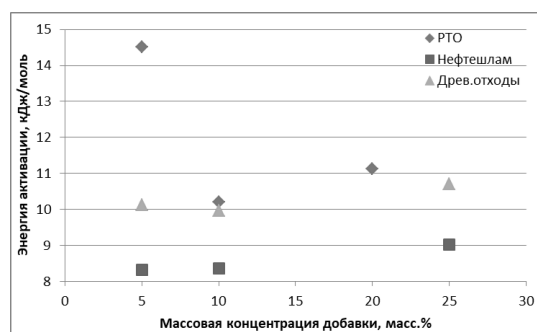


Рис. 1. Зависимость энергии активации конверсии смесей антрацита с пиролизной жидкостью с различной массовой концентрацией.

Список литературы

- Jha S., Okolie J.A., Nanda S., Dalai A.K. A Review of Biomass Resources and Thermochemical Conversion Technologies // Chem. Eng. Technol. 2022. Article in press.
- Oasmaa A., Van De Beld B., Saari P., Elliott D.C., Solantausta Y. Norms, standards, and legislation for fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass // Energy and Fuels 2015. V. 29. P. 2471–2484.
- Sharma S., Sharma M., Mudgal D., Bhowmick H. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers // Corros. Rev. 2021. V. 39. P. 387–408.
- Vershina K., Nyashina G., Strizhak P. Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Waste-Derived Fuel Slurries, Low-Grade Liquids, and High-Moisture Waste: Review // Appl. Sci. 2022. V. 12. No. 3. Paper 1039.
- Gvozdyakov D. V., Gubin V.E., Larionov K.B., Zenkov A. V. Ignition of Coal-Water Fuel with the Addition of the Liquid Fraction of Rubber Pyrolysis Products // Chem. Pet. Eng. 2020. V. 56. P. 42–47.
- Singh H., Kumar S., Kumar M. S. Improvements in the Rheological Characteristics of the Complex Coal-Water Suspension Using Gasification Derived Waste Water // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1276. Paper 012066.
- Larionov K.B., Slyusarskiy K. V., Tsubulskiy S.A., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Lavrinenko S. V., Gubin V.E. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires. // ACS Omega 2021. V. 6. P. 19731–19739.
- Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) // Therm. Eng. 2016. V. 63. P. 707–717.
- Vershina K.Y., Glushkov D.O., Strizhak P.A., Shabardin D.P. Conditions of Stable Ignition of Coal-Water Slurry Containing Petrochemicals Based on Carbon Residue of Tire Pyrolysis // Chem. Pet. Eng. 2017. V. 53. P. 71–77.

Работа выполнена при финансовой поддержке грата Президента РФ (проект № МК-2563.2022.1.2)

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ
ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С УСТУПОМ**

Соколова Е.И.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

e-mail: eisokolova@ciam.ru

Исследование горения водорода в сверхзвуковом потоке воздуха представляет интерес для создания силовых установок для авиационно-космических систем и самолетов. Экспериментальное исследование прямых воздушных реактивных двигателей является дорогостоящим и не может обеспечить определение необходимых параметров во всей исследуемой области. Особо сложным является получение полей температур, давления, скоростей и других параметров, по распределениям которых возможно более уверенно судить о происходящих процессах в камере.

Сократить количество экспериментов возможно посредством применения численного моделирования, позволяющего получать трехмерную картину параметров потока на различных режимах работы двигательной установки. Для получения корректных данных необходимо использовать модели, наиболее точно описывающие физические процессы, такие как турбулентность и горение в сверхзвуковом потоке. В данной работе моделируется процесс горения водорода в модельной камере сгорания с уступом.

Для моделирования процесса горения в данной работе использовались химико-кинетические схемы Хэнсона-Хонга, Якимовского и Димитрова. Модель Хэнсона-Хонга включает 31 реакцию и 10 компонент, обладает большой энергией активации и высокими скоростями реакции по выработке воды. Схема Якимовского включает 33 реакции, 13 компонент и имеет реакции образования соединений азота, таких как HNO , NO_2 , NO . Схема Димитрова, включает 9 компонент и 30 реакций, азот не участвует в реакциях и выступает в качестве буферного газа.

Расчетная область представляет собой трехмерную камеру сгорания из эксперимента CARDC (China Aerodynamics Research and Development Center) [1], которая имеет прямоугольное сечение и примыкает к изолятору постоянного поперечного сечения, имеющему длину 200 мм и высоту 18 мм. Совокупность этих двух частей представляет собой внезапное расширение. Часть камеры длиной 220 мм имеет верхнюю стенку, расположенную под углом 3° к горизонту. Ширина камеры составляет 40 мм. Перед входом в расширяющуюся область имеется 7 отверстий диаметром 1.2 мм для топлива. Газообразный водород впрыскивается через эти отверстия вертикально в воздушный поток со скоростью звука.

Для расчетной области была построена структурированная сетка №1 общим объемом 779418 узлов с уплотнением к границам, для точного разрешения пограничного слоя. Для модели Якимовского была построена дополнительная сетка №2 с уплотнением в 2 раза к границам, при неизменном коэффициенте роста ячеек 1.2. Высота первой пристенной ячейки для первой сетки составила 0.1 мм, для второй сетки 0.05 мм. Данная сеточная модель показала хороший

результат, после чего была построена сетка №3, число узлов которой составило $2.6 \cdot 10^6$. В результате верификации трех вариантов сеточной модели было установлено, что оптимально использовать сетку №3, так как дальнейшее уплотнение не приводит к изменению результатов. Для данной сетки были просчитаны все модели химии.

В качестве модели турбулентности используется модель $k-\omega$ SST, разработанная Ментером. Для учета взаимодействия турбулентности с горением применяется модель laminar finite rate. Для решения общей системы уравнений сохранения используется метод AUSM. Применяется второй порядок аппроксимации конвективных потоков на границах ячеек и число Куранта, равное единице.

Первым этапом проводится моделирование без впрыска водорода в камеру, на следующем этапе водород подается с коэффициентом избытка окислителя $\alpha=2.857$. Происходит самовоспламенение топлива. Получены контуры мольных долей, давления, температуры, Маха. Распределения давлений на оси нижней стенки, полученные при численном моделировании как аэродинамики, так и горения, полностью согласуются с экспериментальными данными.

Относительные отклонения рассчитанного распределения давления на оси нижней стенки, от экспериментального, для варианта без горения, составляют 14.8% для схемы Хэнсона, 12.8% для схемы Димитрова, 12.8% для схемы Якимовского (для сетки с минимальным уплотнением); 14.9% для схемы Якимовского для сетки, уплотненной в два раза; 14.6% для наиболее плотной сетки для схемы Хэнсона, а также 14.3% для схем Димитрова и Якимовского. Относительные отклонения для варианта с горением: 10.7% для схемы Хэнсона, 13.6% для схемы Якимовского и 11.4% для схемы Димитрова для менее плотной сетки; 15.7 для схемы Якимовского для сетки, уплотненной в два раза; 18.5% для наиболее плотной сетки для схемы Хэнсона, а также 15.2% для схемы Димитрова и 16% для схемы Якимовского.

Плотные сетки дают более корректный результат с точки зрения качественного соответствия, но отклонение возрастает из-за небольших численных различий.

Можно сделать вывод о том, что схема Димитрова лучше других описывает кинетику водородовоздушной смеси по мере ее продвижения по прямому каналу со сверхзвуковой скоростью.

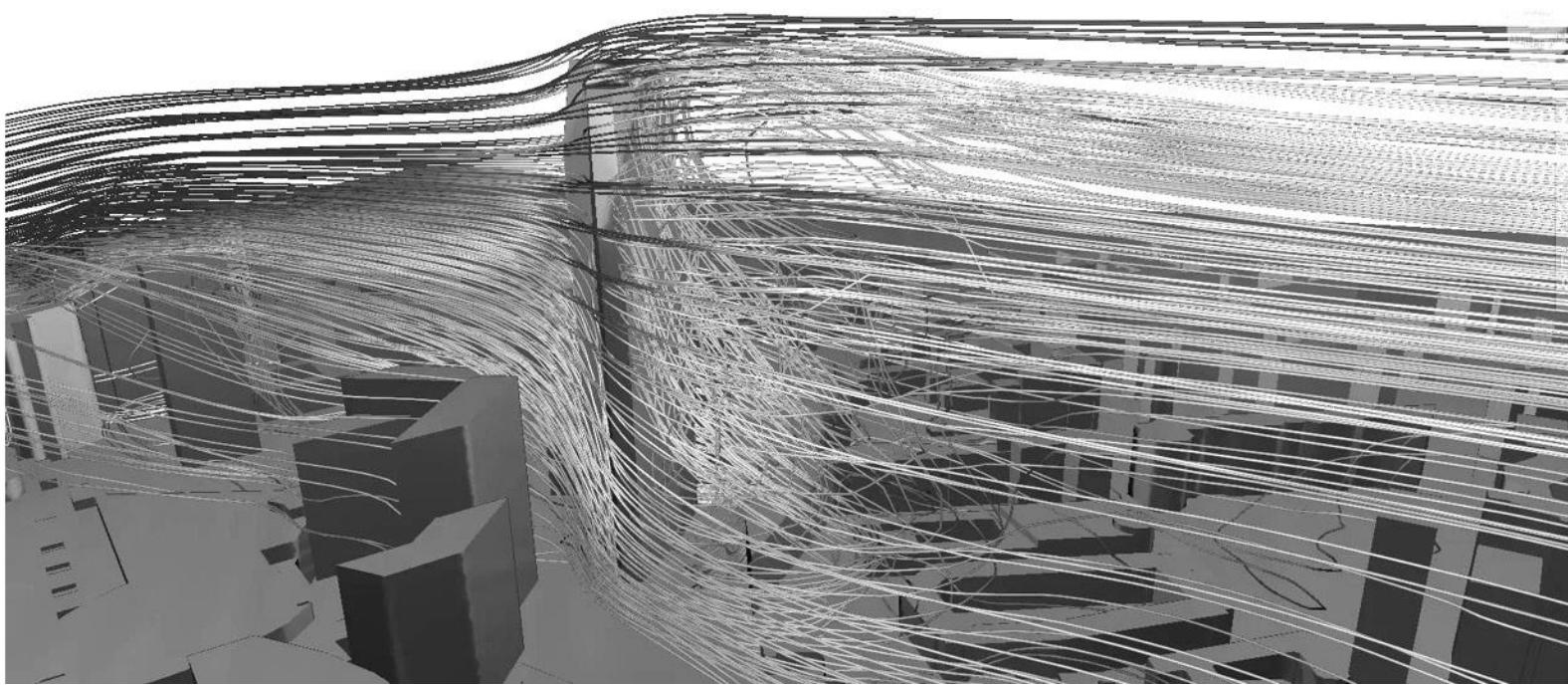
Список использованной литературы

1. Zhong-hua Z., Jia-ling L. Parallel modeling of three-dimensional scramjet combustor and comparisons with experiment's results // China Aerodynamics Research & Development Center. 2002. P. 8.



СЕКЦИЯ 6

Численные методы в теплофизике
и физической гидрогазодинамике



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЙ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Антонов Д.В., Стрижак П.А.

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

e-mail: antonovdv132@gmail.com

Столкновения капель жидкостей с твердыми поверхностями реализуется в ряде технологических приложений [1]: нанесение покрытия распылением, охлаждение распылением, впрыск топлива в двигатели внутреннего сгорания, пожаротушение, струйная печать и др. Изучение данных процессов является актуальным, поскольку столкновения капель жидкостей с твердыми поверхностями приводит к перераспределению размеров и скоростей капель в аэрозольном потоке. В отличие от столкновения капель с твердыми плоскими поверхностями, достаточно слабо изучено взаимодействие капель с частицами. В данном направлении наибольшую известность получили теоретические исследования [2, 3]. Основными подходами к моделированию процессов столкновения капель с твердыми частицами являются метод VOF [2, 3] и решеточный метод Больцмана (LBM) [4, 5]. Научная новизна и практическая значимость результатов настоящей работы состоит в установлении отличий режимов столкновения капель с частицами различной формы и размеров. До сих пор не установлены такие особенности как экспериментально, так и с использованием современных моделей столкновения капель и частиц. Целесообразным представляется выполнение сравнительного анализа карт режимов, а также характеристик вторичных фрагментов (размеров и количества) при взаимодействии капель и частиц различной формы и с разными теплофизическими и реологическими свойствами.

Выполнено математическое моделирование процессов соударения капель воды с твердыми частицами. Моделирование столкновения выполнено с применением метода VOF. Исследовано влияние соотношения размеров частиц и капель на характеристики соударений и режимы взаимодействия. Изучено влияние формы твердых частиц на режимы взаимодействия при соударениях. Результаты представлены в виде карт режимов столкновения. Выделены режимы взаимодействия двух капель (коагуляция, разлет и дробление). Представлены теоретические карты режимов при варьировании ключевых параметров взаимодействия в широких диапазонах: число Вебера 0–200, безразмерный линейный параметр соударений 0–1. Моделирование выполнено при нормальных параметрах внешней газовой среды (воздуха): давлении 101325 Па и температуре 300 К.

Установлено, что при переходе от сферической формы частиц к кубической или ромбической форме существенно изменяются границы карт режимов и количество вторичных фрагментов, образующихся в результате их взаимодействия. Чем больше граней имеет твердая частица, тем выше вероятность возникновения режима дробления, способствующего разрыву тонкой пленки жидкости при обтекании частицы. Сделано обоснованное заключение о том, что

управлять режимами взаимодействия капель и частиц можно не только за счет изменения формы частицы, но и за счет контроля теплофизических и реологических свойств частицы и капли (плотности, вязкости, поверхностного натяжения) перед взаимодействием.

Динамика деформации поверхности капли жидкости при взаимодействии с твердой частицей при разных скоростях движения и соотношениях размеров объектов исследований позволила сделать вывод о том, что в случае группы одновременно соударяющихся капель и частиц могут проявляться интересные коллективные (синергетические) эффекты. В частности, соотношение размеров капли и частицы, форма поверхностей последней и результирующая скорость движения определяют поперечный и продольный размер сложной системы «капля – частица» во время взаимодействия. При наличии аналогичных систем на расстоянии нескольких радиусов относительно друг друга они будут оказывать совместное влияние на их деформацию. Чем больше граней на поверхности частицы, тем более значимым будет коллективное влияние. Данное влияние будет еще более значимым в случае учета деформации поверхности капель жидкости и твердых частиц до соударения, т.е. при движении в газовой среде. Эти условия сложно воспроизвести в модели с учетом всего многообразия факторов и эффектов. Они представляют интерес при дальнейшем проведении экспериментальных исследований с применением следящих программно-аппаратных комплексов.

С использованием разработанной модели можно прогнозировать не только последствия взаимодействия капель и частиц в виде режима и количества вторичных фрагментов, но и в целом характеристики газовой зоны за поверхностью частицы.

Список литературы

1. Malgarinos I, Nikolopoulos N., Gavaises M. A numerical study on droplet-particle collision dynamics// *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2016. V. 61. P. 499–509.
2. Yoon I., Shin S. Direct numerical simulation of droplet collision with stationary spherical particle: A comprehensive map of outcomes// *Int. J. Multiph. Flow*. 2021. V. 135, 103503.
3. Malgarinos I, Nikolopoulos N., Gavaises M. Numerical investigation of heavy fuel droplet-particle collisions in the injection zone of a Fluid Catalytic Cracking reactor, part II: 3D simulations // *Fuel Process. Technol.* 2017. V. 156. P. 317–330.
4. Gac J.M., Gradoń L. Lattice-Boltzmann modeling of collisions between droplets and particles, *Colloids Surfaces A Physicochem/ Eng. Asp.* 2014. V. 441. P. 831–836.
5. Yang B., Chen S. Simulation of interaction between a freely moving solid particle and a freely moving liquid droplet by lattice Boltzmann method// *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. V. 127. 474–484.

Исследования выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект 18-71-10002-П, <https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЛЯХ С УЧЕТОМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВНУТРЕННЕГО ВОДЯНОГО ЯДРА И ОБОЛОЧКИ ТОПЛИВА

Антонов Д.В.¹, Castanet G.², Сажин С.С.³, Стрижак П.А.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

² Université de Lorraine, France

³ University of Brighton, United Kingdom

e-mail: antonovdv132@gmail.com

В настоящее время широко обсуждается важность интенсификации процессов нагрева, испарения и зажигания топливных композиций за счет эффектов частичной фрагментации (паффинг) или полного распада с образованием облака мелких вторичных фрагментов (микровзрыв) [1]. Многочисленные экспериментальные исследования, посвященные явлению микровзрывной фрагментации (например, [2, 3]), постоянно дополняются теоретическими работами разного уровня сложности с использованием прямого численного моделирования (DNS, VOF и т.д.) [4, 5], а также более простых моделей, основанных на аналитических решениях [6]. Упрощенная математическая модель [6], ранее разработанная авторами данной работы, предполагала, что сферическое внутреннее водяное ядро строго расположено по центру относительно оболочки топлива. Такое допущение приводило к рассогласованию результатов теории и эксперимента, особенно для достаточно крупных капель (размерами (радиусами) более 0.5 мм). Результаты экспериментальных исследований [2, 3] показывают, что в реальных условиях существует эксцентриситет внутреннего водяного ядра и оболочки топлива (рис. 1)).

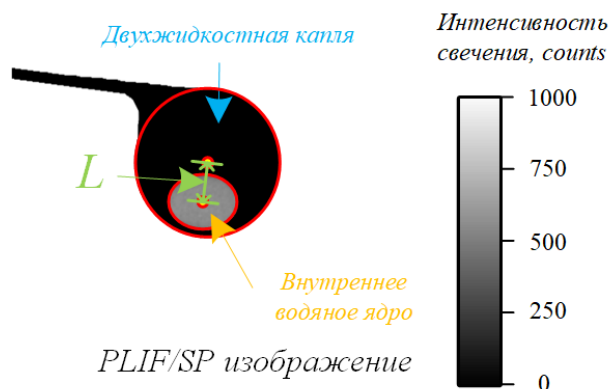


Рис. 1. Типичное изображение двухжидкостной капли, полученное при теневой съемке (SP) и методом PLIF, где L – эксцентриситет внутреннего водяного ядра и оболочки топлива.

Целью настоящей работы являлось численное моделирование теплопереноса в двухжидкостных каплях с учетом эксцентриситета внутреннего водяного ядра и оболочки топлива. Схема области решения разработанной модели представлена на рис. 2. Данная математическая модель позволяет с учетом эксцентриситета внутреннего водяного ядра и оболочки топлива оценивать времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель по достижению температуры

на границе вода/топливо T_w выше температуры начала взрывного вскипания воды.

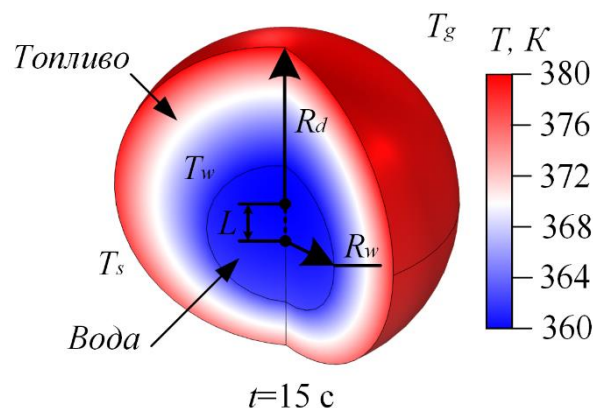


Рис. 2. Схема разработанной модели [7]:

R_d – радиус двухжидкостной капли, R_w – радиус водяного ядра, T_s – температура поверхности капли, T_w – температура на границе вода/топливо, T_g – температура газа.

Список литературы

1. Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3676–3684.
2. Antonov D.V., Volkov R.S., Strizhak P.A. An explosive disintegration of heated fuel droplets with adding water // Chem. Eng. Res. Des. 2018. V. 140. P. 292–307.
3. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // Combust. Flame. 2019. V. 210. P. 479–489.
4. Shinjo J., Xia J., Ganippa L.C., Megaritis A. Physics of puffing and micro-explosion of emulsion fuel droplets // Phys. Fluids. 2014. V. 26. 103302.
5. Shinjo J., Xia J., Megaritis A., Ganippa L.C., Cracknell R.F. Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: A key to predicting micro-explosion and puffing // At. Sprays. 2016. V. 26. P. 551–583.
6. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 161. 120238.
7. Castanet G., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Effects of water subdroplet location on the start of puffing/micro-explosion in composite fuel-water droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 186. 122466.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ 21-71-10008) (Д.В. Антонов), Université de Lorraine (G. Castanet), Национального исследовательского Томского политехнического университета (П.А. Стрижак) и Национального исследовательского Томского политехнического университета (С.С. Сажин)

ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СПЕКАНИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Булатова А.З.^{1,2}, Солнышклина О.А.^{1,2}, Чугунов С.С.³, Киреев В.Н.^{1,2}, Билялов А.Р.²

¹ Башкирский государственный университет, Уфа.

² Башкирский государственный медицинский университет, Уфа.

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва.

e-mail: olgasolnyshkina@gmail.com

Технологии и подходы аддитивного производства нашли широкое применение в различных областях науки и промышленности, особенно в случаях, когда критически важным является изготовление сложных конструкций, мелкосерийное или индивидуальное производство. В последние годы технологии 3Д печати применяются при изготовлении керамических имплантов в медицине [1], поскольку они обладают хорошей биосовместимостью.

Процесс изготовления керамических имплантов состоит из различных стадий: от создания трехмерной модели изделия до спекания, при котором образец, состоящий из уплотненного порошка, нагревается и выдерживается при температуре, близкой к температуре плавления. В результате происходит существенное изменение микроструктуры материала и его уплотнение и, как следствие, существенное изменение объема и формы изделия (см. рис. 1.). Пористость образца уменьшается в среднем на 30–35%. И в этой связи особенно актуальной является задача более точного прогнозирования формы конечного керамического изделия.

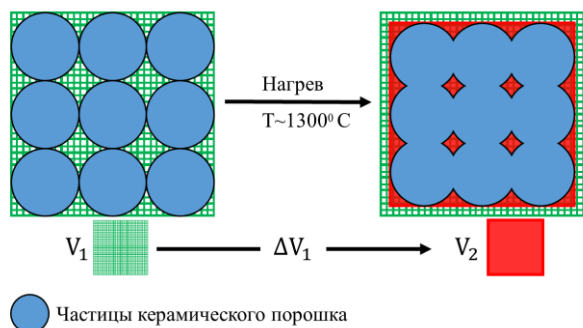


Рис. 1. Схематическое изображение процесса спекания.

В литературе представлены различные подходы к моделированию спекания керамических или металлических порошков в зависимости от масштаба: методы молекулярной динамики для получения фундаментальных характеристик процесса на нано- и микроуровне, методы дискретного элемента и кинетические методы Монте-Карло для моделирования кинетики роста зерна и изменения микроструктуры образца, метод конечных элементов, например, применяемый для расчета деформации и изменения объема изделия на макроуровне.

Одно из наиболее характерных внешних проявлений процесса спекания пористого тела – изменение его линейных размеров (уменьшение). Это дает возможность рассматривать спекание как некоторый макроскопический процесс деформации объема и

формы пористого тела, осуществляющийся путем течения вещества в твердой фазе.

В данной работе предложен новый подход для трехмерного моделирования процесса спекания керамического изделия с применением метода граничных элементов (МГЭ), ускоренного как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPU и графические процессоры). Одним из существенных преимуществ использования МГЭ является то, что нет необходимости покрывать сеткой всю расчетную область, как в случае конечно-разностных и конечно-элементных методов, а только границу моделируемых объектов, что для исследования трехмерных задач имеет большое значение в плане снижения вычислительной сложности, поскольку эффективная размерность задачи уменьшается на единицу. Кроме того, подобный подход к дискретизации рассматриваемой области позволяет точнее описывать границы сложных объектов, а также изменение их формы, и решать задачи для бесконечных областей с минимальными затратами оперативной памяти вычислительной системы и времени вычислений.

Ранее в литературе было представлено применение МГЭ для исследования кинетики слияния двух частиц в 2Д, но идеология применения ускоренного МГЭ для моделирования спекания на макроуровне не была реализована ранее. Основываясь на представлении процесса изменения плотности керамического изделия под действием высоких температур, как медленного течения сильновязкой жидкости, можно описывать вязкое спекание также уравнениями Стокса. В разработанном программном модуле на основе трехмерного МГЭ учитывалось изменение геометрии за счет изменения во времени пористости материала и, соответственно, его плотности с учетом действия силы тяжести и коэффициента поверхностного натяжения материала. Закономерности изменения во времени вязкости и пористости для калибровки модели были получены из экспериментальных данных. Были проведены демонстрационные расчеты.

Список литературы:

1. Chen Z., Li Z., Li J., Liu Ch, Lao Ch, Fu Y, Liu Ch, Li Yang, Wang P, He Y. 3D printing of ceramics: A review // J. European Ceramic Society. 2019. V. 39. p. 661–687.

Исследование выполнено в рамках гранта Республики Башкортостан для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ БОЛЬШОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА УРАВНЕНИЯ КДФ

Гудько А.С.^{1,2}, Гелаш А.А.^{3,4}, Мулладжанов Р.И.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет

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

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва

⁴ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

e-mail: algudko@gmail.com

Уравнение Кортевега–де Фриза (КДФ) является интегрируемым уравнением, которое описывает поведение волн на поверхности неглубокой жидкости. Метод обратной задачи рассеяния представляет собой одно из наиболее ярких достижений математической физики XX века. Он позволяет по известному волновому профилю интегрируемого уравнения в некоторый момент времени определить данные рассеяния (то есть решить прямую задачу рассеяния), которые далее во времени изменяются достаточно тривиальным образом. После чего можно восстановить профиль волны в любой момент времени решая интегральные уравнения обратной задачи рассеяния [1]. Предыдущий теоретический анализ волновых полей с большим числом солитонов на примере нелинейного уравнения Шредингера показал, что алгоритмическая реализация обратной задачи рассеяния сталкивается с необходимостью обработки очень больших и очень малых чисел, тогда как реализация прямой задачи рассеяния обладает так называемыми аномальными численными ошибками. По этой причине, для устойчивой работы численных алгоритмов было предложено применять высокоточную арифметику [2, 3]. Кроме того, было показано, что применение схем высокого порядка сходимости позволяет эффективно бороться с экспоненциальным накоплением ошибок при увеличении числа солитонов [4].

В данной работе рассматриваются новые численные подходы к решению прямой и обратной задач рассеяния уравнения КДФ для нелинейных волновых полей, содержащих большое число солитонов. За основу алгоритмов мы взяли метод Боффета–Осборна для решения прямой задачи рассеяния и метод одевания для решения обратной задачи рассеяния. Мы разработали схемы высокого порядка сходимости [5] и применили высокоточную арифметику. Рис. 1 и рис. 2 демонстрируют устойчивое решение прямой и обратной задачи рассеяния на примере 16-ти солитонного поля КДФ. Мы показываем влияние порядка численной схемы на абсолютную ошибку вычисления собственных чисел λ^{num} и относительную ошибку нормировочных констант ρ^{num} от количества точек дискретизации M . Также мы изучаем влияние порядка численной схемы на численные ошибки в зависимости от количества солитонов, при фиксированном значении дискретизации.

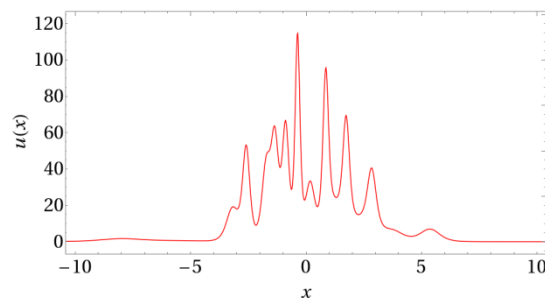


Рис. 1. Пример рассчитанного 16-солитонного поля.

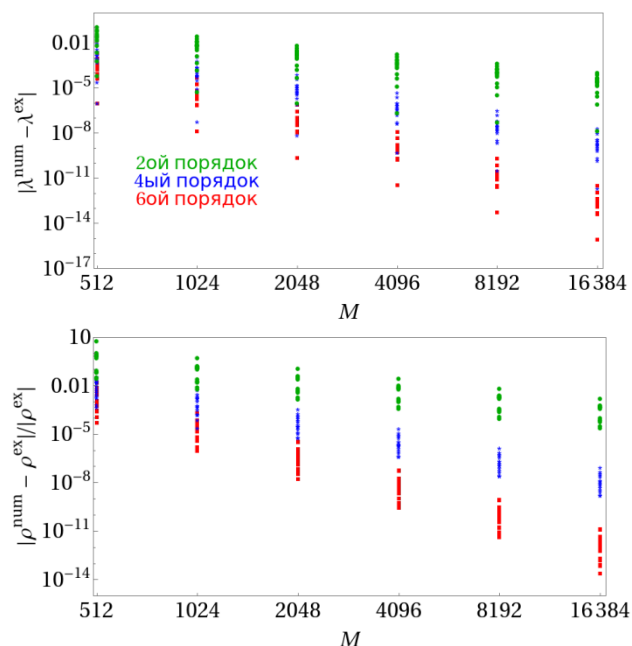


Рис. 2. Влияние порядка схемы и дискретизации на численные ошибки прямой задачи рассеяния 16-солитонного потенциала.

Список литературы

1. Захаров В.Е., Мананов С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов: Метод обратной задачи. Наука, 1980.
2. A.A. Gelash, and D.S. Agafontsev, Strongly interacting soliton gas and formation of rogue waves // Physical Review E. – 2018, – Т. 98, С. 042210.
3. Gelash A., Mullyadzhano R. Anomalous errors of direct scattering transform // Physical Review E. – 2020. – Т. 101. – №. 5. – С. 052206.
4. Mullyadzhano R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // Optics Letters. – 2019. – Т. 44. – №. 21. – С. 5298-5301.
5. Gudko A., Gelash A., Mullyadzhano R. High-order numerical method for scattering data of the Korteweg–De Vries equation // Journal of Physics: Conference Series 1677 (1), 012011, 2020.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛАСТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ОГРАНИЧЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Денисенко В.В., Фортгова С.В.

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

e-mail: ned13@rambler.ru

Целью работы является численное исследование феномена упругой турбулентности в двумерной ограниченной области (квадратной ячейке). Возникновение и развитие турбулентного режима изучается на примере течения Колмогоровского типа. Методами прямого численного моделирования течения вязкоупругой среды при очень малых числах Рейнольдса обнаруживается, что при определенных условиях течение переходит в так называемый упругий турбулентный режим.

Как известно, полимерный раствор обладает необычными реологическими свойствами, связанными с упругими свойствами полимеров [1–3]. Эти свойства проявляются в том случае, когда полимеры оказываются сильно растянутыми. Сильное растяжение происходит как в ламинарных, так и в хаотических потоках. Эффективность растяжения определяется безразмерным числом Вайссенберга Wi , равным отношению

$\frac{S}{\gamma_0}$, где S — характерный градиент скорости, а γ_0 — темп линейной релаксации полимеров.

Сильное растяжение полимеров (coil-stretch transition) происходит при $Wi \sim 1$. При дальнейшем увеличении Wi возможен переход в состояние эластической турбулентности, которое является хаотическим состоянием с сильными флуктуациями потока. Нас будут интересовать характеристики эластической турбулентности.

Полная система гидродинамических уравнений, описывающих течение упругой среды, представляет собой совокупность законов сохранения массы, импульса и энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho G \sin ky + \mu \Delta u + An \frac{\partial}{\partial x} (R^x)^2 + An \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) R^y R^x], \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho G \sin kx + \mu \Delta v + An \frac{\partial}{\partial y} (R^y)^2 + An \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) R^y R^x], \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho V^2 + e) + \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \left(\frac{\rho V^2}{2} + p + e \right) \right) &= \rho G v \sin kx + \rho G u \sin ky + \partial_k \Pi^k, \quad (1) \\ \frac{\partial R^x}{\partial t} + u \frac{\partial R^x}{\partial x} + v \frac{\partial R^x}{\partial y} - R^x \frac{\partial u}{\partial x} - R^y \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma(R) R^x &= 0, \\ \frac{\partial R^y}{\partial t} + u \frac{\partial R^y}{\partial x} + v \frac{\partial R^y}{\partial y} - R^x \frac{\partial v}{\partial x} - R^y \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma(R) R^y &= 0, \\ \mathbf{V} = (u, v)^T, \Pi_c^k &= An \gamma(R) R^k R^i, \Pi^k = \Pi_v^k + \Pi_c^k, \gamma(R) = \frac{\gamma_0}{1 - \frac{R^2}{R_m^2}} \end{aligned}$$

К известным уравнениям Навье–Стокса добавляются члены, описывающие процесс влияния полимерного раствора на поток. Также в систему уравнений добавляются уравнения, описывающие эволюцию состояния полимерного раствора. Состояние раствора описывается вектором растяжения полимерных молекул $\vec{R} = (R^x, R^y)$. В уравнениях эволюции вектора \vec{R} присутствует т.н. коэффициент релаксации полимерных молекул $\gamma(R)$, в выражение для которого входит член, обозначенный как R_m — величина максимального растяжения полимеров. Система (1) замыкается уравнением состояния идеальной среды $p = (\gamma - 1)\rho e$, $\gamma = 7/5$.

Система (1) решалась гибридным методом — ее гидродинамическая часть аппроксимировалась простейшей линеаризацией Годунова [4], а система, описывающая эволюцию поля вектора растяжений полимерных молекул — конечно-разностным методом. Для повышения устойчивости численной методики в правую часть системы уравнений эволюции поля растяжений полимеров \vec{R} был добавлен диффузионный член $C_d \Delta R^i$.

В работе численно исследовано влияние концентрации полимерных молекул An на характеристики течения. Как и следовало ожидать, увеличение An приводит к тому, что течение становится более неустойчивым. Также исследовано влияние одного из важных параметров задачи — числа Wi на устойчивость течения и формирования турбулентного режима течения.

Список литературы

1. S. Berti, A. Bistagnino, G. Boffetta, A. Celani and S. Musacchio. Small scale statistics of viscoelastic turbulence. // *Europhysics Letters*, 76(1), 2006.
2. S. Berti, A. Bistagnino, G. Boffetta, A. Celani, and S. Musacchio. Two-dimensional elastic turbulence. // *Phys. Rev. E*, 77, 055306(R), 2008.
3. S. Berti and G. Boffetta. Elastic waves and transition to elastic turbulence in a two-dimensional viscoelastic Kolmogorov flow. // *Phys. Rev. E*, 82, 036314, 2010.
4. Godunov, S. and Denisenko, V. and Klyuchinskiy, Dmitriy and Fortova, S. and Shepelev, Vadim. (2020). Study of Entropy Properties of a Linearized Version of Godunov's Method. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 60. 628–640. 10.1134/S0965542520040089.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ДВУМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Долуденко А.Н.¹, Фортова С.В.²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

e-mail: sfortova@mail.ru

Основной особенностью двумерного турбулентного течения, постоянно возбуждаемого внешней силой, является возникновение обратного энергетического каскада [1, 2]. За счет нелинейных эффектов пространственный масштаб вихрей, создаваемых внешней силой, увеличивается до тех пор, пока рост не будет остановлен размером ячейки. В последнем случае энергия накапливается на этих масштабах. При определенных условиях накопление приводит к возникновению системы когерентных вихрей. Наблюдаемые вихри имеют размер сравнимый с размером ячейки [3].

Проведение физического эксперимента возможно только в ограниченном замкнутом объеме – экспериментальной ячейке, ограниченной стенками [4]. Для качественного сравнения расчетов с экспериментом при численном моделировании необходимо использовать условия прилипания к стенкам, так как в эксперименте рассматривается вязкая жидкость. Кроме того, в физическом эксперименте присутствует трение, вызванное наличием дна ячейки. В численном эксперименте, представленном в данной работе, наличие трения о дно учтено путем добавления дополнительного члена в систему гидродинамических уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho G \sin ky + \mu \Delta u - \zeta u,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho G \sin kx + \mu \Delta v - \zeta v.$$

Здесь $\mathbf{V} = (u, v)^T$ – вектор скорости, ρ – плотность жидкости, k – пространственная частота внешней силы, μ – динамическая вязкость жидкости, ζ – коэффициент трения о дно. В качестве граничных условий используются условия прилипания.

В данной работе исследование проводилось путем прямого численного моделирования системы уравнений Навье-Стокса численным методом Мак-Кормака с использованием модели слабосжимаемой жидкости. Течение рассматривалось в двумерной квадратной ячейке с граничными условиями прилипания. Развитие течения происходило благодаря наличию постоянно действующей силы, периодической по направлениям Ox и Oy .

В работе проведен анализ влияния величины внешней силы и коэффициента трения о дно на картину течения и ее характеристики. Показано, что увеличение значения внешней силы турбулизует поток. Тогда как увеличение трения о дно приводит к стабилизации течения и формированию ламинарного режима. Таким образом, наблюдаются различные ви-

ды течения в зависимости от величины внешней силы и коэффициентов трения о дно.

Это позволило построить диаграмму течений в пространстве «внешняя сила – трение о дно» на основе обобщения полученных результатов (см. рис. 1).

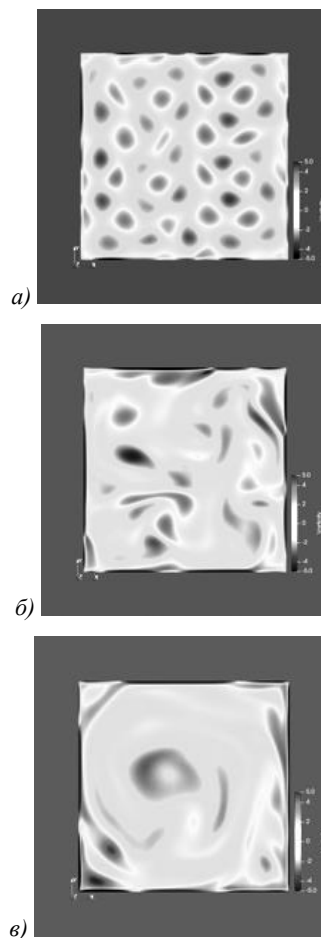


Рис. 1. Завихренность в различного типа течениях: ламинарное (а), хаотическое (б), когерентный вихрь (в).

Список литературы

1. Kraichnan R.H. Inertial Ranges in Two-Dimensional Turbulence // Phys. Fluids. 1967. Vol. 10. P. 1417.
2. Batchelor G.K. Computation of the Energy Spectrum in Homogeneous Two-Dimensional Turbulence // Phys. Fluids. 1969. Vol. 12, № Suppl. II. P. 233.
3. Doludenko A.N., Fortova S.V., Kolokolov I.V., Lebedev V.V. Coherent vortex in a spatially restricted two-dimensional turbulent flow in absence of bottom friction // Physics of Fluids. V. 33(1), 2021. P. 011704.
4. J. Sommeria. Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box // Journal of Fluid Mechanics – 1986. V. 170. pp. 139–168.

ЭФФЕКТИВНЫЙ МНОГОСЕТОЧНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА ДЛЯ ЗАДАЧ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ВИБРАЦИЯМИ

Иванов К.А.¹, Золотарев А.А.¹, Федюшкин А.И.², Пунтус А.А.³

¹ АО «НПП «Пульсар»

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,

³Московский авиационный институт

e-mails: kirill7785@mail.ru, fai@ipmnet.ru, artpuntus@yandex.ru

В данной работе проведено решение задачи о вибрационной конвекции в прямоугольной области (рис.1), заполненной неравномерно нагретой жидкостью, находящейся в высокочастотном вибрационном поле.

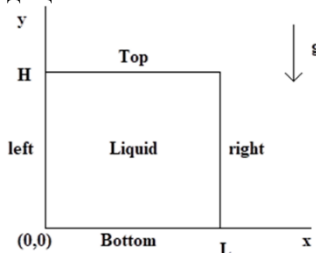


Рис 1. Геометрия расчётной области и система координат.

В случае высокочастотных вибраций задача описывается системой уравнений вибрационной конвекции Симоненко-Зеньковской [1]. В данной работе эти уравнения решались методом контрольных объёмов [2] для двумерного случая в переменных «вихрь - функция тока - температура». Предполагалось, что вибрации направлены вдоль оси Oy, гармонические, поступательные, с малой амплитудой a и удовлетворяют следующему закону: $y = -a \cdot \sin(\Omega \cdot t)$, где $\Omega = 2\pi f$ и вибрационное ускорение равно $g_{vibr} = \ddot{y} = a \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega \cdot t)$, где f – частота колебаний (30–100 Гц), a – амплитуда вибраций (м) (100–200мкм).

При численном решении системы уравнений Симоненко-Зеньковской в переменных «вихрь-функция тока» исключается из расчёта давление, но приходится решать два уравнения Пуассона, поэтому минимизация времени решения уравнения Пуассона является необходимостью для сокращения общего времени решения задачи. В данной работе было сравнено время решения уравнения Пуассона различными методами. На рис.2 показана сходимость решения уравнения Пуассона от числа итераций для рассмотренных методов.

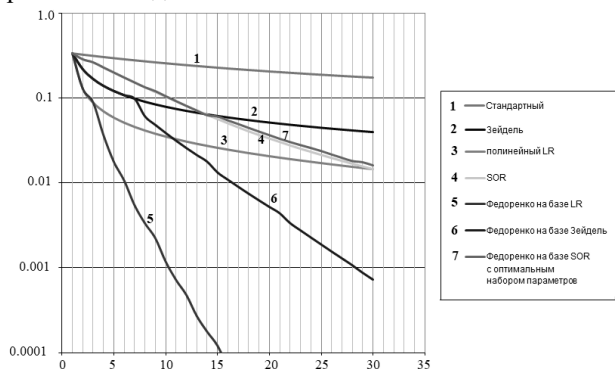


Рис. 2. Сходимости различных реализованных итерационных методов решения уравнения Пуассона.

В результате проведенного исследования выбрана наилучшая по быстродействию, среди рассмотренных,

связка алгоритмов: для вихря одна итерация метода установления с использованием продольно поперечной прогонки (LR), для многократно решаемых эллиптических уравнений использовался модифицированный многосеточный метод Р.П. Федоренко [3] и метод динамического программирования Р. Беллмана [4], приводящий к прямой и обратной прогонке (серия матриц вычисляется однократно и запоминается) [4], для температуры – алгебраический многосеточный метод amglr5 Д. Руге и К. Штубена [5]. Данные методы решения реализованы в программном коде, написанном на языке C/C++. Верификация программного кода проведена на решении трёх задач: тестовая задача о конвекции в квадратной области, подогреваемой сбоку [6, 7], упрощенной модели роста кристаллов из расплава по Чохральскому и задача Рэлея-Бенара. На рис. 3 представлены результаты решения первой тестовой задачи [6, 7] в виде изотерм (слева) и изолиний функции тока (справа) при вибрационной конвекции в невесомости ($f=50$ Гц, $a=200$ мкм, $\varepsilon = 0.5 \cdot a \cdot \Omega^2 = 1.97 \cdot 10^{-3}$; число Прандтля $Pr=0.0824$; вибрационное число Рэлея $Ra_{vibr} = Pr \cdot g_{vibr} \beta_T (T_2 - T_1) H^3 / \nu = 10^7$; $H=L=3.0$ см, $g_{vibr}=19.7$).

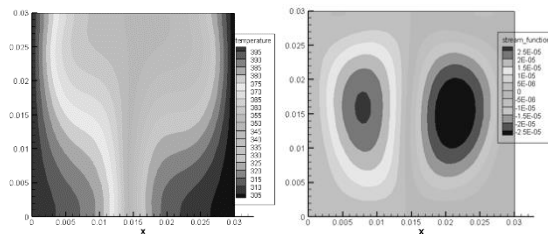


Рис. 3. Изотермы (слева) и изолинии функции тока (справа) при вибрационной конвекции в невесомости ($f=50$ Гц, $a=200$ мкм, $\varepsilon=1.97 \cdot 10^{-3}$; $Pr=0.0824$; $Ra_{vibr}=10^7$; $H=L=3.0$ см, $g_{vibr}=19.7$ /)

Список литературы

1. Зеньковская С. М., Симоненко И. Б. О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции // Изв. АН СССР, МЖГ. 1966, N5, с. 51–55.
2. Патанкар С. Численные моды решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. Энергоатомиздат, 1984.
3. Федоренко Р. П. Релаксационный метод решения разностных эллиптических уравнений, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, том 1, номер 5, с. 922–927.
4. Р. Беллман и Э. Энджел. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М. Мир, 1974.
5. К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов и др. Методы ускорения газодинамических расчётов на неструктурированных сетках. М. Физматлит, 2014.
6. Davis de Vahl G., Jones I. P. Natural convection in square cavity: A comparison exercise // Intern. J. Numer. Meth. Fluids. 1983. V. 3. P. 227.
7. Федюшкин А.И. Исследование матричного метода решения уравнений конвекции. Комплекс программ «МАРЕНА». Препринт №471 ИПМ. М. 1990 г.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ 3D ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА

Кусюмов А.Н., Кусюмов С.А., Михайлов С.А., Романова Е.В.

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

e-mail: postbox7@mail.ru

Согласно литературным данным численное (CFD) и физическое (эксперимент) моделирование обтекания цилиндра при низких значениях числа Рейнольдса (порядка нескольких тысяч) представляет интерес при проведении исследований различного характера. В частности, для низких чисел Рейнольдса возможно проведение прямого численного моделирования обтекания цилиндра на основе решения уравнений Навье-Стокса. Это позволяет анализировать физические особенности в следе за поверхностью цилиндра в условиях перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения.

Одной из причин проведения исследований характеристик обтекания цилиндра в диапазоне низких значения числа Рейнольдса является спектральный анализ характеристик течения в следе за цилиндром. В данном случае можно воспроизвести энергонесущий и инерционный интервалы спектра.

В то же время известно, что на характеристики течения в следе за цилиндром значительное влияние оказывают условия численного или физического моделирования. В частности, при физическом моделировании на характеристики течения влияют различные факторы, включая начальный уровень турбулентности потока, вибрации в эксперименте, удлинение цилиндра и др. [1]. Результаты численного моделирования зависят от размеров области моделирования, топологии и размеров расчетной сетки, постановки граничных условий.

Рассматривается задача численного моделирования нестационарного пространственного обтекания цилиндра для числа Рейнольдса $Re = 3900$ на основе решения уравнений Навье-Стокса. Следует отметить, что для этого классического режима моделирования характерна вся сложность топологии потока за счет наличия потенциально неустойчивой области, где возникает турбулентность.

Численное моделирование проводится в пакете ANSYS Fluent для задачи с периодическими граничными условиями при воспроизведении условий обтекания цилиндрического стержня в составе решетки. Расчетная область в системе координат $OXYZ$ представляла собой прямоугольник с размерами $Nd \times 5d \times \pi d$, где d – диаметр цилиндра. Рассматривались два варианта продольного размера расчетной области: $N = 20$ и $N = 50$. Поперечный размер вдоль оси OZ был выбран аналогично [1].

Гекса-сетки для обеих задач построены в сеточном генераторе ANSYS ICEM. Расчетная сетка для $N = 20$ содержала около $17 \cdot 10^6$ и около $30 \cdot 10^6$ элементов для $N = 50$. Для разрешения пограничного слоя расчетная сетка сгущалась около поверхности цилиндра. Размер первой ячейки составлял около 10^{-3} от диаметра цилиндра, что обеспечивает необходи-

мое u^+ . Временной шаг интегрирования составлял $0.0565 d/V_\infty$, где V_∞ – скорость набегающего потока.

Для поперечной компоненты скорости u_y с использованием преобразования Фурье (FFT) определяются спектральная плотность мощности (PSD) и спектральная плотность энергии (ESD) [2]:

$$ESD = |\hat{u}_y^2(f)|, \text{ где } \hat{u}_y(f) = \int_{-T/2}^{T/2} u_y(t) e^{-2\pi i t f} dt.$$

С использованием FFT преобразования определяется также спектр энергии сигнала:

$$ESS = |\hat{U}_y(f)|, \text{ где } \hat{U}_y(f) = \int_{-T/2}^{T/2} u_y^2(t) e^{-2\pi i t f} dt.$$

На рис. 1 в логарифмическом масштабе представлены энергетические спектры поперечной скорости в следе за цилиндром на дистанции $5d$ для конфигурации $N = 50$. Частота сигнала представлена в относительных единицах с нормировкой к частоте дорожки Кармана f_K .

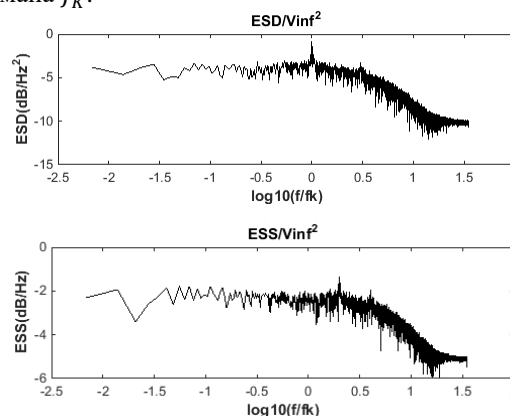


Рис. 1. Нормированные энергетические спектры поперечной скорости для сетки $30 \cdot 10^6$ элементов: ESD/V_∞^2 (сверху), ESS/V_∞^2 (снизу)

Из рисунка следует, что обе спектральные характеристики позволяют произвести оценку флуктуаций поперечной скорости в диапазоне частот до 5 кГц (шаг интегрирования 0.0001 сек). В сравнении с оценкой ESD наклон (градиент) спектральной характеристики ESS несколько меньше, что более соответствует колмогоровской оценке спектра в инерциальном диапазоне.

В работе оцениваются спектральные характеристики компоненты скорости u_y для сеток $N = 20$ и $N = 50$ в различных точках вниз по потоку.

Список литературы

1. Kravchenko A.G., Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D = 3900$ //Phys Fluids. 2000. V. 12, N 2. P. 403–417.
2. Lathi B. P., Zhi Ding. Modern digital and analog communication systems. Oxford university press, 2019. 993 p.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 20-19-00548)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПЕЧИ ТГА

Масленников Г.Е., Симанов Н.А., Никитина Г.И., Никитин А.Д., Осипов П.В., Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург
e-mail: g26m12@gmail.com

В паровой печи прибора термогравиметрического анализа (ТГА) NETZSCH STA 449 F3 основная термопара расположена под тарелкой держателя образца (см. рис. 1). При этом разность действительной температуры образца и измеряемой термопарой может достигать от 3-5 градусов для инертной навески до 40 градусов для реакционной. Кроме того, в результате реакций выделяются или поглощаются вещества, поэтому концентрации газов вокруг навески отличаются от измеряемых на выходе из печи. Для тонкой обработки результатов экспериментов необходимо учитывать данные особенности.

Целью данной работы является численное моделирование тепломассообмена в паровой печи ТГА в стационарном и нестационарном режимах.

Данный расчет позволяет установить скорости потока и концентрации газообразных компонентов вокруг навески при протекании реакций и варьировании состава подаваемого газа, а также оценивать разности температур на поверхности навески и под тарелкой держателя в месте расположения термопары.

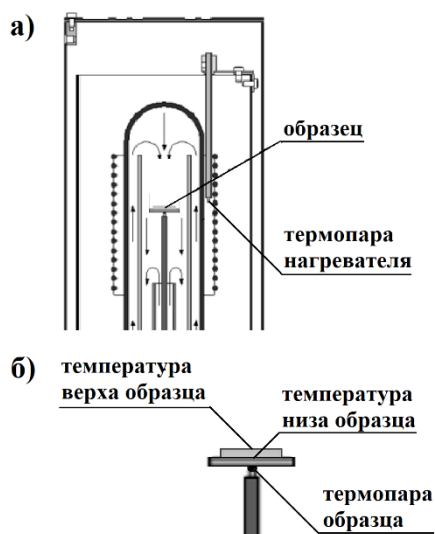


Рис. 1. Схема паровой печи ТГА (а) и расположение исследуемых температур (б).

Модель выполняется в двумерной осесимметричной постановке. Рассматриваются три варианта образца: инертный, реагирующий плотный слой, реагирующий пористый слой. Газовая среда является окислительной.

Валидация и верификация модели производится по темпу изменения концентраций газов на выходе из аппарата ТГА при варьировании сустава дутья, а также по результатам аналитического расчета перегрева навески в результате химических реакций [1].

Результаты CFD-моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными. Наблюдается совпадение изменения расчетной и экспериментальной концентрации углекислого газа на выходе из печи термогравиметрического анализа.

Список литературы

1. Худякова Г.И., Амарская И.Б., Белоусов В.С. Влияние высоты навески топливных частиц при термогравиметрическом исследовании конверсии угля // Сб. материалов докл. IX меж-дунар. семинара вузов по теплофизике и энергетике: в 4 т. Казань, 2015. Т. 1. С. 122–131.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЗАТУХАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЯХ КРИСТАЛЛА АЛЮМИНИЯ

Перов Е.А.¹, Долуденко А.Н.¹, Жаховский В.В.^{2,3}, Шепелев В.В.⁴

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Москва, Красноказарменная, 17А

²Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН,
142432, Черноголовка, проспект Академика Семенова, 1А

³Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова, Росатом,
127030, Москва, Сущевская ул., 16, стр 11А

⁴Институт автоматизации проектирования РАН,
123056, Москва, ул. 2-я Брестская, 19/18

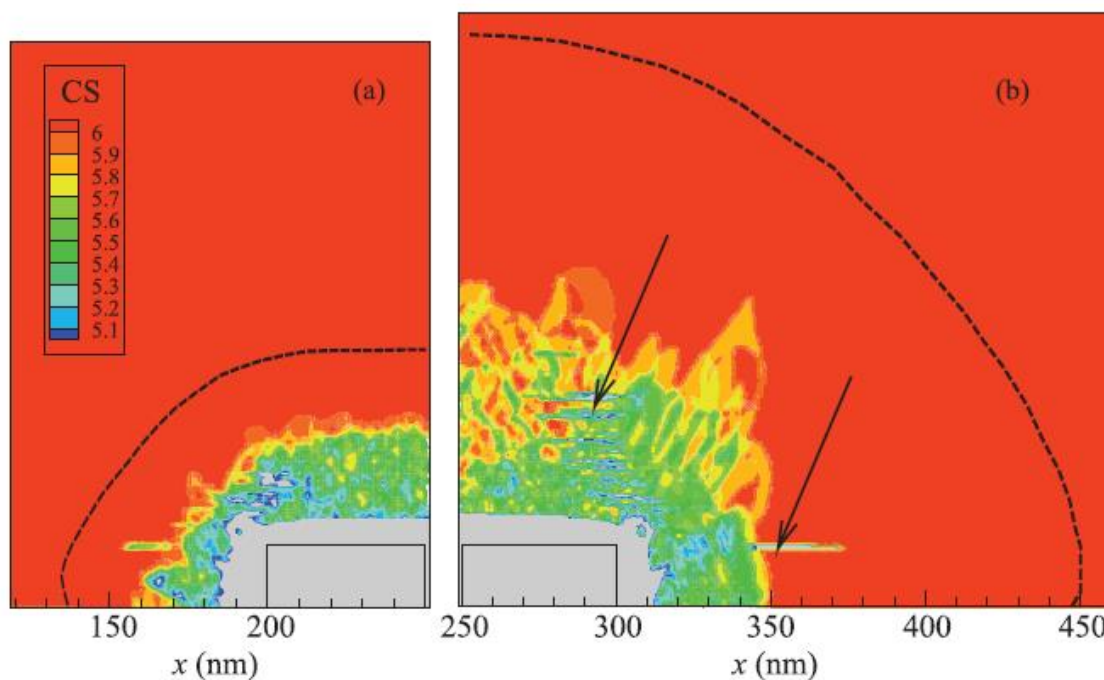


Рис. 1. Карты параметра центральной симметрии в различные моменты времени (a) = 7.2 пс, (b) = 19.2 пс. Выше последнего красного контура считается, что кристалл не поврежден и дислокации отсутствуют.

Лазерное воздействие, обладающее высокой энергией, вызывает необратимые изменения кристаллической структуры материала. Эти изменения составляют основу лазерного термоупрочнения или лазерного пининга. Лазерное термоупрочнение прекращается в момент, когда лазерная волна затухает. В работе исследуется прохождение ударной волны в мишени при различных температурах и конфигурациях кристаллической решетки мишени, а так же переход волны из упругопластической в упругую при помощи метода молекулярной динамики.

В случае ультракороткого лазерного воздействия в очаге воздействия, который определяется диаметром освещаемого пятна на поверхности и толщиной слоя прогрева. В этом самом пятне создается высокое давление. Акустическое возмущение (или же ударная волна, УВ) передает отдачу от сверхбыстрого нагрева вглубь мишени. Если удар-

ная волна достаточно сильная, то она упрочняет приповерхностный слой [1–3].

На рис. 1 представлена пространственная картина дислокаций, которая возникает вокруг прямоугольника нагрева. Стрелками обозначены плоскости скольжения, верхней стрелкой отмечен набор плоскостей скольжения. Скольжение происходит вдоль плоскостей плотной упаковки, оно начинается в боковых течениях, в центральной области таких плоскостей не наблюдается.

Список литературы

1. Y.R. Kolobov, E.V. Golosov, T.N. Vershinina, M.V. Zhidkov, A.A. Ionin, S. I. Kudryashov, S.V. Makarov, S.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, and E.A. Ligachev, *Appl. Phys. A* 119, 241 (2015).
2. C. Correa, D. Peral, J.A. Porro, M. D'iaz, L. Ruiz de Lara, A. Garcia-Beltr'an, and J. L. Oca'ia, *Optics and Laser Technology* 73, 179 (2015).
3. T. Kawashima, T. Sano, A. Hirose, S. Tsutsumi, K. Masaki, K. Arakawa, and H. Hori, *Journal of Materials Processing Technology* 262, 111 (2018).

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЗАРОЖДЕНИЯ И СВОЙСТВ КАВИТАЦИОННЫХ ПОЛОСТЕЙ В РАСТЯНУТОЙ ЖИДКОСТИ

Проценко К.Р., Байдаков В.Г.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: protsenko.kseniya@gmail.com

В рамках метода выборки прямого потока (ВПП) [1] при молекулярно-динамическом (МД) моделировании исследована кинетика кавитации в растянутой жидкости. МД ячейка имела форму куба с периодическими граничными условиями по трем пространственным направлениям и содержала от 5 000 до 300 000 леннард-джонсовских (ЛД) частиц. Параметры потенциала ЛД использовались для приведения рассчитываемых величин к безразмерному виду. Расчеты проведены на пяти изотермах при температурах как ниже, так и выше температуры тройной точки (рис. 1).

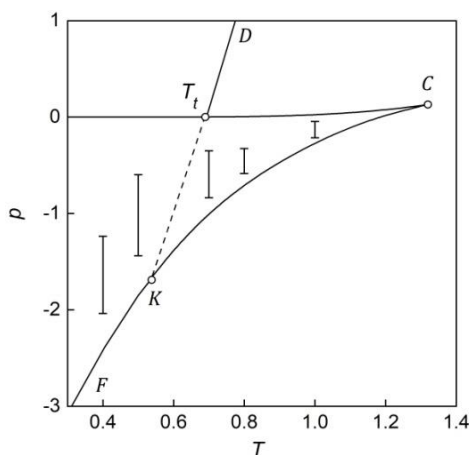


Рис 1. Фазовая диаграмма ЛД системы. С – критическая точка, T_t – тройная точка, К – конечная точка линии плавления, CF – спинопаль растянутой жидкости, DT_t и DT_t – линии насыщения и плавления. Отрезками показаны исследованные в работе состояния.

Рассчитаны частота зародышеобразования ($J=10^{21}-10^{31} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$), коэффициент диффузии зародышей, исследована форма спонтанно возникающих кавитационных полостей. Результаты моделирования сопоставлены с расчетами по классической теории зародышеобразования (КТЗ).

Установлено, что во всем исследованном интервале температур частоты зародышеобразования, достигнутые при МД моделировании, систематически ниже их теоретических значений. Величина коэффициента диффузии зародышей по оси размеров хорошо описываются формулой Зельдовича. Форма критических кавитационных полостей с понижением степени метастабильности приближается к сферической.

Методом внедрения зародыша новой фазы (ВЗНФ) [2] определены радиусы критических кавитационных полостей R . Значения R лежат в диапазоне 2–11, что в размерных единицах составляет (0.7–3.8) нм (аргон). По данным о радиусах критических зародышей из уравнения Лапласа рассчитана их поверхностная свободная энергия γ (рис. 2). Величина γ

определена также из КТЗ по данным о J методом ВПП и среднего времени жизни [3]. Установлено, что γ линейная функция кривизны межфазной границы. Таким образом показано, что формула Толмена [4]:

$$\gamma = \gamma_\infty (1 - 2\delta/R), \quad (1)$$

где γ_∞ – поверхностная свободная энергия плоской межфазной границы жидкость-пар, δ – параметр Толмена, может быть использована при очень высоких растяжениях, отвечающих частотам зародышеобразования $J=10^{35} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$. Параметр δ положителен и в исследованном интервале температур изменяется в интервале 0.22–0.26.

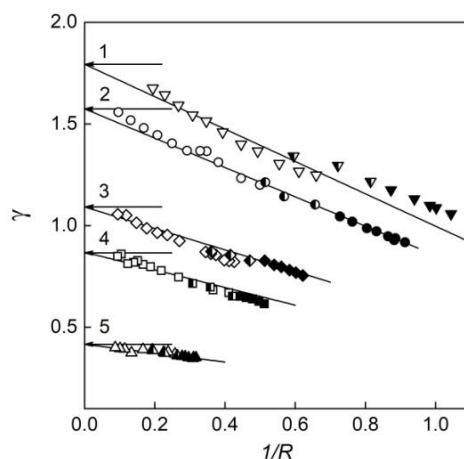


Рис 2. Поверхностная свободная энергия критических кавитационных полостей: (1) $T=0.40$, (2) 0.50 , (3) 0.70 , (4) 0.80 , (5) 1.00 . Темные точки – метод среднего времени жизни [3], черно-белые – ВПП, открытые – ВЗНФ. Сплошные линии – аппроксимация МД данных, стрелками показано значение поверхностной свободной энергии плоской межфазной границы жидкость-пар [5].

Список литературы

- Allen R.J., Valeriani C., ten Wolde P.R. Forward flux sampling for rare event simulation // J. Phys.: Condens. Matter. 21, 463102 (2009).
- Espinosa J.R., Vega C., Valeriani C., Sanz E. Seeding approach to crystal nucleation // J. Chem. Phys. 144, 034501 (2016).
- Baidakov V.G., Bobrov K.S. Spontaneous cavitation in a Lennard-Jones liquid at negative pressures // J. Chem. Phys. 140, 184506 (2014).
- Tolman R.S. The effect of droplet size on surface tension // J. Chem. Phys. 17, 333 (1949).
- Baidakov V.G. et al. Metastable extension of the liquid-vapor phase equilibrium curve and surface tension // J. Chem. Phys. 126, 214505 (2007).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-19-00276-П. При проведении работ был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН»

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ. ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ И НОВЫЕ ПОДХОДЫ

Рудяк В.Я.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

e-mail: valery.rudyak@mail.ru

Вплоть до конца XIX столетия эксперимент фактически являлся единственным инструментарием изучения физических систем и происходящих в них процессов. Физика поэтому и рассматривалась как экспериментальная наука, несмотря на уже в том же столетии появившиеся блестящие теории оптики, электродинамики и термодинамики. Теория состоялась как полноценная составляющая физики лишь в следующем столетии, благодаря появлению в первую очередь теории относительности, а затем и квантовой механики. Первая развивалась в парадигме классической физики, строя макроскопическое описание исследуемой системы. Особенность ее состояла в том, что радикально менялись наши физические представления. Трансформировался принцип относительности Галилея, появился принцип эквивалентности Эйнштейна, совсем иным содержанием наполнились понятия пространства и времени. Квантовая же механика строила описание эволюции систем на микроуровне, в общем случае существенно меньше молекулярного. Образовался некоторый методологический разрыв, не преодоленный до сих пор. Отсутствовало промежуточное систематическое описание на молекулярном уровне. Построение из первых принципов теорий газов и конденсированных сред очень активно велось на протяжении всего минувшего столетия. Тем не менее следует признать, что в целом эти попытки закончились неудачей. В газах фактически не удалось пройти существенно дальше теории Больцмана, несколько более продвинутой оказалась молекулярная теория твердого тела. Для жидкости же фактически вообще не удалось построить сколько-нибудь удовлетворительную теорию.

В то же время все существующие теории, описывающие макроскопические явления и процессы, всегда содержат некоторые вводимые и не определяемые в ее рамках параметры: уравнения состояния, коэффициенты переноса и т.п. Подобные величины принципиально имеют молекулярную природу и могут быть получены лишь на соответствующем уровне описания. Поскольку создание соответствующих теорий в силу разных причин успеха не принесли, то необходим был альтернативный подход. И такой подход появился в середине прошлого столетия с созданием метода молекулярной динамики (МД). Сегодня вокруг этого метода сформировалось новое направление исследований, которое получило название вычислительная физика (computational physics). Метод молекулярной динамики и различные его варианты успешно используются в физике, механике, биологии, химии. Тем не менее здесь имеет место ряд проблем, в том числе и принципиально характера.

В связи с этим возникает вопрос о перспективах развития этого направления, и о возможных вариантах альтернативного прямого численного молекулярного моделирования сложных систем и процессов, требующих именно молекулярного изучения. Целью данной работы является обзор всех существующих и используемых сегодня методов прямого молекулярного моделирования. В частности, рассмотрены:

- Метод МД и неравновесный метод МД;
- Метод броуновской динамики;
- Метод Монте-Карло;
- Метод прямого статистического моделирования (ПСМ) Монте-Карло;
- Метод стохастического молекулярного моделирования (СММ).

Во всех случаях систематически обсуждаются основные особенности этих методов и точность моделирования. В частности, показано, что в силу наличия динамического хаоса метод МД не позволяет точно моделировать фазовые траектории системы, задаваемые решением соответствующих уравнений Ньютона. Использование при этом различного типа термостатов еще больше делает получаемые решения необратимыми. Представлены многочисленные примеры решения оригинальных задач, в частности, моделирование коэффициентов переноса наножидкостей, течений в наноканалах.

При обсуждении метода неравновесной молекулярной динамики рассматриваются не только различные применяемые здесь методики, но и анализируется важная проблема изменения реологии обычных жидкостей и наножидкостей с увеличением скорости сдвига. Показано, что изменение реологии обусловлено трансформацией в поле сдвига структуры жидкости.

Анализируется связь метода ПСМ с решением основного кинетического уравнения разреженного газа. Устанавливаются и подробно исследуются условия связи решения ПСМ с соответствующими решениями уравнения Больцмана.

Значительное место уделено создаваемому методу СММ. Показано, что он с успехом применяется для моделирования коэффициентов переноса разреженного газа. Большое внимание уделено варианту этого метода для моделирования коэффициентов переноса жидкостей и плотных газов. Этот последний фактически является палеотивом методов МД и СММ.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-01-00041, мегагрантом Минстерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашений № 075-15-2021-575) и грантом РНФ № 20-19-00043

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СОУДАРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ НА ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Рыбакин Б.П.^{1,2}

¹ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: rybakin@vip.niisi.ru

В работе представлены результаты компьютерного моделирования высокоскоростного соударения газовых потоков, которые возникают при столкновении вращающихся молекулярных облаков (МО) в межзвездной среде. Высокоскоростные столкновения МО являются практически единственным сценарием образования новых звездных систем. При взаимном проникновении газовых потоков образуются области сильно сжатого газа (clumps). Плотность межзвездного газа характеризуется плотностями порядка 10^{-25} г/см³. В результате ударного сжатия плотность повышается на несколько порядков и достигает величин $\sim 10^{-19}$. Такие области образуют гравитационно связанные сгустки, в которых, при отсутствии внешних воздействий, могут возникать новые звездные системы.

Для моделирования астрофизических процессов в работе используется параллельный алгоритм типа TVD, на основе которого отлажена собственная программа, которая работает на сетках большого разрешения порядка 4096^3 . Проведение расчетов динамики соударения МО на сетках сверхвысокого разрешения требует огромных вычислительных ресурсов. Программа использует гетерогенное распараллеливание на CPU и GPU. На графических процессорах используется технология OpenACC, на процессорах Intel Xeon технология Coarray, что позволило существенно сократить время выполнения программы. Кроме того, расчет газодинамических процессов осуществляется на CPU и параллельно проводится вычисления гравитационного потенциала на GPU.

Эффект вращения МО начали учитывать сравнительно недавно [1]. Для моделирования соударения в данной работе используется система уравнений Эйлера, которая описывает законы сохранения плотности, количества движения и энергии. Система определяющих уравнений замыкается адиабатическим уравнением состояния. Моделируются варианты соударения как без вращения, так и с вращением. Оси вращения совпадают с линией соударения [2, 3]. Скорость каждого МО варьируется от 5.32 до 11.77 км/сек. Угловая скорость вращения каждого МО составляет $\Omega = 2.5969 \times 10^{-15}$ 1/сек. Физически расчетная область представляет собой куб $40 \times 40 \times 40$ парсек. Масса внутри облака распределена по радиусу по законам E. Johansson & U. Ziegler и J.V. Pittard. Масса первого МО равна $10.85 M_{\odot}$, радиус 3.36 парсек, масса второго $10.54 M_{\odot}$, радиус 3.44 парсека.

После взаимного проникновения одного облака в другое, с разрывом внешней оболочки, плотность газа в сгустках достигает максимальных значений. Контраст плотности в зоне соударения на много порядков превышает начальные значения. В конце этой стадии начинается формирование, сильно сжатого ударного слоя с сильно деформированной поверхно-

стью. Процесс сопровождается ростом clumps и образованием филамент. Плотность в этих сверхплотных областях (clumps) повышается до значений, которые принято считать предзвездными [1] – 10^{-19} – 10^{-20} г/см³. В программе предусмотрено выделение таких областей в отдельные кластеры и проверка, являются ли они гравитационно-связанными областями. Вычисляются масса, энергия и поле скоростей такого сгустка. Проверяется критерий устойчивости Jeans и теорема вириала. При отсутствии достаточно сильных внешних воздействий, эти данные позволяют определить, смогут ли силы гравитации сжать этот объект и превратить его в звезду. В противном случае вещество, плотность которого в результате столкновения молекулярных облаков повысилась до презвездных значений рассеется, образует филаменты и вернется в межзвездную среду.

Проведенные расчеты показывают, что в области соударения образуется большое количество таких сверхплотных сгустков, которые образуют своеобразную структуру. В дальнейшем планируется выяснить механизмы, от которых зависит количество образовавшихся сверхплотных сгустков, какая часть из них становится гравитационно-связанными, и сколько в конечном итоге будет образовано новых звездных систем.

Моделирование столкновения МО позволило выявить детали повышения давления и возмущений плотности в области соударения молекулярных облаками. Показано, что соударение больших МО с массами в сотни масс Солнца приводят к образованию структур, которые содержат сверхплотные сгустки, часть из которых гравитационно связаны.

Для проведения расчетов на сетках сверхбольшого разрешения были использованы гетерогенные технологии: Coarray и OpenACC для CPU и GPU. Моделирование вращающихся молекулярных облаков позволило уточнить детали возникновения турбуликации и формоизменения структур внутри остатков МО, в сгустках и филаментах.

Список литературы

1. Liow K Y, Dobbs C L. The role of collision speed, cloud density, and turbulence in the formation of young massive clusters via cloud-cloud collisions. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020, pp. 1099–1115.
2. Rybakin B.P., Goryachev V.D., Mikhachenko E.V., Stomov L.I., Pestov D.V., Skrylevaa E.I. Numerical simulation of different collision scenarios of interstellar molecular clouds. Proceedings of 72nd International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25–29 October 2021.
3. B.P. Rybakin, V.D. Goryachev. Shape Morphing in Molecular Cloud-Cloud Collision Affected by Coherent Instabilities // Computers and Fluids, Vol.205, 2020, 104549.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 19-29-09070 mk)*

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПЛАМЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Сластная Д.А.^{1,2}, Пономарев А.А.^{1,2}, Хребтов М.Ю.¹, Мулляджанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: d.slastnaia@g.nsu.ru

Возможные экологические проблемы, связанные с сжиганием топлива в газотурбинных установках приводят к постановкам новых задач по разработке современных технологий сгорания с минимальным уровнем выбросов вредных веществ в атмосферу. Образуюсь при неполном сгорании углеводородов, частицы сажи не только приводят ко многим энергетическим проблемам, но и способны оказывать влияние как на климатическую систему Земли, так и на жизнь и здоровье человека в целом. Численное моделирование процессов сажеобразования представит достаточную сложность, ввиду использования детальных кинетических механизмов. Поэтому первоочередной задачей стоит валидация расчетного пакета с экспериментальными данными, а также анализ влияния выбранного кинетического механизма.

Данная работа посвящена прямому численному моделированию процессов газового горения предварительно перемешанных углеводородных пламен с использованием детальных кинетических механизмов. Объектом исследования является метановоздушная смесь, втекающая в сопло Витошинского с постоянной скоростью 0.07 м/сек, соотношение топлива к окислителю 1:19 (CH₄ – 5%, воздух – 95%). В качестве основного инструмента моделирования был выбран расчетный пакет laminarSMOKE [2, 3], построенный на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM. Выбранный модуль позволяет моделировать реагирующие потоки путем введения так называемого оператора расщепления Стренга. Для учета разницы (в несколько порядков) скоростей химических реакций и скоростей конвекции и диффузии, предлагается разделить решение жесткой системы уравнений от нежесткой на разных промежутках по времени. Было выбрано три кинетических механизма в формате CHEMKIN: GRI-MECH 3.0, включающий 53 реагента и 256 химических реакций; SIMPLE: 18 реагентов и 30 реакций; POLIMI: 198 реагента и 6274 реакций. Гидродинамика разрешалась методом конечных объемов в сжимаемой постановке со вторым порядком точности по пространству и первым по времени. Расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке.

Получены поля скорости, температуры и массовых долей отдельных компонент смеси. Проведено сравнение отдельных компонент скорости с экспериментальными данными PIV метода [4]. На рис. 1 представлено сравнение поля осевой компоненты скорости с данными эксперимента. Заметим, что пламя полученное с помощью численного моделирования совпадает по высоте и амплитуде скорости с экспе-

риментальными данными. Хорошее согласие показало сравнение профилей температуры для трех различных высот от кромки сопла с экспериментальными данными, полученными на основе метода Рамана (СКР).

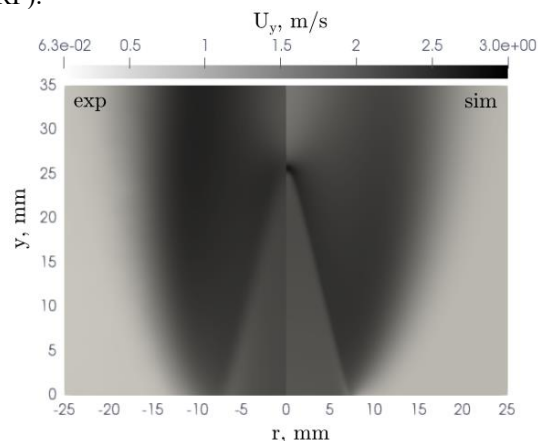


Рис. 1. Сравнение результатов численного моделирования (справа) осевой компоненты скорости с результатами эксперимента (слева).

Проведено сравнение влияния кинетического механизма на установления потока. Для этого использовались три кинетических механизма: GRI-MECH 3.0, SIMPLE и POLIMI. Результаты моделирования подтвердили имеющиеся предположения: механизм с меньшим количеством реакций не в силах учесть всю динамику пламени. Кинетический механизм с большим количеством реакций сложен и недостаточно устойчив для практических расчетов.

В докладе будет подробно представлено сравнение результатов численного моделирования с экспериментом, а также анализ влияния выбранного кинетического механизма.

Список литературы

1. Warnatz, J. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. 389.
2. Cuoci A. et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method //Energy & fuels. – 2013. – Т. 27. – №. 12. – С. 7730–7753.
3. Cuoci A. et al. A computational tool for the detailed kinetic modeling of laminar flames: Application to C₂H₄/CH₄ coflow flames //Combustion and Flame. – 2013. – Т. 160. – №. 5. – С. 870–886.
4. Dulin V. M. et al. On impact of helical structures on stabilization of swirling flames with vortex breakdown //Flow, Turbulence and Combustion. – 2019. – Т. 103. – №. 4. – С. 887–911.

Работа поддержана грантом
РНФ №22-19-00803

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПУСКНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ БИОРЕАКТОРА ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ FLOW VISION

Тимкин Л.С.¹, Щеляев А.Ю.³, Горелик Р.С.¹, Александрова Н.А.², Курдюмов А.С.¹, Жлуктов С.В.³, Сазонова М.Л.³

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

² ООО «ВИП», Москва,

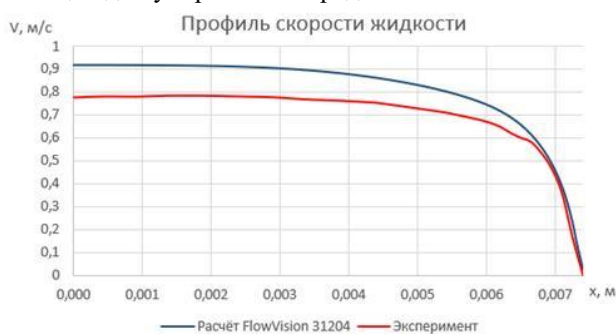
³ ООО «ТЕСИС», Москва

Для интенсивного производства микроорганизмов в промышленных установках требуется оптимальная аэрация аппаратов газами для питания. Расчет таких аппаратов невозможен без точных данных по течениям в модельных установках при различных газосодержаниях, различной дисперсности газовой фазы в стационарных и неустановившихся режимах течения [1, 2].

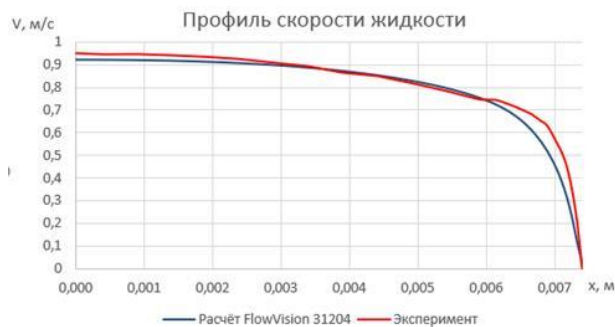
В данной работе после экспериментальных исследований газожидкостного опускного течения в вертикальной модели биореактора с помощью электрохимической методики [3], в верхнем и нижнем сечениях установки проведены численные расчёты с помощью программного комплекса FLOW VISION. Задача решалась в многофазной постановке (сплошная + дисперсная) с учётом сил, действующих на пузырьки: силы тяжести, Архимеда, градиента давления, подъёмной, отталкивающей от стенки и силы сопротивления.

В режимах течения с числами Рейнольдса течения 9300 (Рис. а) и б)) и 12750 происходит перестройка течения выражающаяся в развитии трения на стенке трубы, изменении дисперсности газовой фазы с высотой и соответствующем изменении профилей скорости жидкости (V) и газосодержания.

В течении с Рейнольдсом 6180 (среднерасходная скорость жидкости $WL=0,485$ м/с) по высоте трубы происходит переход от кольцевого течения в верхней позиции до пузырьково-снарядного в нижней.



а)



б)

Рисунок. $WL = 0,73$ м/с, число Рейнольдса течения = 9300, а) верхнее сечение, б) нижнее сечение трубы.

Расчет касательного напряжения демонстрирует удовлетворительное совпадение с экспериментом. Путём подбора коэффициентов для правильного учёта сил в FLOW VISION удалось достичь совпадения с экспериментальными данными. Наилучшее совпадение (в диапазоне 5%) достигается в нижнем контрольном сечении

Список литературы

1. Nizovtseva I., Starodumov I., Schelaev A., Aksenov A., Zhlukov S., Sazonova M., Kashinsky O., Timkin L., Gasenko V., Gorelik R., Chenushkin D., Oshkin I. Simulation of two-phase air-liquid flows in a closed bioreactor loop: numerical modeling, experiments and verification // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2021. P. 1–17. DOI: 10.1002/mma.8132.
2. Lu J., Biswas S., Tryggvason G. A DNS study of laminar bubbly flows in a vertical channels // *IJMF*. 2006. Vol. 32, No. 6. P. 643–660.
3. Nakoryakov V.E., Burdukov A.P., Kashinsky O.N., Geshev P.I. Electrodiffusional method for studying local structure of turbulent flows. Novosibirsk: Institute of Thermophysics, 1986. 248 p.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ДВУХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ БЕССЕТОЧНЫМ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КОРРЕКЦИЕЙ ГРАДИЕНТА ЯДРА

Токталиев П.Д.¹, Мартыненко С.И.^{1,2,3}

¹ Институт Проблем Химической Физики РАН, Черноголовка

² Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва

³ Московский Государственный Технический Университет им.Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: toktaliev@icp.ac.ru

С явлением высокоскоростного соударения двух или многих твердых тел связано несколько актуальных задач, в том числе, защиты искусственных космических объектов от космического мусора и геологии. В первом случае в связи с все более возрастающим количеством частиц космического мусора на околоземной орбите стоит задача моделирования взаимодействия тел, обладающих космическими скоростями и защиты искусственных спутников. Во втором случае, моделирование падения метеорита позволяет получить новые геологические данные о структуре кратера и близлежащих пластов породы. Среди прочего, подобное моделирование может дать ответ на условия образования импактных алмазов, которые образуются при экстремальном нагреве и сжатии вследствие удара, больших скоплений природного углерода.

При моделировании высокоскоростного удара необходимо учитывать большие деформации материала, фазовые переходы и изменение топологии расчетной области (возможный разлет фрагментов материала). Сеточные методы для подобных задач сталкиваются со значительными сложностями, часть из них удается преодолеть посредством использования динамических сеток или использования гибридных Лагранжево-Эйлеровых методов [1, 2]. В то же время, бессеточные методы для подобного класса задач имеют ряд преимуществ, в первую очередь, это возможность отслеживания границ и естественное описание топологии расчетной области любой сложности. Однако, и у бессеточных методов, в частности метода сглаженных частиц, есть ряд недостатков, таких как изотропность аппроксимации градиента переменной на границах и для существенно неоднородного пространственного распределения частиц [3]. Таким образом, в настоящей работе рассмотрен вариант модификации классического метода сглаженных частиц (МСЧ) посредством нормализации или коррекции аппроксимации градиента функции ядра (Kernel Gradient Correction) для класса задач с высокоскоростным соударением твердых тел и сравнение с другими известными вариантами МСЧ.

Сформулируем кратко идею коррекции аппроксимации градиента. Классическое представление производной скалярного поля в МСЧ:

$$\nabla \cdot f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(\mathbf{x}_j) \nabla_i W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i),$$

здесь f – скалярное поле, \mathbf{x} – радиус-вектор, i, j – индексы частиц, m , ρ – масса и плотность частицы, $W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) = W_{ij}$ – функция ядра, N – число частиц в окрестности данной. При этом должно выполняться для любой частицы для изотропности аппроксимации градиента:

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \otimes \nabla_j W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) = \mathbf{I}, \quad (1)$$

здесь \mathbf{I} – единичный тензор. Это условие очевидным образом нарушается для классической аппроксимации на границах области и может нарушаться на фазовых границах внутри области. Вводя коррекцию для градиента $W'_{ij} = L_i \nabla W_{ij}$, можно всегда выбрать L_i таким образом, что (1) будет выполняться для скорректированного градиента W'_{ij} , например:

$$L_i = \left(\sum_{i=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \nabla_j W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \otimes (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \right)^{-1}. \quad (2)$$

Еще одним важным компонентом моделирования соударения является широкодиапазонное уравнение состояния материала, в настоящей работе использованы как полуэмпирические уравнения состояния Ми-Грюнайзена, так и табличные многофазовые уравнения состояния [4–6]. Сравнение с другими вариантами метода сглаженных частиц, в частности, использующих оптимизированную искусственную вязкость и решение задачи Римана о распаде разрыва [7], а также с экспериментальными данными [8] проведено для задачи о соударении двух алюминиевых тел для скорости ударника $u=6180$ м/с. Проведен анализ вычислительной эффективности параллельной версии расчетной процедуры и параметрические расчеты задачи соударения для других материалов ударника и мишени.

Список литературы

1. Hirt C.W., Amsden A.A., Cook J.L. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for all Flow Speeds // J. Comp. Phys., 14, 1974, p. 227.
2. Sarrate J., Huerta A., Donea J. Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation for fluid-rigid body interaction // Comput Methods Appl Mech Eng 2001;190(24–25), p.3171–3188.
3. Vacondio R., Altomare C., De Leffe M. et al. Grand challenges for Smoothed Particle Hydrodynamics numerical schemes // Comp. Part. Mech. 8, 2021, p.575–588.
4. Ломоносов И.В., Фортова С.В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // Теплофизика высоких температур, 2017, Т.55, №4, с.596–626.
5. Lomonosov I.V. Multi-phase equation of state for aluminum // Laser and Particle Beams, 2007, 25, p.567–584.
6. Fortov V.E., Kim V.V., Lomonosov I.V., Matveichev A.V., Ostrik A.V. Numerical modeling of hypervelocity impacts // International Journal of Impact Engineering, 2006, 33 p. 244–253.
7. Zhang Z.L., Liu M.B. Smoothed particle hydrodynamics with kernel gradient correction for modeling high velocity impact in two- and three-dimensional spaces.
8. Hiermaier S., K nke D., Stilp A.J., Thoma K. Computational simulation of the hypervelocity impact of al-spheres on thin plates of different materials // Int. J. Impact. Eng., 1997, 20(1–5), p-363–74.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-72-20023)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПРИ СПЕКАНИИ КЕРАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фаткуллина Н.Б.^{1,2}, Солнышкина О.А.^{1,2}, Чугунов С.С.³, Киреев В.Н.^{1,2}, Билялов А.Р.²

¹ Башкирский государственный университет, Уфа

² Башкирский государственный медицинский университет, Уфа

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва

e-mail: nazgulbay@mail.ru

Спекание — сложный физико-механический процесс, протекающий при высоких температурах в порошковых материалах и являющийся одним из важнейших технологических процессов в порошковой металлургии и керамической промышленности. Основной принцип процесса спекания заключается в консолидации рыхлых или слабосвязанных порошков при повышенных температурах, близких к температуре плавления, под давлением или без него. При спекании происходит уплотнение порошкового материала, что выражается в изменении объема и формы образца, увеличении плотности и уменьшении пористости (см. рис. 1).

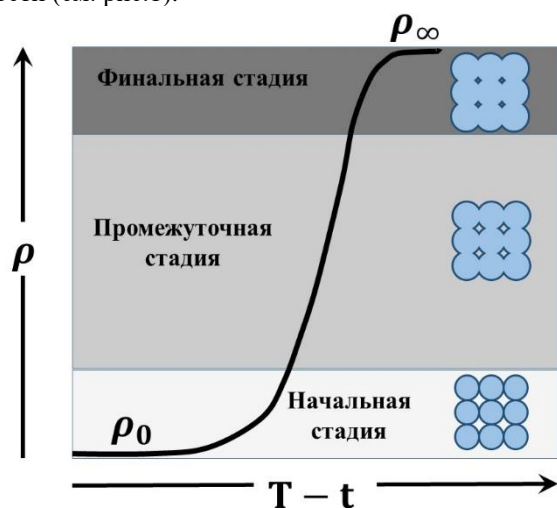


Рис. 1. Этапы процесса спекания.

На процесс спекания влияет множество факторов, и существуют различные способы классификации моделей спекания. В большинстве моделей спекание рассматривалось как коллективный результат термически активируемых адгезионных процессов, приводящих к росту контактов между частицами и их коалесценции. Разработанные подходы в основном были направлены на изучение механизмов межчастичного взаимодействия, то есть на исследование локальной кинетики процесса.

Однако кинетика спекания реальных пористых тел определяется не только свойствами частиц порошка и характером их взаимодействия, но и макроэкономическими факторами. К ним относятся кинематические ограничения (например, сцепление торца пористого образца с поверхностью печи), внешние приложенные силы, а также неоднородность свойств в исследуемом объеме. Указанные проблемы могут быть решены только в рамках макроэкономического описания, которое должно основываться на поняти-

ях, принципиально отличных от представлений локального анализа.

В рамках данной работы изучение процесса свободного спекания керамического изделия проводится с применением реологической теории спекания [1]. Уравнение, связывающее тензор напряжений с тензором скоростей деформации дополняется соотношениями для сдвиговой и объемной вязкостей, эффективного напряжения спекания и кинематического условия для изменения пористости [2]. Одним из важных аспектов моделирования спекания изделий сложных форм является учет анизотропии. В случае линейного уравнения спекания анизотропия может быть введена в соотношение для изменения вязкости материала по различным направлениям осей координат [3]:

$$2\eta_i = \eta_{0i} T \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad i = 1, 2, 3,$$

где η_i — вязкость материала в i -м направлении, η_{0i} — начальная вязкость материала, T — температура, Q — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная. Необходимые параметры можно определить путем использования экспериментальных данных дилатометрических тестов образцов конкретных материалов для настройки модели.

Численное решение задачи в трехмерном случае проводилось методом конечных элементов с помощью свободно распространяемого программного обеспечения FreeFem++. Была проведена корректировка модулей для учета анизотропии образцов при спекании. В качестве параметров для изменения вязкости были использованы данные из литературы [4]. Проведены демонстрационные расчеты на примере нескольких изделий простых форм.

Список литературы

1. Skorohod V.V. Rheological basis of the theory of sintering. // Naukova Dumka, Kiev, 1972.
2. Olefsky E. A., Kandukuri S., Froyen L. Consolidation enhancement in spark-plasma sintering: Impact of high heating rates // J. Appl. Phys. 2007. V. 102, 114913.
3. German R. M. Sintering theory and practice. // Wiley. 1996. 568 p.
4. Maniere C., Harnois C., Marinel S. 3D printing of porcelain and finite element simulation of sintering affected by final stage pore gas pressure // Materials Today Communications. 2021. Vol. 26. 102063.

Исследование выполнено в рамках гранта Республики Башкортостан для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ В ХОДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗА И ОЛОВА

Фомин В.Е., Тукмакова А.С., Тхоржевский И.Л., Новотельнова А.В.

Университет ИТМО

e-mail: vladdisslav.fomin@yandex.ru

Процесс теплопереноса является важной составляющей диффузионного процесса в ходе высокотемпературного синтеза в реакционных тиглях интерметаллидов железа и олова. Данный метод применяется для получения станнидов. Основной задачей в данной работе являлось изучение распределения температурных полей в ходе процесса проведения синтеза и их влияния на диффузионные процессы.

Материалы, изучаемые в данном процессе – железо и олово, являются перспективными материалами для получения постоянных магнитов с улучшенными свойствами. Эксперименты проводятся с целью поиска способов получения перспективных соединений железа и олова (например, Fe_5Sn_3) с помощью метода реакционных тиглей. Однако, на данный момент, технология их получения остается не до конца изученной.

Экспериментальное исследование осуществлялось с помощью установки высокотемпературного синтеза, тигель которой изготовлен из железа. Реакционная зона нагревалась до $780\text{--}820^\circ\text{C}$. Геометрические размеры и прочие параметры реального процесса были использованы для проведения моделирования. Геометрическая модель экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

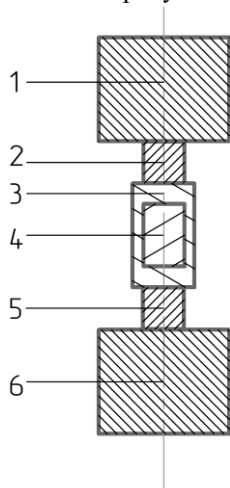


Рис.1 Геометрическая модель установки 1,6 – верхний и нижний стальные электроды ($d=19,2$ мм, $h=15$ мм); 2,5 – пуансоны, выполненные из графита ($d=6$ мм, $h=6$ мм), 3 – реакционный тигель ($d=10$ мм, $h=15$ мм), 4 – реакция зона, заполненная оловом ($d=6$ мм, $h=9$ мм).

С помощью численных экспериментов в программной среде Comsol Multiphysics, в которой были применены тепловой, механический и диффузионный модули, проведено исследование распределения температуры и его влияния на ход диффузионного процесса. Распределение температуры по высоте реакционной зоны показано на рисунке 2.



Рис.2 Распределение температуры в реакционной зоне по высоте.

Было выявлено влияние температуры на диффузионный процесс. При установлении температуры 780°C начинались процессы растворения, препятствующие диффузии. Увеличение температуры ведет к ускорению диффузионных процессов, однако, процесс растворения также ускоряется по мере нагревания и противодействует диффузии. В результате, глубина диффузии олова в железо составила 5 мкм после 3 часов воздействия. Увеличение времени воздействия выше 3 часов не меняло значение глубины диффузии в связи с тормозящим действием растворения.

В связи с низкой глубиной диффузии олова и малым значением толщины интерметаллида, получение фазы Fe_5Sn_3 с помощью простого нагревания в реакционном тигле не является оптимальным. Необходимо дальнейшие исследования для поиска наилучшего метода получения интерметаллидов железа и олова.

ДВУМЕРНОЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРОМ УДАРНЫХ ВОЛН В АЛЮМИНИИ

Шепелев В.В.

Институт автоматизации проектирования Российской Академии наук, г. Москва

e-mail: vadim.aries@gmail.com

Лазерное ударное упрочнение материалов [1–3] (Laser shock peening, LSP в англоязычной литературе) является одной из современных промышленных технологий, получивших развитие в последние десятилетия. Это стало возможным благодаря интенсивному развитию лазерных технологий, и в особенности, лазером с коротким и ультракоротким лазерным импульсом. Несмотря на то, что ударное упрочнение в результате пластических деформаций давно изучается в машиностроении [4], лежащие в основе физические механизмы фемтосекундного лазерного ударного упрочнения по-прежнему недостаточно изучены, и представляют фундаментальный и прикладной интерес.

Поскольку эффект упрочнения напрямую связан с величиной напряжения в подповерхностном слое, расчет пространственной эволюции напряжения в вызванной лазером ударной волне в металлах играет важную роль в создании точной физико-математической модели явления.

В настоящей работе представлены модель и алгоритм, позволяющие проводить вычислительные эксперименты по моделированию индуцированных фемтосекундным лазером ударных волн, способных, в зависимости от начальной конфигурации и мощности лазерного луча, вызывать упрочнение различной глубины. Модель основана на численном решении уравнений Эйлера и полуэмпирическом уравнении состояния алюминия в форме Ми-Грюнайзена.

Модель и алгоритм работает как в двумерной, так и в трехмерной осесимметричной постановке, характерной для широкого класса лазерных задач в силу симметрии относительно оси пучка. Двумерная постановка позволяет произвести сравнение с другим эффективным методом численного моделирования – молекулярно-динамическими расчетами [5]. Осесимметричная постановка дает возможность существенно более точного учета затухания ударной волны. Это обстоятельство очень важно, поскольку затухание в трехмерном случае сильнее, чем в двумерном, и следовательно, форма и размеры области упрочнения определяются с помощью осесимметричной модели гораздо точнее [6].

Для численного решения уравнений гидродинамики используются зарекомендовавшие себя в задачах с сильными ударными волнами римановские солверы HLL и HLLC. Метод HLLC достигает точности

разрешения ударных волн аналогичную точности солвера Roe. Плюс выбранных методов также состоит в их способности учитывать уравнение состояния общего вида без привлечения дополнительных методик и необходимости строить на каждом шаге точные решения задачи о распаде разрыва с неидеальной средой. Для повышения порядка точности схем используются ограничители наклона minmod и ENO-реконструкции второго порядка аппроксимации.

С помощью представленной модели и кода проведены расчеты затухания ударных волн в случае фемтосекундного лазерного облучения, в плоской и осесимметричной постановке, для начальных давлений в волне порядка сотен ГПа ($1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}$). Проведено сравнение режимов распространения и затухания ударной волны в этих случаях, показана разница законов затухания. Для плоского двумерного и цилиндрически симметричного трехмерного случая построены области возможного упрочнения металла. Показано, что вследствие более быстрого затухания начальной волны размеры области в цилиндрически симметричной постановке оказываются примерно на 10% меньше, чем в двумерной плоской постановке.

Список литературы

1. T. Sano, T. Eimura, R. Kashiwabara, T. Matsuda, Y. Isshiki, A. Hirose, S. Tsutsumi, K. Arakawa, T. Hashimoto, K. Masaki, Y. Sano, Femtosecond laser peening of 2024 aluminum alloy without a sacrificial overlay under atmospheric conditions J. Laser Appl., 29 (1) (2017), p. 012005, 10.2351/1.4967013.
2. U. Trdan, T. Sano, D. Klobcar, Y. Sano, J. Grum, R. Sturm, Improvement of corrosion resistance of AA2024-T3 using femtosecond laser peening without protective and confining medium Corros. Sci., 143 (2018), pp. 46-55, 10.1016/j.corsci.2018.08.030.
3. R. Sundar and Ganesh, P. and Gupta, Ram and G, Ragvendra and Pant, Bharat and Kain, Vivekanand and K, Ranganathan and Kaul, Rakesh and Bindra, Kushvinder. (2019). Laser Shock Peening and its Applications: A Review. Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 6. 10.1007/s40516-019-00098-8.
4. Гуляев А.П., Металловедение, Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
5. Н. А. Иногамов, Е. А. Перов, В. В. Жаховский, В. В. Шепелев, Ю. В. Петров, С. В. Фортова, Лазерная ударная волна: пластичность, толщина слоя остаточных деформаций и переход из упругопластического в упругий режим распространения, Письма в ЖЭТФ, 115(2), с. 80-88, 2022.
6. V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, S.V. Fortova, The role of geometry in the generation of a shock wave by a femtosecond laser pulse, J. Phys.: Conf. Ser. 1787, 012023 (2021).

*Работа выполнена в рамках
гос. задания ИАП РАН*



СЕКЦИЯ 7

Методы и средства теплофизического
и гидрогазодинамического эксперимента



АЛГОРИТМ РАСШИФРОВКИ ФАЗОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В.

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

e-mail: dv.s@mail.ru

Задача расшифровки фазовых изображений актуальна для широкого спектра задач в области оптической диагностики трехмерной геометрии объектов в теплофизических и гидрогазодинамических приложениях [1]. В системах на основе триангуляции и структурированного освещения либо интерферометрических системах по фазовым изображениям восстанавливают трехмерный профиль измеряемого объекта [2].

Методы восстановления трехмерного профиля по фазовым изображениям активно развиваются и совершенствуются. Современное развитие методов фазовой триангуляции направлено, с одной стороны, на снижение времени измерения [3] для обеспечения возможности измерения геометрии движущихся объектов, разработки быстрых и удобных методов калибровки и увеличения точности измерения, используя различные методы и подходы [4]

Вычисление начального фазового сдвига выполняются по набору изображений, между которыми вносятся известный сдвиг фазы. При этом, в случае, когда динамический диапазон фотоприемника не согласован с источником освещения и светорассеивающими свойствами, часть фазовых сдвигов содержат недостоверные результаты и не могут быть использованы в вычислении. Такая ситуация достаточно типична при измерении сложнопрофильных объектов с произвольными светорассеивающими свойствами поверхности [5].

При измерении сложнопрофильных объектов с меняющейся геометрией поверхности важно, с одной стороны, максимально быстро выполнять измерения [6], а с другой стороны, максимально быстро выполнять расшифровку полученных данных [7].

В данной работе предложен алгоритм расшифровки фазовых изображений, обладающий алгоритмической сложностью $O(N \log N)$.

Метод основан на итерационном поиске минимального отклонения модельной функции от результатов измерения. В результате задача сводится к численному поиску минимума функции $E(w)$, характеризующей отклонение модельной функции от гармонической при выборе значения начального сдвига фазы.

Для быстрого поиска минимума функции $E(w)$ был применен интервальный поиск: на каждом шаге алгоритма выбирался интервал и на нем для 3 равноудаленных значений w вычислялись значения $E(w)$. Затем значение w , где $E(w)$ было наименьшим выбиралось за центр нового интервала, размер которого уменьшался вдвое по сравнению с предыдущим. В результате на 10-м шаге алгоритма получаем интервал размеров $1/1024$ от диапазона изменения величины w , которая равна 3.14 радиан. В таком случае погрешность определения начальной фазы, обуслов-

ленная выбранным методом будет составлять менее 0.1% от диапазона измерений. При этом требуется выполнить вычисление функции $E(w)$ всего для 30 значений w .

Вычислительную сложность такого подхода можно оценить $O(N \log(K))$, где N – количество фазовых сдвигов на изображениях, а K – количество интервалов, на которых выполняется поиск. При $N > 30$ и $K = 1024$, предлагаемый численный метод поиска значения фазы имеет меньшую вычислительную сложность, чем методы на основе аналитического решения системы трансцендентных уравнений.

Предложен численный алгоритм быстрого поиска начального фазового сдвига на фазовых изображениях с произвольными межкадровыми сдвигами. Метод основан на итерационном поиске минимального отклонения модельной функции от результатов измерения. Применение алгоритма интервального поиска позволило существенно снизить вычислительную сложность алгоритма. Погрешность предложенного метода сравнима с погрешностью метода расшифровки фазовых изображений на основе аналитического решения системы уравнений, описывающих интенсивность на фазовых изображениях.

Список литературы

1. Чугуй Ю.В. Фурье-оптика трёхмерных объектов постоянной толщины на основе дифракционных моделей // Автометрия, Т. 53, № 5, 2017. С. 90–105.
2. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 48(2), 149–158 (2010).
3. Lohry W., Zhang S. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns // Opt. Express 22, 26752–26762 (2014).
4. Armangue X., Salvi J., Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // Pattern Recognition. – 2002. – Vol. 35 (7). – P. 1617–1635.
5. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология №4, 2010. – С. 15–27.
6. C.Zuo, T.Tao, S.Feng, L.Huang, A/Asundi, Q.Chen Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second // Optics and Lasers in Engineering, V.102, 2018, pp. 70-91.
7. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия, Т.53, №2, 2017. – С. 56–62.

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ ФОТОПРИЕМНИКА В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЕТОДАМИ ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Зуев В.О., Меледин В.Г.

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

e-mail: dv.s@mail.ru

Задача измерения 3D геометрии актуальна и востребована во многих областях науки и техники. Одним из активно развивающихся и широко применимых методов являются триангуляционные методы с использованием структурированного освещения [1]. Основным преимуществом методов триангуляции с использованием структурированного освещения является возможность быстрой трехмерной реконструкции профиля поверхности объекта с высоким разрешением бесконтактным способом по видеоизображениям. Методы фазовой триангуляции [2] обладают наиболее высокой абсолютной точностью и это связано с устойчивостью методов фазовой триангуляции к расфокусировке оптической системы источника и приемника излучения [3–4].

При измерениях в промышленных условиях важно согласовать параметры источника излучения, светорассеивающих свойств поверхности объекта и параметры фотоприемника для исключения выхода из динамического диапазона фотоприемника. Альтернативный подход может быть основан на применении устойчивого алгоритма расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами [5]. Однако, в случае аддитивных помех применение таких подходов приведет к чрезмерному снижению динамического диапазона фотоприемника для исключения выхода за пределы чувствительности фотоприемника при наличии помех. Это приведет к существенному снижению точности измерений.

Данная работа нацелена на разработку адаптивного алгоритма расшифровки фазовых изображений в условиях случайных аддитивных помех на основе адаптивной статистической фильтрации исходных данных.

Алгоритм основан на динамической оценке среднеквадратичного отклонения колебаний зарегистрированной интенсивности на исходных экспериментальных данных при близких значениях начального фазового сдвига. В случае выхода из динамического диапазона фотоприемника данных значения фазового сдвига в заданной окрестности, выполняется удаление экспериментальных данных для данного значения сдвига в анализируемой точке на фазовом изображении. В результате формируется новый набор данных фазовых изображений, имеющих неэквиливантные начальные значения фазовых сдвигов, отличные для каждой точки на анализируемых фазовых изображениях.

Для расшифровки фазовых изображений можно применять устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами. Представленный подход позволяет исключить нелинейные искажения, вызванные пороговой фильтрацией экспе-

риментальных данных из-за узкого динамического диапазона фотоприемника. Кроме того, предложенный метод позволяет снизить уровень аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных в \sqrt{K} раз.

Выполнены исследования погрешности метода расшифровки фазовых изображений на модельных данных в зависимости от количества фазовых сдвигов при постоянном уровне аддитивного шума. Для сравнения взят устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с произвольным пошаговым сдвигом и предложенный метод на основе адаптивной фильтрации данных.

Результаты демонстрируют, что устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией данных, выходящих на пределы динамического диапазона не гарантирует внесения систематической погрешности измерения начальной фазы. Погрешность обусловлена искажением сигнала вблизи порогового значения при наличии шума. Этому недостатка лишен предложенный метод расшифровки на основе адаптивного алгоритма расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа данных.

Предложен адаптивный алгоритм обработки данных на основе статистической фильтрации для снижения погрешности измерения трехмерных геометрических параметров методами фазовой триангуляции. Показано, что предложенный алгоритм позволяет снизить погрешность измерения трехмерного профиля на основе метода фазовых шагов и структурированного освещения. Показано, что предложенный алгоритм расшифровки на основе устойчивого метода расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа данных обеспечивает измерение фазы без внесения систематических погрешностей, обусловленных ограниченным динамическим диапазоном фотоприемника

Список литературы

1. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? / *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2010). – p. 133–140.
2. M. Gruber, G. Hausler: Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation. *Optik*. 1992. № 3. С. 118–122.
3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // *Измерительная техника* №5, 2015. – С.24–27.
4. S.V. Dvoynishnikov, V.V. Rakhmanov, I.K. Kabardin, V.G. Meledin Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // *Measurement*, Vol.145 (2019). - P. 63–70.
5. Двойнишников С. В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Компьютерная оптика* 2007. Т. 31. № 2. С. 21–25.

ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕТРТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ НА УДАЛЕННЫХ АКТИВАХ ПАО «ГАЗПРОМНЕФТЬ»

Демин Е.В., Змиенко Д.С., Кушников И.В.

ООО «Газпромнефть НТЦ»

e-mail: Demin.EV@gazpromneft-ntc.ru, Zmienko.DS@gazpromneft-ntc.ru, Kushnikov.IV@gazpromneft-ntc.ru

Нобелевский лауреат Альберт Гор более десяти лет тому назад написал «Геотермальная энергия потенциально является крупнейшим – и в настоящее время наиболее недооцененным – источником энергии в США и современном мире» [1]. В свете последних исследований изменения климата «нет сомнений в том, что атмосфера, океан и суша нагрелись под воздействием человеческой деятельности» [2], поэтому мировые энергетические компании готовятся к энергопереходу. Учитывая, что нефть необходима для обеспечения нужд транспорта (>50%) и генерации тепла, необходим альтернативный теплоресурс. Анализируя компетенции нефтедобывающих компаний и ВИЭ единственным верным, выглядит освоение геотермальных ресурсов. Данное направление известно человечеству достаточно давно, но технологическое развитие в области поиска и добычи углеводородов за последние 100 лет ушли далеко вперед и необходимо переосмыслить технологическую доступность термальных ресурсов.

Обзор источников показал активное развитие и перспективность петротермальных проектов на больших глубинах. Доступ к петротермальным ресурсам обеспечит рост геотермальной ЭЭ в США в 26 раз к 2050 г или до 60 ГВт [3, 4].

Условно геотермальные проекты можно разделить по их энтальпийности:

- низкоэнтальпийные (гейзеры);
- среднеэнтальпийные (бинарные станции);
- высокоэнтальпийные (петротермальные проекты).

Примерами, петротермальных проектов могут служить «Eavor», «FERVO energy» и «eden geothermal». Стоит отметить петротермальный проект St1, в рамках которого пробурена самая глубокая в настоящее время термальная скважина, причем она находится не в удаленных районах, а в Хельсинки.

Переосмысление ресурсного потенциала термальной энергетики, с одной стороны позволит обеспечить энергопереход, а другой даст доступ к освоению недоступных ранее регионов, например, Арктики. Причем, извлечение углеводородов будет осуществляться для нужд нефтехимии. Существующие карты термальных ресурсов РФ не обеспечивают необходимой точности и информативности и это дополни-

тельный запрос к проведению дальнейших масштабных исследований.

Кроме того, в РФ отсутствуют проекты, на основе которых можно осуществлять технико-экономическое обоснование проектов, поэтому уровень неопределенности ставит дополнительные задачи по разработке методологии вероятностной оценки успешности подобных проектов. Вместе с тем, в рамках «учебного кейса» внутренней программы «Академия технологического интеллекта» кросс-функциональная команда специалистов-нефтяников смогла сформировать кейс для полуострова Гыдан. Данный кейс не подвергался серьезной экспертизе, если ее возможно выполнить для подобных проектов, но работа велась в тесном контакте с экспертами из Сколтеха и НИГТЦ ДВО РАН. По результатам удалось получить синергетический эффект, что подтверждает прогнозы Wood Mackenzie о геотермальном будущем [5].



Инфографика по кейсу

Список литературы

1. Gore A, Nixon C, Slattery J. Our choice: A plan to solve the climate crisis. Bloomsbury London; 2009.
2. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change n.d.
3. GeoVision | Department of Energy n.d. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geovision> (accessed May 24, 2022).
4. The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. 2006.
5. Future energy – geothermal power | Wood Mackenzie n.d. <https://www.woodmac.com/news/the-edge/future-energy--geothermal-power/> (accessed May 24, 2022).

МЕТОДИКА ТЕПЛОЭРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТРЕХФАЗНОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПОДОГРЕВАТЕЛЕ

Золотарев А.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», г. Москва.

e-mail: zolotarev@kerc.msk.ru

Композиционные материалы, обладающие устойчивостью к высоким тепловым нагрузкам, нашли широкое применение в промышленности. Для подтверждения работоспособности конструкций с теплозащитным покрытием из этих материалов требуется исследование их теплоэрозионной стойкости в высокотемпературных окислительных потоках. В качестве объекта исследования были выбраны цилиндрические образцы композиционных материалов.

В данной работе представлены результаты испытаний композиционных материалов в условиях, моделирующих уровень теплового воздействия, который варьировался в диапазоне от 4 до 30 МВт/м². Испытания проводились в струе электродугового подогревателя (ЭДП) типа «Звезда» [1], работающего на переменной сети номинальным напряжением 10кВ. Рабочим телом ЭДП «Звезда» является воздух. Для моделирования состава рабочей среды разработан узел, позволяющий подавать горючий компонент непосредственно в разрядную камеру ЭДП «Звезда». В качестве горючего применен спирт этиловый технический ГОСТ 17299-78.

Экспериментальная установка для испытания образцов композиционных материалов состоит из ЭДП «Звезда» с разрядной камерой, соплом и охлаждаемого держателя образца на общем стапеле (см. рис. 1). Образец располагается соосно с проточным трактом ЭДП. Для выбора режимов испытаний, устройство с образцом перемещалось вдоль оси струи. Устройство водоохлаждаемое и имеет внутри себя каналы для подключения диагностического оборудования.

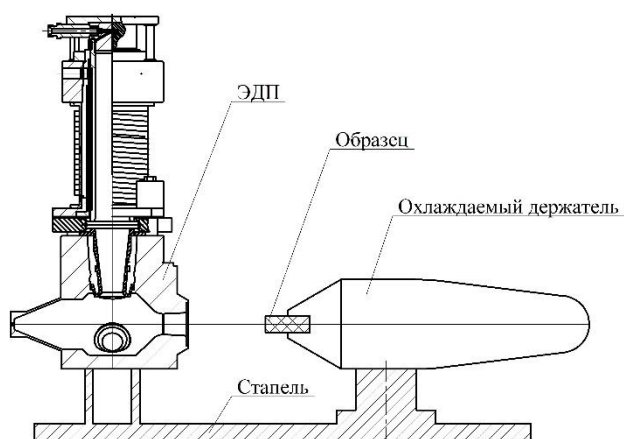


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для теплоэрозионных испытаний образцов материалов.

Режим работы ЭДП определен решением системы уравнений обобщенной вольт-амперной характеристики дуговых подогревателей [1] и уравнения сверхзвукового истечения из сопла [2].

Проведена серия методических испытаний с применением калориметрирования, необходимая для определения диаметров и положений образца относительно среза сопла ЭДП с целью получения требуемых уровней теплового воздействия и измерения теплового потока. При калориметрировании применены образцы, изготовленные из стеклопластика П-5-7 [3], в которые заделаны медные цилиндрические калориметры с зачеканенными термопарами (см. рис. 2). Тепловые потоки измерены с применением метода регулярного теплового режима.

По результатам проведенных испытаний определены:

- температура рабочей поверхности образца композиционного материала;
- величины массового и линейного уноса и глубина деструкции материала;
- эффективная энтальпия разрушения материала или безразмерная скорость уноса.

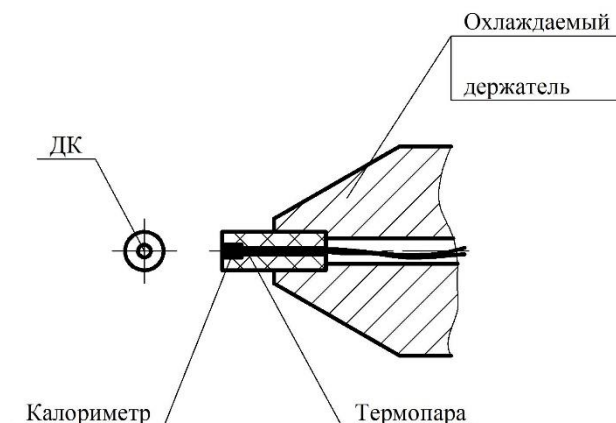


Рис. 2. Схема установки макетного образца с калориметрами и колпачком и его общий вид без колпачка.

Полученные результаты испытаний в виде определенных теплоэрозионных характеристик материалов могут быть применены при пересчете результатов на натурные условия.

Список литературы

1. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. – М.: Машиностроение, 1993. – 296 с.
2. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование / А.А. Дорофеев – М.: Машиностроение, 2014. – 571 с.
3. Материал П-5-7 ЛДП Технические условия ГОСТ 17731-79.

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Зуев В.О.^{1,2}, Двойнишников С.В.¹, Главный В.Г.¹, Меледин В.Г.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Среди задач измерения трехмерной геометрии особое место занимает проблема контроля трехмерной деформации объекта, находящегося в ограниченном объеме, например в процессе теплофизических или аэродинамических исследований. Так как применение контактных технологий в данной задаче затруднительно и зачастую невозможно, то наиболее перспективным решением является использование бесконтактных оптических методов измерения трехмерной геометрии объекта, для чего стенки измерительного объема делаются прозрачными. Учитывая тот факт, что среди оптических методов существенное развитие и широкое применение получил метод фазовой триангуляции благодаря высокой точности и скорости измерения, то актуально его применение для решения задачи контроля трехмерной деформации объекта.

Существенным затруднением применения метода фазовой триангуляции является факт наличия ограничивающего объема с преломлением оптических сигналов, вызывающего, согласно закону Снеллиуса, нарушение прямолинейности хода луча:

где θ_1 – угол падения, θ_2 – угол преломления, n_1 – показатель преломления первой среды, n_2 – показатель преломления второй среды. В результате становится невозможным использование принципа триангуляции, являющегося основополагающим в методе фазовой триангуляции.

Целью данной работы является адаптация метода фазовой триангуляции для измерений в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов с помощью калибровки измерительной системы. Принципиальным требованием к разрабатываемому методу калибровки является независимость от формы ограничивающего объема.

В ходе работы реализован универсальный алгоритм калибровки измерительной системы на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов. Проблема нарушения прямолинейности хода луча решена с помощью установления взаимно-однозначного соответствия между координатами изображения фотоприемника, фазой модулирующей синусоиды (x_c, y_c, φ) и трехмерными координатами (X, Y, Z) . В результате вычисленное в ходе калибровки взаимно-однозначное соответствие $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ уже учитывает факт непрямолинейного распространения оптических сигналов. Для установления взаимно-однозначного соответствия $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ внутри всего измерительного объема

применен метод параллельных калибровочных плоскостей: установлены взаимно-однозначные соответствия $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X_i, Y_i, Z_i)$ для набора параллельных калибровочных плоскостей и далее в каждом пикселе фотоприемника (x_c, y_c) вычислены регрессионные кривые, устанавливающие зависимости компонент трехмерной координаты X, Y, Z от фазы φ .

Выполнено тестирование разработанного метода калибровки для системы измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в процессе аэродинамических исследований на экспериментальном стенде методом фазовой триангуляции. Измерительная система включала фотоприемник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифровой проектор Excelvan CL720 с разрешением 1280×800 и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см. Расстояние от источника освещения до объекта 60 см, от фотоприемника до объекта 125 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения 70° . Для проведения аэродинамических исследований объект помещался в трубу из оргстекла с поперечным сечением 200×200 мм и толщиной стенок 20 мм. Размер измерительного объема составил $100 \times 100 \times 60$ мм. Проведение калибровки измерительной установки с параллельным сдвигом калибровочной плоскости выполнено с помощью установки калибровочной поверхности через один из концов ограничивающей трубы. Достигнута погрешность измерения трехмерной геометрии плоского объекта на уровне 12 мкм.

В результате разработан алгоритм адаптации метода фазовой триангуляции для измерений на аэродинамических стендах в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов на основе калибровки измерительной системы. С помощью применения метода параллельных калибровочных плоскостей с последующим установлением взаимно-однозначного соответствия $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ решена проблема учета нелинейного распространения излучения в методе фазовой триангуляции. Разработанный алгоритм калибровки не зависит от формы ограничивающего объема. В ходе тестового испытания проведена калибровка измерительной системы для измерений трехмерной геометрии объекта, помещенного в трубу из оргстекла с поперечным сечением 200×200 мм и толщиной стенок 20 мм. В результате достигнута точность измерения трехмерной геометрии плоского объекта 12 мкм.

ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАЛЕДИ МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ С ПРЕЛОМЛЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВЗуев В.О.^{1,2}, Двойнишников С.В.¹, Рахманов В.В.¹, Садбаков О.Ю.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Среди задач измерения трехмерной геометрии объекта особое место занимает контроль геометрических параметров наледи. Решение данной научно-технической задачи необходимо для поиска оптимального метода борьбы с обледенением и как результат решение проблемы образования наледи в ряде областей: ветроэнергетика, авиация, судоходство.

Так как применение контактных методов измерения трехмерной геометрии объекта невозможно в случае наледи, то актуально применение бесконтактных оптических технологий. Для этого стенки объема, где моделируются условия обледенения и размещается экспериментальный объект, делаются прозрачными.

Среди оптических методов измерения трехмерной геометрии объекта метод фазовой триангуляции получил широкое применение и существенный уровень развития благодаря ряду преимуществ: высокая скорость и точность измерения, возможность измерения динамично движущихся объектов, возможность адаптации конфигурации системы к измерительному объему и внешним пространственным ограничителям. Описанные факты делают перспективным применение метода фазовой триангуляции для измерения трехмерной геометрии наледи, однако требуется адаптация данного метода для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов.

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Требуется решение широкого спектра задач от разработки и настройки измерительной системы до создания программной части комплекса для расчета и анализа геометрических параметров наледи.

Для применения метода фазовой триангуляции в условиях преломления оптических сигналов разработан специальный метод калибровки измерительной системы. В ходе калибровки устанавливается взаимно-однозначное соответствие между координатами изображения фотоприемника, фазой модулирующей синусоиды (x_c , u_c , ϕ) и трехмерными координатами (X , Y , Z). Установленное взаимно-однозначное соответствие учитывает факт наличия пространственного ограничителя, вызывающего непрямолинейное распространение оптических сигналов.

Для достижения максимальной точности измерения трехмерной геометрии наледи разработан программный комплекс для подбора оптимальных параметров измерительной оптической системы. Поддержана возможность анализа работы метода фазовой триангуляции, на основании чего становится воз-

можным сделать вывод о применимости текущих настроек оптической системы. Разработанный программный комплекс также реализовывает возможность определения целевой метрики качества работы измерительной системы (точности измерения в мм) на основании измерения трехмерной геометрии плоского объекта.

Для расчета и анализа геометрических параметров наледи разработан независимый программный комплекс. В ходе работы комплекса восстанавливаются полигональные поверхности объекта до и после обледенения. Далее для каждой области исходной поверхности рассчитывается локальная толщина наледи, равная расстоянию до поверхности после обледенения по направлению нормали к полигону. Итоговым этапом работы комплекса является сохранение вычисленных геометрических параметров наледи и отображений статистических данных толщины наледи.

Для диагностики геометрических параметров наледи на экспериментальной уменьшенной модели ветроэнергетической установки, помещенной в объем с моделируемыми условиями обледенения, разработана измерительная система на основе метода фазовой триангуляции. В качестве измерительного объема выступает труба из оргстекла с поперечным сечением 200×200 мм и толщиной стенок 20 мм. Характерный размер измерительного объема 100×100×60 мм. Измерительная система включала фотоприемник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифровой проектор Excelvan CL720 с разрешением 1280×800 и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см. Расстояние от источника освещения до объекта 60 см, от фотоприемника до объекта 125 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения 70°. В результате достигнута точность измерения 12 мкм. В ходе проведенных экспериментов по обледенения цилиндрической поверхности вычислены геометрические параметры наледи и рассчитаны статистические данные толщины ледяного нароста. Характерная толщина ледяного нароста составила 1.6 мм.

В результате разработан программно-аппаратный комплекс для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Работа комплекса верифицирована в случае измерения трехмерной геометрии наледи, образующейся на цилиндрической поверхности, помещенной в трубу из оргстекла с поперечным сечением 200×200 мм и толщиной стенок 20 мм. Достигнута точность измерения 12 мкм.

ДИАГНОСТИКА КИНЕМАТИКИ ПОТОКА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЛОПАТКИ В УСЛОВИЯХ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Кабардин И.К.¹, Окулов В.Л.¹, Гордиенко М.Р.¹, Двойнишников С.В.¹, Какаулин С.В.¹, Касьянов Д.В.², Зуев В.О.¹, Мухин Д.Г.¹, Степанов К.И.¹, Ледовский В.Е.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: ivankabardin@gmail.com

В настоящее время в Арктических регионах активно развивается ветроэнергетика. Большой проблемой в этом направлении является обледенение лопастей ветрогенератора. Образование слоя льда на лопастях снижает эффективность установки и её срок эксплуатации. К тому же отрыв кусков льда с кромки лопасти ветрогенератора во время работы может повредить строения и оборудование и влечет опасность жизни и здоровью людей. Существующие методы борьбы с обледенением не подходят для их использования в ветроэнергетике. Поэтому существует необходимость в разработке новых методов. Чтобы разработать эффективные методы диагностики и борьбы с обледенением, необходимо знать характеристики набегающего потока, в том числе скорость частиц в потоке на различном расстоянии от лопасти. При определении скорости частиц в газо-жидкостных средах хорошо себе зарекомендовал метод лазерной доплеровской анемометрии.

Целью этой работы является измерение профилей скорости частиц в набегающем на лопатку ветрогенератора потоке в условиях обледенения.

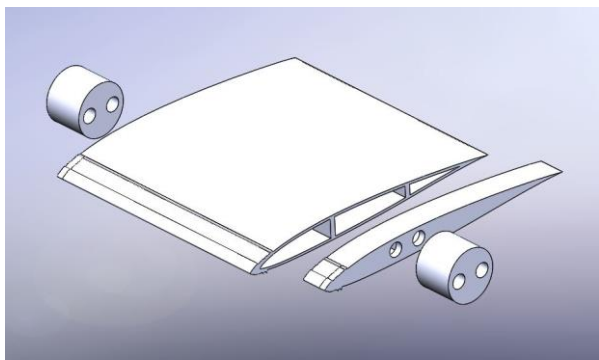


Рис. 1. Модель лопасти ветрогенератора.

Разработаны и изготовлены масштабируемые модели участков лопастей, имитирующих участки лопастей реальных ветрогенераторов. Выбраны профили лопаток на основе профиля SD7003, подходящих для исследования при числах Рейнольдса порядка 30 000–50 000. Также выбран профиль лопастей SD7032 подходящих для чисел Рейнольдса Re порядка 70 000–200 000.

Методика проведения конкретных исследований основана на физическом моделировании, когда исследование лопасти заменяется исследованием ее отдельных секций. Испытуемый экспериментальный объект, моделирующий секцию лопасти, устанавливается в проточную часть прозрачного канала на всю глубину и тестировался при разных скоростях набегающего потока

Для диагностики поля скорости использовался доплеровский метод измерения скоростей, основанный на измерении частоты лазерного излучения, рассеянного движущимся объектом. Использован измерительный комплекс ЛАД 08, предназначенный для прецизионного бесконтактного измерения скорости потоков. Устройство может эффективно применяться для диагностики газожидкостных многофазных мутных потоков в режиме обратного светорассеяния в гидро- и аэродинамических исследованиях.

Для того, чтобы смоделировать арктические условия использовался климатический стенд. Стенд представляет из себя трубу квадратного сечения 200×200 мм, изготовленную из оргстекла. Сжатый воздух подается в 4 трубы Ранка, где разделяется на холодный и горячий поток. Холодный поток подается внутрь стенда и набегаем на лопасть. Для повышения влажности в потоке использовались генераторы аэрозоля. Поток от каждого генератора аэрозоля предварительно исследовался с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии. В итоге в климатической камере достигались условия: скорость потока до 3 м/с, температура до минус 20°C, относительная влажность до 90%.

Проведены измерения средней скорости потока на расстояниях 50 мм 100 мм 150 мм в потоке перед лопаткой и на расстояниях 50, 100, 150, 200 и 250 мм в потоке после заднего края лопатки.

Список литературы

1. Меледин В.Г. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для 3D диагностики газожидкостных потоков ЛАД-078С-ФДА: техник. описание – Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2015.

Работа поддержана РФФ (грант РФФ№ 21-19-00205)

РАЗРАБОТКА МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Кабардин И.К.¹, Окулов В.Л.¹, Гордиенко М.Р.¹, Двойнишников С.В.¹, Какаулин С.В.¹,
Касьянов Д.В.², Зуев В.О.¹, Мухин Д.Г.¹, Степанов К.И.¹, Ледовский В.Е.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: ivankabardin@gmail.com

Развитие ветроэнергетики в Арктике привело к увеличению количества ветряных турбин в холодных климатических зонах. Обледенение лопаток приводит к изменению аэродинамики ротора, снижению выработки энергии, увеличению веса лопаток и нагрузке на ротор, что увеличивает износ и сокращает срок службы турбин. Рост наледи на лезвиях грозит неконтролируемым отрывом кусочков льда от кромок лезвий. Методы обнаружения обледенения необходимы для предотвращения негативных режимов работы ветрогенератора.

Существуют различные методы обнаружения льда, которые обладают различными достоинствами и недостатками. Существует необходимость в создании надежного метода обнаружения обледенения, с помощью которого можно определять наличие ледяных образований. Также существует необходимость в локальности измерений и возможности удаленного расположения измерительной аппаратуры.

В настоящей работе будет рассматриваться метод обнаружения льда, основанный на передаче микроволнового электромагнитного сигнала в диэлектрический слой, функционирующего как волновод, и отслеживания сигналов, передаваемых в волновод и отраженных от него.

За прототип взято устройство, которое разработано и запатентовано в США в 1977[1, 2, 3] году в качестве микроволнового детектора льда для воздушных судов. Данное устройство для обнаружения обледенения включает в себя: источник микроволновой электромагнитной энергии; средство связи с поверхностным волноводом для связи микроволновой энергии с поверхностным слоем льда таким образом, что лед функционирует как поверхностный волновод, а энергия передается вдоль слоя в направлении, параллельном слою и поверхности на котором он сформирован, и, по меньшей мере, частично отражается обратно к упомянутому соединительному средству при достижении конца слоя льда; средство контроля сигналов для сравнения микроволновых сигналов, переданных в ледяной слой и отраженных от него; при этом изменения количества льда приводят к соответствующим изменениям сигнала отраженной энергии.

Проведена разработка микроволнового датчика для диагностики обледенения. В основе датчика лежит метод обнаружения льда (рис. 1), основанный на передаче микроволнового электромагнитного сигнала в диэлектрический слой, функционирующего как волновод, и отслеживания сигналов, передаваемых в волновод и отраженных от него.

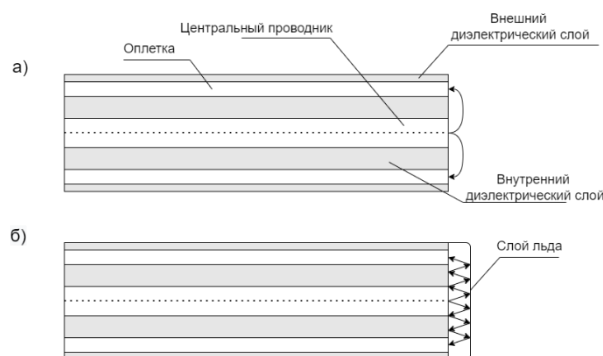


Рис. 1. Распространение волн на конце коаксиального кабеля: а) без диэлектрического слоя; б) с диэлектрическим слоем.

Слой льда обнаруживается путем передачи в него микроволновой электромагнитной энергии, подаваемой от источника микроволнового сигнала, и связывается со льдом посредством волновода. Проведена экспериментальная проверка работоспособности датчика на климатическом стенде. Измерены значения напряжения на выходе рефрактометра до начала образования ледяного слоя на конце коаксиального кабеля и после обледенения для определения сдвига по фазе и изменения отношения амплитуд. Показано, что образование льда сопровождается значительным изменением фазы сигнала, в то время как амплитуда меняется незначительно. Используя зависимость амплитуды выходного сигнала рефрактометра в зависимости от соотношения входного уровня и выходной фазы в зависимости от разности фаз на входе, определяем изменение входных параметров при обледенении кабеля. Описанный метод обладает рядом достоинств таких как простота, дешевизна, возможность установления датчика внутрь объекта на котором диагностируется обледенения.

Список литературы

1. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов по1 спец. «Электронные приборы и устройства». – М.: Высш. шк., 1990, 335 с.
2. Datasheet AD8302. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A
3. Datasheet AD8353. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A
4. Datasheet 1P610. Anaren Microwave. Pico Xinger 10dB Directional Coupler.
5. Pozar D.A. Microwave engineering. John Wiley and sons. Inc. 3rd ed. 700 P.
6. United States Patent № 4,054,25. Oct. 18, 1977. MICROWAVE ICE DETECTOR / Attorney, Agent, or Firm-Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Utecht.

Работа поддержана РФФ
(грант РФФ № 21-19-00205)

ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБАХ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРОВ

Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Воробьев М.А.

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

e-mail: kurdumov@itp.nsc.ru

Турбулентное течение в трубах и каналах характеризуется наличием широкого спектра пульсаций скорости. Одной из важнейших гидродинамических характеристик течения является напряжение трения на стенке, пропорциональное градиенту скорости на стенке. Как показывают результаты многочисленных исследований, в развитом турбулентном течении имеются интенсивные пульсации напряжения трения на стенке. Величина относительной интенсивности пульсаций, по данным работ [1, 2] изменяется в пределах $0,32 \div 0,40$. Все исследования, выполненные ранее, проводились в трубах больших диаметров, больше 30 мм. В цикле работ по исследованию газожидкостных течений [3, 4] отсутствуют данные о поведении пульсаций трения в однофазном потоке. Практически не изучено поведение пульсаций трения в трубах малых диаметров.

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование пульсационной структуры напряжения трения на стенке в турбулентном и переходном режимах течения в трубах различных диаметров.

Экспериментальная установка представляла замкнутый гидравлический контур, оснащенный системой термостатирования жидкости. Для измерения расхода жидкости использовалась система ротаметров и расходомерных диафрагм, позволяющая изменять расход жидкости в широких пределах. Измерение напряжения трения на стенке производилось электродиффузионным методом [3, 4]. В качестве рабочих участков гидравлического контура использовались трубы с внутренним диаметром от 4 до 32 мм. Во всех рабочих участках вмонтировались электродиффузионные датчики трения. Размер всех датчиков в направлении потока составлял 0,05 мм. Измерения на всех рабочих участках проводились по единой методике с использованием одной и той же измерительной аппаратуры. Калибровка датчиков трения производилась в широком диапазоне расходов жидкости с использованием корреляций Гагена-Пуазейля и Блазиуса для ламинарного и турбулентного течений, соответственно.

В ходе экспериментов на каждом рабочем участке производилась запись реализаций диффузионного тока датчика при различных расходах жидкости. Запись производилась в течение 30 с. Далее производилась линеаризация записей тока с использованием калибровочных зависимостей, после чего вычислялись среднее значение трения на стенке и среднеквадратичное значение пульсаций трения.

На рис. 1 приведена характерная зависимость относительных пульсаций трения в зависимости от числа Рейнольдса для рабочего участка с внутренним диаметром 4 мм. В ламинарной области ненулевые значения ε обусловлены неизбежными шумами гидродинамического типа. В области чисел Рейнольдса, соответствующих ламинарно-турбулентному переходу, имеется значительный рост ε . Это связано с перемежающимся характером сигнала датчика. Наконец, в области чисел Re более 4000 происходит плавное снижение относительной интенсивности пульсаций с увеличением числа Рейнольдса.

Следует отметить, что значения $\varepsilon 0,32 \div 0,36$, отмеченные ранее в работах [1, 2] для труб большого диаметра, в наших экспериментах реализуются только для рабочего участка с диаметром 32 мм. Для участков с меньшим диаметром значения ε в турбулентном режиме течения существенно ниже.

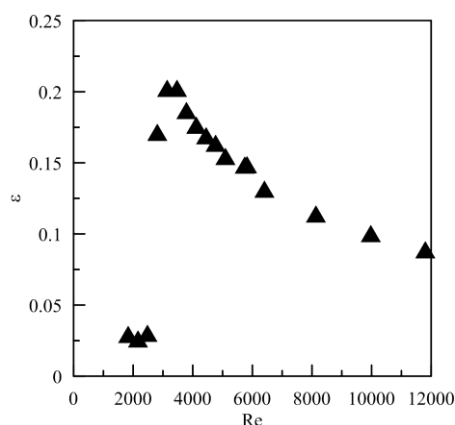


Рис. 1. Зависимость относительных пульсаций трения от числа Рейнольдса для круглой трубы внутренним диаметром 4 мм.

Список литературы

1. Mitchell J.E., Hanratty T.J. Study of turbulence at a wall using an electrochemical wall shear stress meter. // J. Fluid Mech, 1966, V. 26, P. 199–221.
2. Alfredsson P.H., Johansson A.V. et al. The fluctuating wall-shear stress and the velocity field in the viscous sublayer. // Phys. Fluids, 1988, V. 31, P. 1026–1033.
3. Накоряков В.Е., Кашинский О.Н. Турбулентная структура двухфазных газожидкостных потоков. // Теплофизика и аэромеханика, 1997, т. 4, № 2, С. 115–127.
4. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Randin V.V., Timkin L.S. Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes // J. Fluids Eng., 1996, V. 118, P. 377–382.

Работа выполнена в рамках госконтракта с ИТ СО РАН

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕР ДЛЯ 3D-PTV МЕТОДА

Кирчанова Е.Е.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: ekirchanova@inbox.ru

Развитие метода регистрации трехмерных траекторий трассерных частиц на основе двумерных проекций (изображений) с нескольких различных камер является актуальной задачей для гидро- и аэродинамики. Существует несколько часто используемых решений. Одними из популярных являются трехмерная анемометрия при слежении за отдельными частицами (3D-PTV) [1] и томографический метод кросс - корреляционной анемометрии по изображениям частиц (Томо-PIV) [2]. Первый из них позволяет отследить местоположение и скорость каждой отдельной частицы и при этом обладает малой точностью. Второй восстанавливает объемные изображения, по которым определяет групповую скорость частиц в потоке, что требует большое количество вычислительных мощностей.

Недавно был предложен метод, являющейся комбинацией этих двух методов – метод Shake-The-Box (STB) [3]. Метод предполагает съемку изображений с высоким временным разрешением. На первых четырех шагах используется метод Томо-PIV с грубой сеткой и предсказывает основное направление движения частиц, после чего методом 3D-PTV определяются частицы, движущиеся с этой скоростью (рис. 1). В последующих итерациях предсказывается траектория каждой такой частицы в аналитической функции с уточнением её координат по проекциям в следующие моменты времени. После этого частицы с известными траекториями удаляются с изображений и процедура повторяется вновь.

Метод имеет высокую точность определения положения частиц, позволяет работать с высокими плотностями засева потока и восстанавливать детальную картину движения потока. Однако, у алгоритма есть недостаток: для его работы очень важна точность пространственной калибровки камер, необходимо, чтобы ошибка ее была не более одного пикселя.

Пространственная калибровка камеры – это нахождение ее внутренних и внешних параметров, таких как фокусное расстояние, матрица поворота и матрица сдвига относительно начала координат, а также коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии. Для расчета калибровки используются изображения калибровочной «мишени». Большинство алгоритмов калибровки для работы необходимо знать сопоставление между местонахождением маркера в пространстве и на изображении (в пикселях). Затем эта информация используется для нахождения параметров камеры.

На сегодняшний день самой известной является калибровка, разработанная Чжэнью Чжан [4]. Она реализована во многих библиотеках программирования и часто используется. Тем не менее она имеет

недостаток, с увеличением измеряемой области, возрастает ошибка калибровки, которая никак не корректируется.

Целью работы являлось увеличение точности пространственной калибровки камер для метода STB. В ходе работы необходимо было реализовать метод пространственной калибровки камер, а потом осуществить подстройку по изображениям «мишени» для уменьшения ошибки.

Сначала вычисляется пространственная калибровка с помощью метода Чжэнью Чжан. Затем делается коррекция калибровки камер с использованием трассерных частиц. Это коррекция возможна, если количество камер три и более. Работа идет с парами камер. Положение частиц предсказывается с помощью каждой возможной пары и сравнивается со всеми остальными парами. Если есть различие в предсказании, то это и есть погрешность калибровки, которая компенсируется.



Рис. 1. Схема STB.

Список литературы

1. Virant, Marko, and Themistocles Dracos. «3D PTV and its application on Lagrangian motion». *Measurement science and technology* 8.12 (1997): 1539.
2. Atkinson, Callum, and Julio Soria. «An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry». *Experiments in Fluids* 47.4 (2009): 553–568.
3. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities // *Experiments in fluids*. – 2016. – Т. 57. – №. 5. – С. 1–27.
4. Zang Z. A flexible new technique for camera calibration determination of thermal properties of composting bulking materials // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2000. – С. 1330–1334.

Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00803)

СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОСТРУЙНЫХ КЛАСТЕРНЫХ ПОТОКОВ ПО ПОПЕРЕЧНОМУ ПРОФИЛЮ ИНТЕНСИВНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА

Коробейщиков Н.Г.

Новосибирский государственный университет

e-mail: korobei@ci.nsu.ru

Газоструйные источники кластерных пучков представляют большой интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения практических приложений. В частности, они являются основой для развития новых ионно-кластерных технологий диагностики и модификации поверхности различных материалов: полировка до субнанометровой шероховатости, прецизионное травление, наноструктурирование и т.д. [1, 2].

Основными параметрами кластерных пучков являются средний размер кластеров, плотность потока или интенсивность, соотношение мономеров и кластеров. Сложность процессов формирования кластерного пучка не позволяет определить все параметры аналитически. Поэтому активно используются различные экспериментальные методы диагностики [3, 4]. Известные диагностические методы как правило позволяют определить только один параметр, чаще всего средний размер кластеров. Для более полного описания необходимо использовать комбинацию взаимодополняющих методов, чаще всего оптических. При этом из-за малых абсолютных размеров кластеров для проведения таких измерений необходимо сложное высокочувствительное оборудование [5].

В работе приведено описание экспериментального метода диагностики сверхзвуковых потоков газовых кластеров, основанного на измерении поперечного профиля полной (массовой) интенсивности молекулярного пучка. Измерения выполняются на фиксированном расстоянии вниз по потоку от скиммера путем перемещения поперек пучка закрытого датчика со входной апертурой (щелью). Средний размер кластеров N рассчитывается как отношение поперечных скоростных отношений кластеров S_N и мономеров S_1 , которые в свою очередь определяются из уширения поперечных профилей кластерной Δ_N и мономерной Δ_1 компонент пучка [3, 4]:

$$N = \left(\frac{S_1}{S_N} \right)^2 = \left(\frac{\Delta_N}{\Delta_1} \right)^2 \quad (1).$$

Определенный таким образом средний размер кластеров N позволяет определить другие характеристики кластерного пучка: плотность потока кластеров, соотношение мономеров и кластеров.

Описываемый метод можно использовать для диагностики кластерных пучков любых чистых газов, а также газовых смесей, состоящих из легкого газа-носителя и конденсирующейся примеси. При этом не требуется построения специальных моделей или определения специфических эмпирических констант. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с данными других авторов, полученных различными экспериментальными методами.

На рис. 1 приведен характерный пример поперечных профилей полной интенсивности молекулярного

пучка аргона, измеренные при фиксированных давлениях торможения P_0 . Для удобства сравнения все профили отнормированы к 1 в максимуме мономерной компоненты. При малых давлениях торможения профиль интенсивности широкий и гладкий. С ростом P_0 на оси пучка появляется узкий пик, отражающий распределение кластеров как результат Маховской фокусировки. Видно, что при больших P_0 интенсивность кластерной компоненты почти в 50 раз превышает интенсивность мономеров.

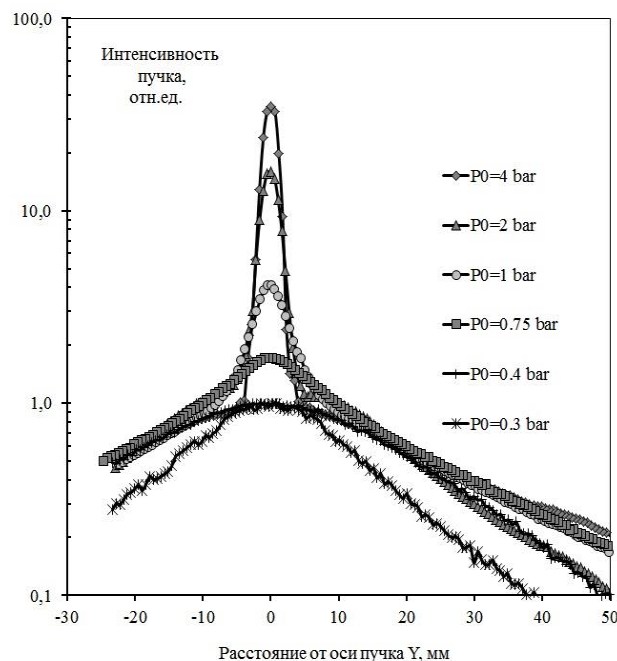


Рис. 1. Профили интенсивности в кластерном пучке аргона при различных давлениях торможения P_0 .

Список литературы

1. Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T. Progress and applications of cluster ion beam technology // *Curr. Opin. Solid State Mater.* 2015. V. 19. P. 12–18.
2. Иешкин А.Е., Толстогузов А.Б., Коробейщиков Н.Г., Пеленович В.О., Черныш В.С. Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // *Успехи физических наук.* 2022. Т.192. С. 563–582.
3. Korobeishchikov N.G., Penkov O.I. Simple method to gas cluster size determination based on molecular beam cross-section // *Vacuum.* 2016. V. 125, No. 3. P. 205–208.
4. Korobeishchikov N.G., Roenko M.A., Tarantsev G.I. Mean Gas Cluster Size Determination from Cluster Beam Cross-Section // *Journal of Cluster Science.* 2017. V. 28, Is. 5. P. 2529–2547.
5. Jang D.G., You Y.S., Milchberg H.M., Suk H., K. Y. Kim. All-optical characterization of cryogenically cooled argon clusters in continuous gas jets // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. 021906.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00046)

СТЕНД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВНЕШНЕГО ВИДА ЭТАЛОННЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ИМИТАТОРОВ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК РЕАКТОРОВ ВОДО-ВОДЯНОГО ТИПА

Куликов Д.В., Павлов В.А., Бакакин Г.В., Двойнишников С.В.

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

e-mail: t913@yandex.ru

Требования к качеству ядерного топлива постоянно возрастают в связи с необходимостью повышения безопасности эксплуатации атомного реактора и увеличением сроков использования ядерного топлива. Параметры конструкции ядерного топлива, которые непосредственно влияют на безопасность и эффективность работы атомного реактора, относятся к критическим параметрам и подлежат 100% (сплошному) выходному контролю на соответствие техническим требованиям.

Топливные таблетки (ТТ) из диоксида урана UO_2 являются одной из основных составляющих тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Для реакторов водо-водяного типа они представляют собой керамические цилиндры диаметром ~ 8 мм и высотой $9\div 14$ мм. ТТ как керамические изделия имеют повышенную хрупкость и в процессе их изготовления на поверхности могут образовываться дефекты: сколы, трещины, поры, облой, непрошлифовка. Для выявления и отбраковки ТТ с недопустимыми по размерам дефектами их подвергают контролю после операции шлифования. При этом отбраковка ТТ происходит в соответствии с «Атласом определения и критериев приемки для дефектов топливных таблеток».

До недавнего времени контроль внешнего вида на предприятиях изготовления ТТ производился операторами визуально с ручной отбраковкой дефектных изделий. Такой контроль характеризуется низкими качеством и производительностью.

При разработке оптико-электронных систем контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток, как правило, разработчики ограничены в доступе к урановым топливным таблеткам из-за вопросов радиационной безопасности и правил хранения радиоактивных материалов. Поэтому, задача разработки технологии изготовления эталонных калибровочных имитаторов топливных таблеток реакторов водо-водяного типа является актуальной и востребованной для развития оптико-электронных систем диагностики дефектов топливных таблеток.

При разработке технологии изготовления эталонных калибровочных имитаторов топливных таблеток в качестве образцов использовались изображения урановых топливных таблеток, полученные фотоприемниками при стационарных условиях освещения на контрольном стенде. Далее, при изготовлении имитаторов их внешний вид на контрольном стенде итерационно приводился к внешнему виду схожему к внешнему виду урановых таблеток. В качестве опорных параметров оценивалась средняя яркость поверхности и среднеквадратичное отклонение яркости по всей боковой поверхности таблетки.

В контрольном стенде применен фотоприемник Imaging Source DMK33GX264 с объективом TCL 5026 5MP. Осветитель на основе монохроматического светодиода мощностью 10 Вт с длиной волны 450 нм. Расстояния между источником, приемником освещения и таблеткой фиксированы и составляли 20 см.

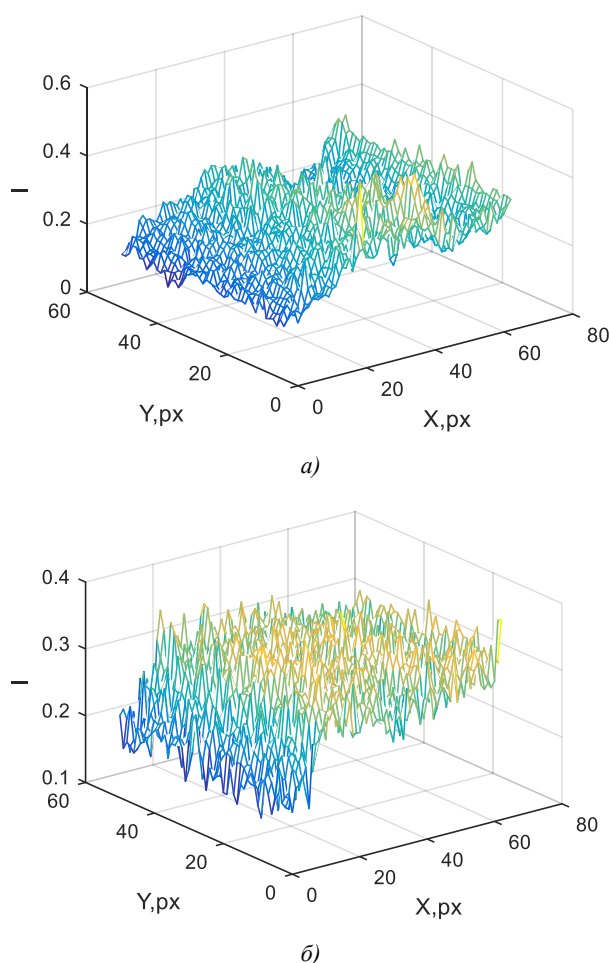


Рис.1. Распределения интенсивности, зарегистрированные на изображении урановой таблетки (а) и созданного стального имитатора (б).

В результате разработан стенд для контроля внешнего вида эталонных калибровочных имитаторов топливных таблеток с дефектами боковой поверхности и без них. Стенд позволяет выполнять контроль внешнего вида и светорассеивающих свойств боковой поверхности эталонного имитатора непосредственно в процессе механической обработки. Используя разработанный стенд, созданы калибровочные имитаторы топливных таблеток для разработки, настройки и калибровки узла контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток для уранового производства Ульяновского металлургического завода.

**ПРИМЕНЕНИЕ УЗКОПОЛОСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
В 3D ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ АНЕМОМЕТРАХ****Куликов Д.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Двойнишников С.В.**

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

e-mail: t913@yandex.ru

Измерение полного вектора скорости в аэро- и гидродинамических экспериментах является актуальной задачей. Одним из методов позволяющим измерить трёхкомпонентный вектор скорости потока является метод на основе лазерного доплеровского анемометра (ЛДА).

В данной работе использовался трёхкомпонентный лазерный доплеровский анемометр ЛАД-056 на основе двух коммутационных полупроводниковых 2D ЛДА с адаптивным временным разделением сигналов в оптических каналах. Каждый из приборов одновременно принимает рассеянный свет только от своего источника излучения за счёт использования оптической схемы с ортогональным расположением поляризации лазерного излучения и применения поляризационных фильтров с линейной поляризацией. Восстановление полного вектора скорости обеспечивается сведением в одну точку измерительных зон приборов, размещённых под углом друг к другу.

Такой метод построения трёхкомпонентного ЛДА зарекомендовал себя как работоспособный и надёжный. Однако в условиях слабой интенсивности приёмного оптического сигнала (в средах в высоком светопоглощении) возникает необходимость работать с высоким коэффициентом усиления фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), используемого в качестве фотоприёмника. В таких задачах усиление ФЭУ может достигать величины 1 000 000. Поляризационный фильтр, используемый в данных приборах, обеспечивает оптическую фильтрацию сигнала с ортогональной поляризацией на уровне 10 000, что недостаточно для надёжного подавления сигнала от комплементарного прибора при таких усилениях сигнала на ФЭУ. Кроме того, на светотражающих частицах может возникнуть деполяризация отражённого сигнала, что ещё больше ухудшит оптическую фильтрацию и снизит соотношение сигнал/шум в приёмном тракте ЛДА.

В данной работе предложен метод улучшения оптической фильтрации трёхкомпонентного лазерного доплеровского анемометра ЛАД-056 для подавления взаимного влияния сигналов комплементарных приборов на основе применения монохроматических источников оптического излучения с близкими значениями длин волн и узкополосными оптическими фильтрами.

Метод основан на модернизации лазерного излучателя на одном из двухкомпонентных ЛДА с целью изменения длины волны и добавления узкополосной оптической фильтрации для большего подавления взаимного влияния сигналов комплементарных модулей.

В работе предложено разнести длины волн двух двухкомпонентных ЛДА. Это позволит улучшить оп-

тическую развязку двух приборов за счёт полосовой оптической фильтрации в дополнение к поляризации. Были выбраны лазерные диоды с номинальными длинами волн 638 и 660 нм. Такой выбор длин волн позволяет не перестраивать существенно оптические элементы приборов, оптимизированных на длину волны 660 нм. Кроме того, это позволит проводить измерения в средах с показателем преломления отличным от единицы. Так для воды на этих длинах волн показатели преломления равны 1,332 и 1,331 соответственно. При заглублении в поток на 100 мм, расхождение точек измерения, вызванное разницей коэффициентов преломления, будет не более 0,1 мм, что является приемлемым для многих экспериментальных задач.

Так как в данных ЛДА используются полупроводниковые лазерные диоды, то для уменьшения температурных дрейфов длины волны излучения ($\sim 0,2$ нм/°C) лазерные модули в ЛДА термостабилизированы на уровне $40 \pm 0,5$ °C. При температуре 40°C и оптической мощности равной 120 мВт, длины волн излучения составили 643 и 664 нм. Для дополнительной оптической фильтрации применены полосовые оптические фильтры с центральными частотами, соответствующими длинам волн 638 и 660 нм.

Выполнены измерения характеристик пропускания оптического излучения обоих фильтров в зависимости от длины волны. что фильтр на 660 нм будет ослаблять излучения лазера на длине волны 643 нм в 180 раз, а фильтр на 638 нм ослабит излучение от на длине волны 664 нм в более чем 1000 раз.

Такая фильтрация в дополнение к поляризационной обеспечит ослабление сигналов с комплементарных ЛДА более чем 1 000 000 раз, что позволит решить проблемы взаимовлияния сигналов лазерного излучения.

В работе предложен предложен метод подавления взаимного влияния сигналов лазерного излучения комплементарных ЛДА в схеме получения трехкомпонентного анемометра. Метод основан на применении монохроматических источников оптического излучения с близкими значениями длин волн и узкополосными оптическими фильтрами.

Показано, что применение данного метода позволит обеспечить дополнительную фильтрацию сигналов в трехкомпонентных лазерных доплеровских анемометрах на 2–3 порядка. Также данный метод будет обеспечивать эффективную фильтрацию даже в случае деполяризации излучения от светорассеивающих частиц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОДОРОДНОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Молотов И.М.^{1,2}, Ямщикова Л.В.², Счастливцев А.И.², Проталинский О.М.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

e-mail: i@roznin.ru

В настоящее время дальнейшие перспективы развития изолированных от централизованных электросетей территорий страны за счет применения распределенной генерации связываются с более широким использованием возобновляемой энергетики и с развитием накопителей энергии [1, 2]. Одной из наиболее эффективных технологий может стать распределенная генерация электроэнергии на основе фотоэлектрических панелей с гибридным аккумулированием на основе электрохимической аккумуляторной батареи при краткосрочном хранении и с использованием водорода в качестве энергоносителя для долгосрочного хранения энергии [3, 4].

В этой связи была поставлена задача разработать технологическую модель, которая обеспечит согласованную работу фотоэлектрических панелей с водородным аккумулирующим комплексом. Основная задача моделирования заключается в расчете энергетического баланса энергоустановки, где в качестве входных данных выступают технические характеристики оборудования.

Моделирование осуществлялось для следующей конфигурации оборудования энергоустановки:

- фотоэлектрические панели;
- инвертор с контроллером заряда аккумуляторной батареи;
- дистиллятор;
- генератор водорода;
- газгольдер низкого давления;
- газовые баллоны высокого давления;
- компрессорная установка для сжатия водорода;
- топливный элемент.

Состав элементов энергоустановки предполагает, что хранение водорода осуществляется наиболее распространенным методом – в сжатом газообразном виде.

Работа рассматриваемой энергоустановки может быть организована следующим образом. Избыточной электроэнергией от солнечных панелей посредством multifunctional инвертора заряжается аккумуляторная батарея и производится электролиз воды. Водород нарабатывается генератором водорода методом электролиза воды, которая поступает из дистиллятора, и далее накапливается в газгольдере. Когда газгольдер наполнен водородом, количество которого ограничено выходным давлением генератора водорода, начинает работать водородный компрессор. Он сжимает водород путем перекачивания его из газгольдера – резервуара большего объема, но с меньшим давлением, в газовые баллоны высокого давления для долгосрочного хранения. Этот резерв может быть использован в период сезонной высокой

облачности для выработки электроэнергии из накопленного водорода с помощью топливного элемента.

Входными параметрами модели являются основные технические характеристики, указанные в соответствующих технических паспортах на оборудование: номинальная производительность, номинальная потребляемая мощность в стационарном режиме работы и др. Работа оборудования симулируется только при номинальных режимах его работы. Такое приближение объясняется тем, что нестационарными процессами, такими как пусковые токи электролизера и компрессора, период выхода на стабилизированный режим работы генератора водорода и топливного элемента, можно пренебречь, поскольку характерное время протекания этих процессов мало по сравнению с временем симуляции, которое может составлять от недели до нескольких сезонов.

Моделирование осуществлялось в графической среде программирования Simulink на базе Matlab с использованием библиотеки Simscape. Модель представляет собой совокупность подсистем, моделирующих элементы энергоустановки, взаимодействующие между собой посредством физических и логических связей.

Алгоритм модели реализует согласованную работу фотоэлектрических панелей, банка электрохимических аккумуляторов и комплекса оборудования для водородного аккумулирования энергии, где расчет энергетического баланса установки опирается на уровень заряда электрохимических аккумуляторов и термодинамические параметры водорода в хранилище. Показатель эффективности энергоиспользования является отношением суммы выработанной электроэнергии и накопленной в аккумуляторах к сумме подведенной электроэнергии в течение времени симуляции модели.

Список литературы

1. Lombardi P. et al. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? //Renewable Energy. – 2016. – Т. 90. – С. 532–541.
2. Ermolenko B. V. et al. Wind and solar PV technical potentials: Measurement methodology and assessments for Russia //Energy. – 2017. – Т. 137. – С. 1001–1012.
3. Dunikov D. O. Russia's view on development of novel and renewable energy sources, including hydrogen energy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Т. 4. – №. 40. – С. 2062–2063.
4. Egeland-Eriksen T., Hajizadeh A., Sartori S. Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives //international journal of hydrogen energy. – 2021. – Т. 46. – №. 63. – С. 31963–31983.

СЕНСОР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ВОДЫ**Смовж Д.В.^{1,2}, Сорокин Д.В.^{1,2}, Шатилов Д.А.^{1,2}**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск² Новосибирский государственный университет

e-mail: d.sorokin@g.nsu.ru

Важной современной проблемой является измерение гидродинамических параметров потока жидкости с минимальным влиянием на измеряемый поток и малым временем отклика. Возможным решением является миниатюризация датчика, для чего может быть использован такой уникальный по своим свойствам материал как графен. Будучи однослойным материалом толщиной в атом, графен чрезвычайно чувствителен к внешним воздействиям и практически любое взаимодействие будет оказывать влияние на его электронную структуру. Столь высокая чувствительность открывает возможность создания многофункциональных гидродинамических датчиков. В работе [1] проведено экспериментальное исследование проводимости графена, помещенного в стационарное водное окружение. Установлено, что при погружении графеновой пластины в воду происходит резкий рост сопротивления с последующим плавным выходом на стационарное значение. По зависимости удельного сопротивления от температуры оценены значения ширины запрещенной зоны, возникающей в обводненном графене и показано, что обводненный графен ведет себя подобно полупроводнику. На основе анализа данных молекулярно-динамического моделирования, предложен возможный механизм, отвечающий за открытие запрещенной зоны в графене. Данный механизм связан с появлением неоднородного тангенциального электрического поля в плоскости графеновой пластины, создаваемого молекулами воды, структурирующимися вблизи поверхности графена. Плавный выход на стационарное значение объяснен возникновением дальних корреляций вблизи макроскопических дефектов поверхности или диффузией молекул воды в области поверхности образца, изначально занятые воздухом.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию электрофизических свойств графена при движении дистиллированной воды. Для установления характера зависимости изменения сопротивления графенового образца от скорости потока дистиллированной воды, приведённой в контакт с ним, создан экспериментальный стенд с использованием канала прямоугольной формы. В результате движения воды вдоль поверхности графена, расположенного на боковой стенке канала, обнаружен эффект резкого уменьшения сопротивления при запуске потока и дальнейший выход на первоначальное сопротивление при выключении потока. Приведены характерные времена отклика сенсора на возмущения в скорости жидкости. Построена корреляция между амплитудой отклика и скоростью дистиллированной воды. Теоретически анализ взаимодействия графеновой пластины с движущимся потоком молекул проведено в программе CHARMM, дополненной силовыми полями charmm36m. Результаты молекулярно-динамического моделирования показали, что создание направленного движения вдоль такой плоскости приводит к перераспределению молекул в приповерхностном слое, что приводит к изменению наведённого электрического поля в плоскости графена, меняя его проводимость и ширину запрещенной зоны.

Список литературы

1. Andryushchenko V. et al. Graphene-polymer composite conductivity in air and water // Applied Surface Science. – 2021. – Т. 567. – С. 150843.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-29-20225)*

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Токарев М.П.^{1,2}, Ничик М.Ю.¹, Гобызов О.А.¹, Дулин В.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

Струи широко используются в различных областях техники и технологий для охлаждения поверхностей – в авиации, энергетике, химической промышленности. Системы струйного охлаждения позволяют получить высокие значения интенсификации теплообмена с преимуществом до 3–5 раз, если сравнивать с пленочным или конвективным охлаждением.

Одним из способов активного управления теплообменом и структурой течения при струйном охлаждении является пульсирующая подача потока в струе. Выводы разных авторов по эффектам импульсного управления импактными струями часто противоречат друг другу [1].

В данной работе рассматривается геометрия с фиксированным расстоянием от края сопла до стенки $H/D=2$ и режимы с умеренными числами Рейнольдса (4 000–12 500) [2]. Оптимизация выполняется посредством направленного перебора пульсирующих режимов с использованием алгоритмов имитирующих эволюцию живых организмов для достижения предварительно выбранной цели, например, улучшения теплоотдачи. Полученные законы управления используются для контроля системой возмущения расходом в струйном гидродинамическом стенде на основе электродинамического вибратора. Законы управления могут параметризоваться сигналом с термоанемометрического датчика скорости расположенным вблизи стенки в области отрыва потока на каждый такт управления длительностью 4 мс. Этим достигается наличие обратной связи в схеме активного управления при использовании оптимизации закона управления путем составления произвольной суперпозиции из базисных функций. Оценка качества получаемых законов управления выполнялась панорамными измерениями в реальном времени поля температур тепловизором FLIR Titanium 570M для оптимизации теплообмена и поля скорости с помощью онлайн PIV системы на камере IMPERX GEV-V0620M для увеличения скорости за зоной отрыва.

В работе также проведена PIV диагностика основных выявленных режимов управления струйным течением с использованием скоростной съемки камерой Photron FASTCAM SA5 и непрерывного лазера мощностью 3 Вт.

Проведенные эксперименты со струйным охлаждением подогреваемой стенки с использованием указанных методов оптимизации выявили следующие закономерности. Интенсификация локального теплообмена вблизи критической точки для струи происходит на высокоамплитудных низкочастотных возмущениях. При этом снижение амплитуды возмущений на той же частоте может приводить к обратной картине роста температуры на стенке относительно режима без управления (Рис 1). Снижение ин-

тенсивности теплообмена происходит на высокочастотных $St > 0.6$, высокоамплитудных возмущениях. Влияние сигнала обратной связи от датчика скорости в отрывной зоне вблизи стенки незначительно для цели интенсификации локального теплообмена. В то же время, исходя из полученных данных, обратная связь может быть использована для увеличения локальной температуры на стенке, за счет эффективного снижения когерентной составляющей турбулентного течения при умеренных числах Рейнольдса.

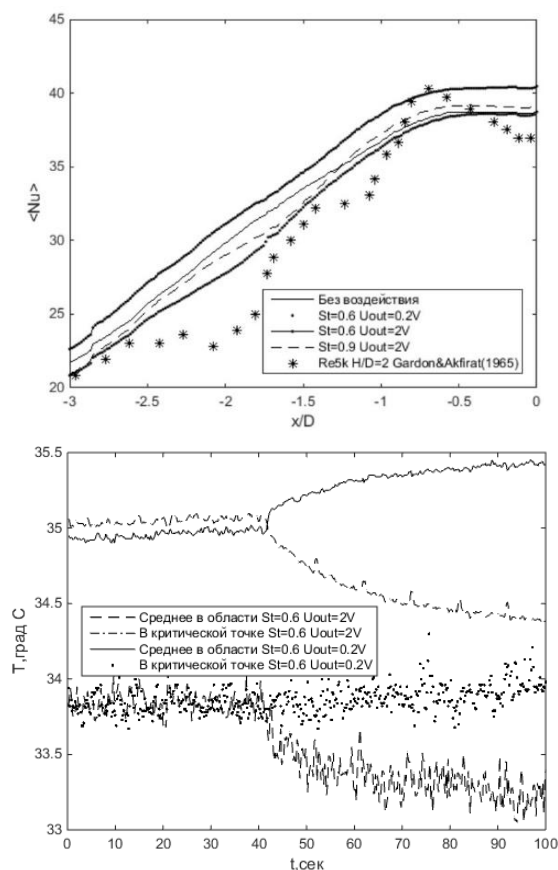


Рис. 1. Радиальный профиль среднего Nu для разных режимов управления, $Re=4000$ (сверху) и пример изменения температуры стенки после включения управления (снизу).

Список литературы

1. Carlomagno G.M., Ianiro A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: a review // Experimental thermal and fluid science. 2014. V. 58, P. 15–35.
2. Tokarev M.P., Nichik M. Yu., Gobyzov O.A., Abdurakipov, S.S., Duлин V.M. Study of the influence of an external flow rate perturbation on the vortex structure and heat transfer in impinging jets // In Journal of Physics: Conference Series 2021. V. 2057, No. 1. P. 012099.

Работа поддержана РФФИ
(грант № 20-08-01093)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СТАЦИОНАРНОГО ТЕРМООТРАЖЕНИЯ

Тхоржевский И.Л.^{1,2}, Тукмакова А.С.^{1,2}, Демченко П.С.^{1,2}, Новоселов М.Г.²,
Новотельнова А.В.², Ходзицкий М.К.¹¹ ООО «Тидекс», Санкт-Петербург² Университет ИТМО

e-mail: iltkhorzhevskiy@itmo.ru

Растущий интерес к исследованию низкоразмерных структур привел к развитию различных бесконтактных методов измерений теплопроводности. Методы термоотражения используются для оценки теплопроводности на основании анализа характеристик изменения коэффициента оптического отражения материала, нанесенного на поверхность образца. Переходные методы термоотражения в фазовой области (FDTR) [1] и во временной области (TDTR) [2] получили наибольшее распространение в измерениях теплопроводности тонких пленок.

В нашей работе исследуется метод стационарного термоотражения [3]. Во время измерения образец поглощает лазерное излучение источника накачки. Это приводит к устойчивому нагреву образца и повышению температуры. Энергия доставляется с помощью лазерных импульсов продолжительностью в десятки доли секунды. Изменение коэффициента отражения измеряется с помощью зондирующего источника и балансного детектора.

Собрана установка, проведены экспериментальные измерения теплопроводности калибровочных образцов. Схема установки приведена на рис. 1. Измерялась теплопроводность образцов кремния, германия, и ситалла. Результаты измерений коэффициента теплопроводности сопоставлены с результатами, полученными методом лазерной вспышки [4]. Данные измерения были проведены на производимой серийно, установке LFA-457 (Netzsch).

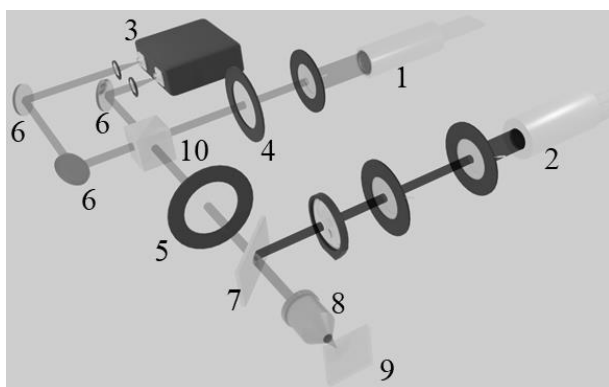


Рис. 1. Схема предлагаемой установки. 1 – сканирующий источник, 2 – источник накачки, 3 – балансный детектор, 4, 5 – полу- и четвертьволновые пластинки, 6 – зеркала, 7 – холодное зеркало, 8 – 20х микрообъектив, 9 – образец, 10 – делительная призма.

Проведено численное моделирование процесса нагрева образцов методом конечных элементов. В ходе моделирования рассчитывалась температура нагрева образца и поле распределения температуры. Свойства материалов, необходимые для моделирования – показатель преломления и коэффициент поглощения были рассчитаны с использованием коэффициентов отражения и пропускания, полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

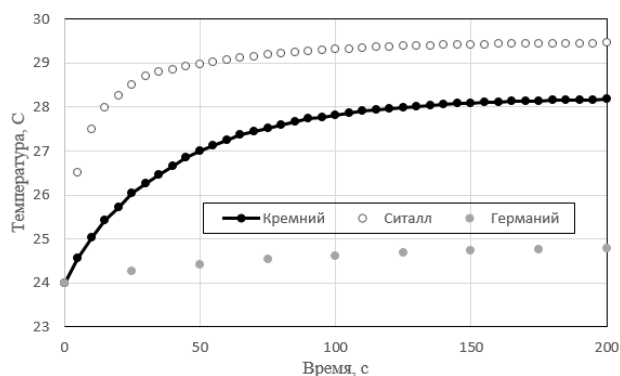


Рис. 2. Результат расчета максимальной температуры образцов кремния, ситалла и германия

Метод стационарного термоотражения может быть использован для измерения теплопроводности различных материалов выполненных как в виде объемных образцов так и низкоразмерных структур.

Список литературы

- Schmidt A. J., Cheaito R., Chiesa M. A frequency-domain thermoreflectance method for the characterization of thermal properties //Review of scientific instruments. – 2009. – Т. 80. – №. 9. – С. 094901.
- Paddock C. A., Eesley G. L. Transient thermoreflectance from thin metal films //Journal of applied physics. – 1986. – Т. 60. – №. 1. – С. 285–290.
- Braun J. L. et al. A steady-state thermoreflectance method to measure thermal conductivity //Review of Scientific Instruments. – 2019. – Т. 90. – №. 2. – С. 024905.
- Parker W. J. et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity //Journal of applied physics. – 1961. – Т. 32. – №. 9. – С. 1679–1684.

Работа поддержана РФФ
(грант 22-22-00597)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ АДАПТИВНОЙ ТРЕКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Цой М. А., Шарифуллин Б. Р., Наумов И.В.

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

e-mail: Miketsoy@gmail.com

Исследование различных режимов течений с целью их практического применения является важнейшим направлением для оптимизации и улучшения тепло и массообменных процессов. Это особенно актуально при разработке вихревых аппаратов в химических, биологических и энергетических технологиях, где с помощью закрученных потоков можно эффективно смешивать различные жидкости или получать равномерные концентрации реагентов [1, 2].

Сравнительно недавно внимание исследователей привлекли двух-жидкостные вращающиеся течения связи с развитием вихревых аэрированных биореакторов, где кислород из воздуха (верхняя среда) диффундирует через поверхность раздела в нижнюю рабочую жидкость (воду), циркуляция которой доставляет кислород к биологической культуре, обеспечивая её быстрый рост [3]. Для исследования гидродинамики сложного циркуляционного движения в биореакторе удобно использовать вертикальный цилиндрический контейнер, заполненный двумя несмешивающимися жидкостями, где вихревое движение модельной среды генерируется вращением одного из торцевых дисков через промежуточную гидродинамическую среду. Было установлено, что режимы течения оказались богаты парадоксальными свойствами, которые представляют не только практический, но фундаментальный интерес [4].

Можно утверждать, что важным, а порой и определяющим элементом к пониманию и интерпретации гидродинамических процессов является “адекватная” визуализация изучаемого явления. Для проведения экспериментальных исследований вихревых структур разного типа методами бесконтактной диагностики был разработан и создан программно-аппаратный комплекс (рисунок 1, 2). В данном комплексе используется разработанная авторами адаптивная трековая визуализация со скользящим средним и автоматическим вычетом фоновой засветки потока [4, 5].

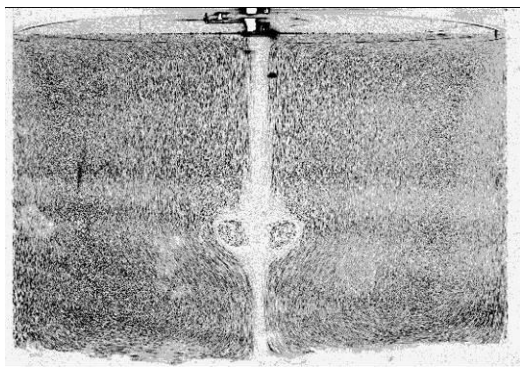


Рис. 1. Пример трековой картины течения, экспозиция – 100 мс, скользящее окно осреднения – 100 кадров.

С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса была проведена адаптация и апробация бесконтактной трековой диагностики вихревого течения, позволяющая анализировать течение одно- и двухкомпонентных несмешиваемых жидкостей в режиме реального времени. Обработка усовершенствованного метода трековой диагностики течения проводилась для различных характерных режимов замкнутого вихревого и циркуляционного течения.

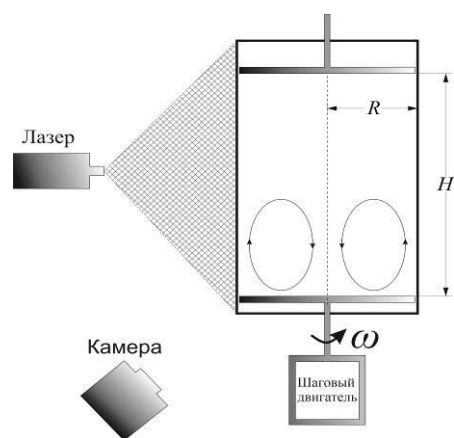


Рис. 2. Схема экспериментальной установки, $R = 50$ мм – радиус контейнера, $H = 70$ мм – высота контейнера.

Список литературы

1. Алексеев С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 2005. 504 с.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987 590 с.
3. Геворгиз Р.Г., Уваров И.П., Репков А.П., Железнова С.Н. Вихревое перемешивание культур микроводорослей // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2021. – Т. 6, no. 4. – С. 559–563.
4. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32(6). P.061706.
5. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Naumov I.V. Visualization the different type of vortex breakdown in conical pipe flow with high cone angle // Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2021, Vol. 28(2), P. 43–53.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00083)



СЕКЦИЯ 8

Теплофизические свойства веществ и новые материалы



ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖИДКИХ СОЛЕЙ LiF И LiF–NaF

Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А.

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

e-mail: abdullaev.rasul88@gmail.com

Фториды щелочных металлов и их смеси входят в состав жидкосолевых систем (LiF–NaF–KF, LiF–BeF₂, LiF–ThF₄–UF₄ и др.), предлагаемых к использованию в качестве теплоносителей и т.н. «жидкого топлива» для ядерных реакторов нового поколения, а также в качестве теплоносителей и бридерных материалов в некоторых проектах термоядерных реакторов [1, 2]. Однако для анализа перспектив создания жидкосолевых ядерных и термоядерных реакторов необходимы, в частности, надежные данные по ряду теплофизических свойств этих систем и их компонентов. На настоящий момент эта проблема еще далека от полного решения.

Методом просвечивания образцов узким пучком монохроматического гамма-излучения (гамма-метод) выполнены измерения термических свойств жидких фторида лития и смеси фторид лития – фторид натрия эвтектического состава (с содержанием 39 мол. % NaF). Исследования плотности и теплового расширения проводились в интервале температур от точки плавления (1123 К для LiF и 925 К – для эвтектики LiF–NaF) до ~1280 К. Для приготовления образцов солей использовались фторид лития марки ОСЧ (чистотой 99,9 масс. %) и фторид натрия марки ЧДА (чистота не менее 99 масс. %). Порошки LiF и NaF были предварительно обезвожены в высоком вакууме при температуре 750 К.

На основании полученных результатов построены температурные зависимости плотности солей LiF и LiF–NaF эквимолярного состава в жидком состоянии и рассчитаны средневзвешенные значения их объемных коэффициентов теплового расширения.

На рисунке 1 показано сравнение полученных нами результатов по плотности жидких солей с данными, обнаруженными в литературе [3–5]. Результаты [3, 4] и настоящей работы по плотности и коэффициента теплового расширения жидкого фторида лития согласуются между собой в пределах оцениваемых погрешностей. Расхождения результатов [5] и настоящей работы по плотности эвтектики LiF–NaF не превышают 0,8 %. Эти различия также не превосходят суммарных погрешностей измерений. Расхождение в значениях коэффициента теплового расширения составляет ~4 %. Однако данные [5] были получены в относительно узком диапазоне температур (1123–1298 К, что в два раза меньше, чем температурный интервал, исследованный в настоящей работе). Кроме того, в гамма-методе, в отличие от большинства других методов измерений термических свойств, для нахождения коэффициентов теплового расширения не требуются данные по плотности, массе, объему, или геометрическим размерам образца. Это дает возможность исключить влияние ряда систематических погрешностей на точность определения коэффициента теплового расширения. Все выше-

сказанное позволяет утверждать, что полученные в данной работе результаты по относительному тепловому расширению жидкой соли LiF–NaF эвтектического состава на настоящий момент являются наиболее достоверными.

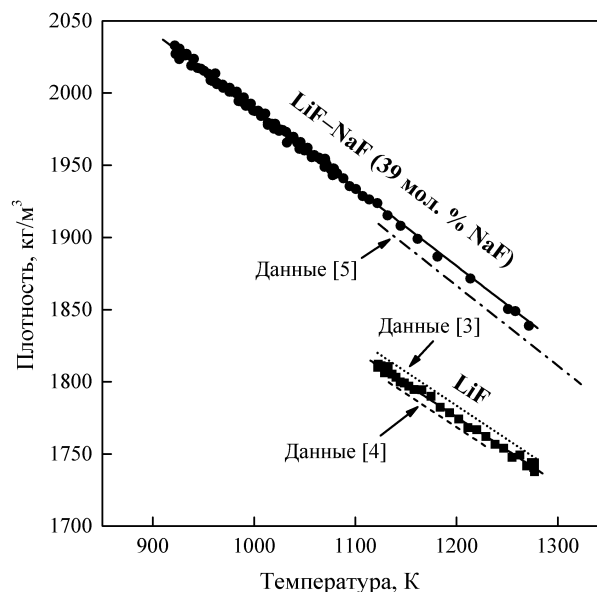


Рис. 1. Температурные зависимости плотности солей LiF и LiF–NaF эквимолярного состава в жидком состоянии.

Точки – экспериментальные данные, Сплошные линии – аппроксимация линейными температурными зависимостями.

Новые полученные в широком интервале температур надежные экспериментальные данные по плотности и тепловому расширению жидких фторидов щелочных металлов могут быть использованы при разработке перспективных жидкосолевых ядерных и термоядерных реакторов.

Список литературы

1. Delpech S., Cabet C., Slim C., Picard G.S. Molten fluorides for nuclear applications // Mater. Today. 2010. V. 13, No. 12. P. 34–41.
2. Romatoski R.R., Hu L.W. Fluoride salt coolant properties for nuclear reactor applications: A review // Ann. Nucl. Energy. 2017. V. 109. P. 635–647.
3. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Тягельский П.В. Изменение плотности LiF, YF₃ и LiYF₄ при плавлении // Неорганические материалы. 1996. Т. 32. № 2. С. 234–237.
4. Chrenkova M., Danek V., Silny A. Density of the system LiF–KF–K₂NbF₇ // Chem. Papers. 2000. V. 54, No. 5. P. 272–276.
5. Chrenkova M., Cibulkova J., Simko F., Danek V. Density of the system LiF–NaF–K₂NbF₇ // Z. Phys. Chem. 2005. V. 219, No. 2. P. 247–255.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА СПЛАВА INCONEL 617

Агажанов А.Ш., Самошкин Д.А., Козловский Ю.М.

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

e-mail: scousekz@gmail.com

В последние годы особое внимание уделяется разработке и применению никелевых суперсплавов в различных областях промышленности. Одним из таких сплавов является Inconel 617, обладающий прекрасными характеристиками, такими как высокая стойкость к окислительным процессам при высоких температурах, прочность и устойчивость к коррозионным образованиям. Сплав нейтрален к воздействию большого количества химических реагентов, хорошо поддается обработке и сварке. В связи с этим Inconel 617 в качестве конструкционного материала имеет широкий спектр применения, начиная от элементов камер сгорания газовых турбин до узлов установок для переработки кислот и гелиевых теплообменников в высокотемпературных ядерных реакторах. Однако теплофизические свойства сплава Inconel 617, в частности теплопроводность и температуропроводность, в настоящее время исследованы недостаточно подробно. Наличие надежных данных по этим свойствам необходимо для проведения теплотехнических расчетов работ промышленных устройств и установок, включающие как штатные процессы, так и экстремальные условия. Таким образом, целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование коэффициентов переноса тепла сплава Inconel 617 в широком интервале температур.

Измерение температуропроводности (a) исследуемого сплава проводилось методом лазерной вспышки на автоматизированной уникальной установке LFA 427 фирмы NETZSCH. Эксперименты проводились в статической инертной атмосфере (Ar 99,992 об. %) в интервале температур 300–1475 К. В процессе измерения на LFA 427 нижняя поверхность цилиндрического образца (толщина 2,5 мм, диаметр 12,6 мм) облучалась коротким лазерным импульсом (1,064 мкм) от Nd:YAG лазера с длительностью 0,8 мс и энергией до 10 Дж. Изменение температуры верхней поверхности регистрировалось ИК-детектором, охлаждаемым жидким азотом. Величина температуропроводности определялась по полученной термограмме разогрева верхней поверхности образца с учетом тепловых потерь по расчетной модели [1], при этом вводилась поправка на конечную длительность лазерного импульса и его реальную форму. Измерения a проводились непрерывно, а сериями «выстрелов» лазера после термостатирования образца при заданной температуре. Интервал между «выстрелами» составлял 2–3 минуты. Общая погрешность определения a составляет 2% при 300 К и 5% при 1500 К, что было установлено по результатам измерений со стандартными твердыми образцами из меди и молибдена.

На рис. 1 представлены результаты по температуропроводности сплава Inconel 617, полученные в трех последовательных термических циклах (нагрев-

охлаждение) в интервале температур 300–1475 К. Как видно из графика, результаты всех трех экспериментов воспроизводятся между собой в пределах погрешности измерения величины a , а на полученной температурной зависимости $a(T)$ отчетливо наблюдается излом в интервале 1015–1076 К и свидетельствующий о полиморфном фазовом превращении в сплаве. Аппроксимация данных всех трех измерений дали следующие уравнения:

$$a(T) = 2,280 + 1,642 \cdot 10^{-3} T + 1,10 \cdot 10^{-6} T^2, \quad (1)$$

для интервала $300 \leq T \leq 1015$ К и

$$a(T) = 1,358 + 3,610 \cdot 10^{-3} T - 4,51 \cdot 10^{-7} T^2, \quad (2)$$

для интервала $1076 \leq T \leq 1475$ К.

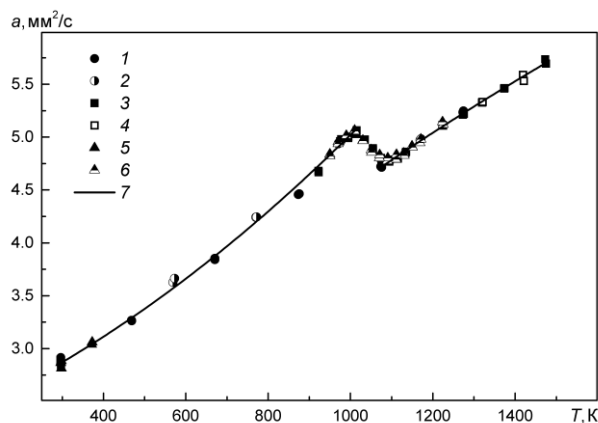


Рис. 1. Температуропроводность Inconel 617.

1, 2 – 1-й эксперимент, нагрев и охлаждение;

3, 4 – 2-й эксперимент, нагрев и охлаждение;

5, 6 – 3-й эксперимент, нагрев и охлаждение;

7 – уравнения (1), (2).

С использованием измеренных значений температуропроводности (a) и литературных данных по удельной теплоемкости (c_p) [2] и плотности (ρ) [3] рассчитан коэффициент теплопроводности (λ) сплава по известной формуле $\lambda = a \rho c_p$. По полученным результатам разработана таблица справочных данных по λ и a исследуемого сплава.

Список литературы

1. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity // Journal of Applied Physics. 1963. Vol. 34, No. 7. P. 1909–1913.
2. Samoshkin D.A., Agazhanov A.Sh., Stankus S.V. Heat capacity of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. No. 012138. 5 p.
3. Kozlovskii Y.M., Stankus S.V. The linear thermal expansion coefficient of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. No. 012136. 4 p.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ФУРАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ – КОМПОНЕНТОВ БИОТОПЛИВА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

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

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: Bogatishcheva@mail.ru

Поиск альтернативных нефти источников энергии является актуальным, так как нефтяные запасы истощаются, а моторное топливо на основе нефтепродуктов вызывает загрязнение окружающей среды. Производные фурана, выбранные в качестве объектов исследования, являются компонентами и промежуточными продуктами в производстве биотоплива второго поколения, сырьем для которого служат лигноцеллюлозные соединения. Конечными продуктами переработки растительной биомассы являются, в частности, 2-метилфуран, 2,5-диметилфуран, 2-метилтетрагидрофуран. Эти вещества могут использоваться как индивидуальные топлива или добавки к бензину и дизельному топливу. Они обладают хорошими экологическими и эксплуатационными характеристиками. Например, 2,5-диметилфуран по сравнению с этанолом имеет следующие преимущества [1]: более высокое октановое число, более высокую (на 20 К) температуру нормального кипения, более низкую (на 30%) теплоту испарения и не поглощает влагу из атмосферы.

Для разработки технологий производства и улучшения качества биотоплива, на которое влияют его физико-химические свойства, необходима информация по различным физическим свойствам отдельных его компонентов.

В докладе будут представлены результаты измерения критической температуры, критического давления, изобарной теплоемкости и коэффициентов температуропроводности 2-метилфурана (CASRN 534-22-5), 2,5-диметилфурана (CASRN 625-86-5), 2-метилтетрагидрофурана (CASRN 96-47-9), фурфурола (CASRN 98-01-1), 2-фурилметанола (CASRN 98-00-0), 2-фурфурилацетата (CASRN 623-17-6) и 2-тетрагидрофурилметанола (CASRN 97-99-4).

В эксперименте использовались высокочистые образцы веществ фирмы Sigma Aldrich с чистотой не менее 98 мол. %.

Исследуемые в работе вещества являются термонеустойчивыми, поэтому для измерения их критических параметров методы, предполагающие сравнительно медленный нагрев вещества до критической температуры, не применимы. Используемый в данной работе метод импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость, применим для термонеустойчивых веществ, так как благодаря быстрому нагреву обеспечивает сверхмалое разложение вещества в процессе измерений [2]. В эксперименте использовались платиновые проволочки от 1 до 3 см диаметром 20 мкм. Длительность греющих импульсов составляла 35–460 мкс для проволочек длиной 1, 2 см, 60–850 мкс для проволочки длиной 3 см. Погрешность измерения критической температуры – 1%, критического давления – 3%.

Измерения коэффициентов температуропроводности выполнены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 (Netzsch). В эксперименте использовались два контейнера с разной толщиной слоя исследуемого вещества: 0.4 мм и 0.48 мм. Длительность греющего импульса составляла 0.3 мс. По нашим оценкам погрешность измерения для жидких соединений не превышает 5 %.

Изобарная теплоемкость исследуемых веществ была измерена с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch) с погрешностью 3%.

Измерения теплоемкости и коэффициентов температуропроводности выполнены для каждого вещества при атмосферном давлении в широком интервале температур его жидкого состояния. Получены уравнения, описывающие зависимость теплоемкости и температуропроводности от температуры, которые использовались для расчета коэффициентов теплопроводности исследуемых соединений.

Экспериментальные данные по теплофизическим свойствам, полученные в настоящей работе, сравнивались с результатами расчетов. Методы Вилсона-Джасперсона, Константину-Гани, Марреро-Гани и Хуккерикара и др. [3, 4] были использованы для оценки критических параметров. Изобарная теплоемкость рассчитывалась методами Дворкина и др. [5] и Колска и др. [6]. Для оценки теплопроводности исследуемых веществ применялся метод группового вклада О. Гавендера и др. [7] и методы, основанные на теории термодинамического подобия.

Список литературы

1. Roman-Leshkov, Y., Barret, C.J., Liu, Z.Y. Production of dimethylfuran for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates // *Nature*. 2007. Vol. 447, P. 982–985.
2. Никитин Е.Д., Павлов П.А. Методика ГСССД МЭ 163-2010. Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ. – М.: ФГУП «Стандартинформ» 2010.
3. Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P. *The Properties of Gases and Liquids*. New York: McGraw-Hill, 2000.
4. Hukkerikar A. S., Sarup B., Ten Kate A., Abildskov J., Sin G., Gani R. Group-contribution+ (GC+) based estimation of properties of pure components: improved property estimation and uncertainty analysis // *Fluid Phase Equilib.* 2012. Vol. 521. P. 25–43.
5. Dvorkin P.L., Ryzhova G.L., Lebedev Yu.A. Parameters for calculation of the heat capacity of liquid organic compounds at different temperatures // *Bull. Acad. Sci. USSR, Div. Chem. Sci.* 1984. Vol. 33. P. 982–987.
6. Kolská, Z.; Kukul, J.; Záborský, M. & Růžička V. Estimation of the Heat Capacity of Organic Liquids as a Function of Temperature by a Three-Level Group Contribution Method // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008. Vol. 47. P. 2075–2085.
7. Govender O., Rarey J., Ramjugernath D. Estimation of Pure Component Properties, Part 5: Estimation of the Thermal Conductivity of Nonelectrolyte Organic Liquids via Group Contributions // *J. Chem. Eng. Data*. 2020. Vol. 65, P. 1300–1312.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ СИСТЕМ С ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТЬЮ НЕСОВМЕСТИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ

Богатищева Н.С., Галкин Д.А.

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

e-mail: Bogatishcheva@mail.ru

Применение жидкостей в качестве теплоносителей, компонентов топлив, продуктов химической технологии требует знания их теплофизических свойств, в частности коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, которые используются в инженерных расчетах теплообмена. Особый практический и научный интерес представляют бинарные растворы с существенным различием в свойствах компонентов, обладающих ограниченной совместимостью.

В докладе будут представлены результаты измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности водного раствора монобутилового эфира этиленгликоля (МБЭЭГ). Выбранная в качестве объекта исследования система имеет замкнутую область несовместимости компонентов [1].

Для измерения коэффициента теплопроводности использовалась установка [2, 3], реализующая метод нестационарного нагрева тонкого проволочного зонда (transient hot-wire technique). В ходе эксперимента на платиновый нагреватель-зонд длиной 5 см подается импульс длительностью 2 секунды, за это время исследуемый образец нагревается на 3 градуса. Одним из основных условий данного метода является поддержание постоянной плотности теплового потока от зонда в вещество, что эквивалентно требованию постоянства мощности для зонда конечной длины. В данной работе эта задача решена путем разработки и применения регулятора, который обеспечивает прецизионное поддержание установленного значения мощности не хуже 99.97% в широком диапазоне мощностей.

Измерения коэффициентов температуропроводности были выполнены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 MicroFlash Netzsch. В эксперименте использовались два контейнера с разной толщиной слоя исследуемого вещества: 0.48 мм и 0.4 мм [4]. По нашим оценкам погрешность измерения для жидких соединений не превышает 5%.

Измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности системы МБЭЭГ / вода выполнены при атмосферном давлении в диапазоне значений температур от комнатной до температуры фазового разделения по механизму жидкость-жидкость в полном диапазоне концентраций (см. рис. 1). Достижение данной температуры определялось по излому температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Таким образом, была сделана оценка положения нижней ветви бинодали системы на диаграмме температура / концентрация.

В эксперименте использовался образец МБЭЭГ производства фирмы Merck с чистотой не менее 99%. Растворы изготавливались на основе бидистиллированной воды. Для МБЭЭГ были получены уравнения для расчета коэффициентов температуропроводности и теплопроводности в исследованном температурном

диапазоне, которые использовались для оценки изобарной теплоемкости вещества.

Предложено уравнение для расчета теплопроводности двухкомпонентной системы в зависимости от концентрации компонентов и температуры смеси.

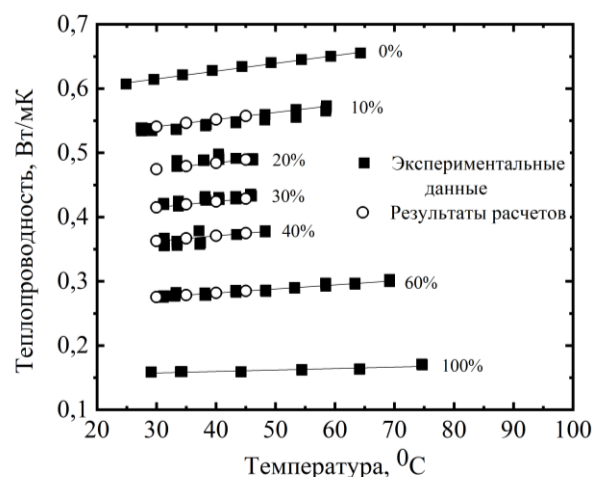


Рис. 1. Зависимость теплопроводности раствора МБЭЭГ/вода от температуры для различных концентраций МБЭЭГ, выраженных в массовых долях, в смеси.

Полученные результаты измерения теплопроводности МБЭЭГ сравнивались с имеющимися литературными данными и со значениями, рассчитанными с помощью современных методов группового вклада [5] и методов, основанных на теории термодинамического подобия.

Список литературы

- Lee H.-S., Lee H., Liquid-Liquid Equilibria and Partitioning of o-Chlorophenol in Ethylene Glycol Monobutyl Ether + Water, Diethylene Glycol Monohexyl Ether + Water, and Poly (oxyethylene(4)) Lauryl Ether + Water // J. Chem. Eng. Data. 1996. Vol. 41, P. 1358–1360.
- Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 115, P. 769–773.
- Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Comments on “Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids” (Appl. Therm. Eng. 105 (2016) 142) // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 129, P. 145–147.
- Богатищева Н.С., Файзуллин М.З., Никитин Е.Д. Теплоемкость и температуропроводность этиловых эфиров n-алкановых кислот – компонентов биодизельного топлива // Журнал Физ. Химии. 2017. Т. 91. № 9. С. 1484–1490.
- Govender O., Rarey J., Ramjugernath D. Estimation of Pure Component Properties, Part 5: Estimation of the Thermal Conductivity of Nonelectrolyte Organic Liquids via Group Contributions // J. Chem. Eng. Data. 2020. Vol. 65, P. 1300–1312.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00115-П*

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ОКОЛО КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ПАР

Боярских К.А.^{1,2,3}, Хищенко К.В.^{1,2,3,4}

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

³ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

⁴ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

e-mail: shagom55@gmail.com

В настоящей работе проведены оценки параметров критических точек тугоплавких металлов (Mo, Re, Ti) в рамках трех простых моделей (с число параметров соответствующих уравнений состояния не более трех).

Первое используемое уравнение состояния – это уравнение Ван-дер-Ваальса

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}. \quad (1)$$

Второе – уравнение состояния, полученное при рассмотрении модельной задачи заряженных твердых сфер из работы [1]

$$P = \frac{RT}{V(1-4\eta)} - \frac{ae^2}{3V^{4/3}}, \quad (2)$$

где e – элементарный заряд; $\eta = \pi d^3 n/6$ – степень упаковки (доля занятого объема); d – диаметр сфер; a – коэффициент Маделунга. Третье уравнение состояния – уравнение состояния взаимодействующих точечных центров [2]

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+\chi b)}. \quad (3)$$

Здесь параметры a и b имеют тот же смысл, что и в уравнении (1), а χ есть управляющий параметр.

Для оценок критических точек параметры уравнений состояния варьировались в широком диапазоне значений, и для каждой комбинации рассчитывалась граница двухфазной области (бинодаль) жидкость–пар. Далее для каждой бинодали вычислялось отклонение расчетных значений плотности от измеренных значений при той же температуре, приходящееся в среднем на одну точку. В качестве оптимального набора параметров выбирался тот, который давал минимальное отклонение от эксперимента. Для расчетов использовались экспериментальные данные из работ [3–6].

На рис. 1 представлены результаты расчетов для молибдена.

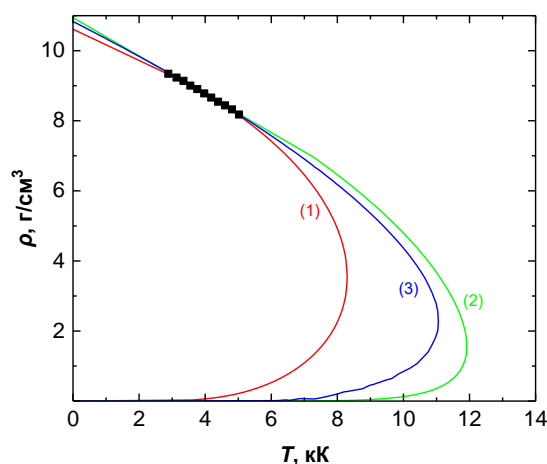


Рис. 1. Бинодали по уравнениям (1), (2) и (3) в координатах температура–плотность, полученные в результате оценки по данным [3] (квадратики) для молибдена.

Список литературы

1. Ликальтер А.А. Критические точки конденсации в кулоновских системах // УФН. 2000. Т. 170. №8. С. 831–854.
2. Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния. Поиски оптимальной функциональной формы притягивательного вклада // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. №2. С. 67–78.
3. Hixson R.S., Winkler M.A. Thermophysical properties of molybdenum and rhenium // Int. J. Thermophys. 1992. V. 13. №. 3. P. 477–487.
4. Peterson A.W., Kedesdy H., Keck P.H., Schwarz E. Surface tension of titanium, zirconium, and hafnium // J. Appl. Phys. 1958. V. 29. №. 2. P. 213–216.
5. Paradis P.-F., Rhim W.-K. Non-contact measurements of thermophysical properties of titanium at high temperature // J. Chem. Thermodynamics. 2000. V. 32. P. 123–133.
6. Saito T., Shiraishi Y., Sakuma Y. Density measurement of molten metals by levitation technique at temperatures between 1800° and 2200°C // ISIJ. 1969. V. 9. P. 118–126.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00713,
<https://rscf.ru/project/19-19-00713/>)

УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ФЛЮИДА ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ. КРИПТОН.

Дутова О.С., Мешалкин А.Б.

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

e-mail: dutova@itp.nsc.ru

Благородные газы являются простейшими и поэтому наиболее важными модельными веществами для теории и эксперимента теплофизических свойств жидкостей. Поскольку они химически инертны, ими очень хорошо управлять в экспериментах, а из-за их одноатомной структуры и сферической симметрии можно применять почти точные статистико-механические теории в сочетании с точными моделями межатомных взаимодействий для расчета их свойств. По сравнению с обычно используемыми благородными газами, гелием и аргоном, термодинамические свойства криптона не очень полны.

Для описания экспериментальных данных по вязкости в достаточно широком интервале параметров состояния в настоящее время широко используются эмпирические зависимости вязкости как функции температуры и плотности. Различные варианты уравнений для расчета вязкости позволяют описывать экспериментальные данные в широкой области параметров состояния. Однако они содержат большое число коэффициентов, которое существенно увеличивается при попытке одновременного описания вязкости газа и жидкости.

С помощью установленной ранее [1] зависимости избыточной вязкости $\Delta\eta = \eta(T, P) - \eta_{en}(T, P)$ от плотности внутренней энергии $\Delta U/V$ получено простое малопараметрическое уравнение для описания коэффициента вязкости в широкой области параметров состояния

$$\eta_{cal}(T, P) = \eta_{en} + A x \exp\left(\alpha \frac{x_0}{x_0 - x}\right) + B \left(\frac{T}{T_C}\right)^{0.25} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.5} \exp(-\beta x / x_0), \quad (1)$$

где первый член дает вклад в перенос импульса при «столкновениях» частиц, второй обусловлен переносом импульса за счет межмолекулярного взаимодействия («полевой») механизм, третий – «смешанный» механизм [2], $\eta_{en} = \eta_0(T)\Psi(b\rho)$ вязкость системы твердых сфер по Энскогу; $\eta_0(T)$ – вязкость разреженного газа, $\Psi(b\rho)$ – функция плотности; $x = \Delta U/V$; $x_0 = H_0^0/V_0$, H_0^0 – энтальпия испарения при абсолютном нуле температуры и давлении, равном нулю, V_0 – гипотетический объем переохлажденной до абсолютного нуля жидкости; T_C – температура в критической точке. Коэффициент V_0 найден по правилу Филиппова –

Тиммерманса $V_0/V_C = Z_C$, Z_C – фактор сжимаемости. Это уравнение содержит четыре индивидуальных эмпирических коэффициента (A, α, B, β), которые необходимо найти из экспериментальных или табличных данных по вязкости. Подчеркнем, что для того, чтобы воспользоваться уравнением (1) для расчета коэффициента вязкости, необходимо располагать достаточно точными термическими и калорическими уравнениями состояния для расчета термических и калорических свойств вещества [3].

Уравнение описывает вязкость жидкого и газообразного криптона при температурах от 120 К до 1100 К и давлениях до 50 МПа. Предложенное уравнение позволяет с удовлетворительной точностью осуществлять экстраполяцию коэффициента вязкости далеко за пределы опорного участка. Показано, что рассчитанные по уравнению (1) значения вязкости криптона согласуются с наиболее надежными экспериментальными и табличными данными в пределах экспериментальных погрешностей. Результаты расчета коэффициента вязкости η с помощью предложенного уравнения приведены на рис. 1.

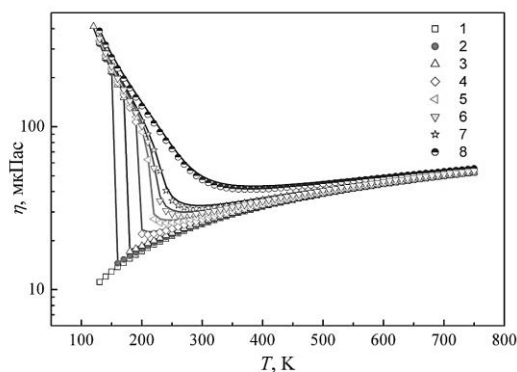


Рис. 1. Сопоставление рассчитанных значений вязкости криптона (линии) с табличными (символы) на изобарах: 0.1 МПа (1), 1 (2), 2 (3), 4 (4), 6 (5), 8(6), 10 (7), 20 МПа (8).

Список литературы

1. Каплун А.Б. Единое уравнение для коэффициента вязкости жидкости и газа // ТВТ. 1989. Т. 27, №5. С. 884–888.
2. Kaplun A.B., Meshalkin A.B., Dutova O.S. A unified low-parametrical equation used to calculate the viscosity coefficient of liquid, gas, and fluid. Argon. Xenon // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1105. P. 012157.
3. Lemmon E.W. and Span R. Short Fundamental Equations of State for 20 Industrial Fluids // J. Chem. Eng. Data. 2006. No. 51. P.785-850.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ НИКЕЛЯ МАРКИ НП2

Козловский Ю.М., Станкус С.В.

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

e-mail: kozlovskii.yurii@gmail.com

Никель марки НП2 выделяется рядом отличительных рабочих характеристик, которые позволяют применять материал для решения широкого спектра технических задач. Металл обладает хорошей коррозионной стойкостью, жаростойкостью, свариваемостью и используется для изготовления разнообразного металлопроката (проволока, прутки, ленты) с высокой химической устойчивостью, сварного химического оборудования и других изделий машино- и приборостроения. Основой служит никель, массовая доля которого составляет 99,5%. Оставшаяся доля приходится преимущественно на медь, железо, магний, углерод и марганец. Несмотря на широкое применение, в литературе отсутствуют достоверные данные по теплофизическим свойствам исследуемой марки металла. Внимание уделяется высокочистому никелю (99,99 мас. %). Однако, как известно, даже небольшие изменения в составе могут сильно повлиять на теплофизические свойства, что усложняет внедрение новых материалов на основе НП2. Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное исследование теплового расширения никеля марки НП2.

Эксперименты проведены dilatометрическим методом [1] на установке горизонтального типа DIL-402C (NETZSCH, Германия) с держателем и толкателем, изготовленными из спеченного корунда. Образец, представленный в виде цилиндра, зажимался между держателем и толкателем с усилием 45 сН, которое поддерживалось постоянным в ходе каждого эксперимента. Удлинение регистрировалось индуктивным датчиком перемещения (LVDT) с разрешением до 0,125 нм, а температура — термопарой (тип S). Измерения проведены в интервале температур 293,15–1473 К при нагреве–охлаждении печи со скоростью 2 К/мин и 15-минутной изотермической выдержке при максимальной температуре. Перед экспериментами установка вакуумировалась (1 Па) и заполнялась гелием (99,995 об. %). Учет нелинейности характеристики датчика перемещений, отличия в температурах и коэффициентах линейного расширения материалов держателя и толкателя и т.д. проводился путем измерения нулевого хода dilatометра с образцом корунда в условиях, идентичных условиям основных экспериментов.

Установка, методика проведения измерений и обработки результатов апробировались в экспериментах с образцом высокочистой платины. Сопоставление результатов измерений с наиболее достоверными литературными данными [2] показало, что отличие в значениях термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) не превышает 3%. Непосредственно до и после экспериментов проводились контрольные измерения линейных размеров и массы образца. По этим данным также рассчитана плотность

при комнатной температуре и ее температурная зависимость в измеряемом интервале.

Четыре последовательных цикла нагрева–охлаждения показали хорошую воспроизводимость полученных данных. На рис. 1 представлены сглаженные методом Савицкого–Голея результаты.

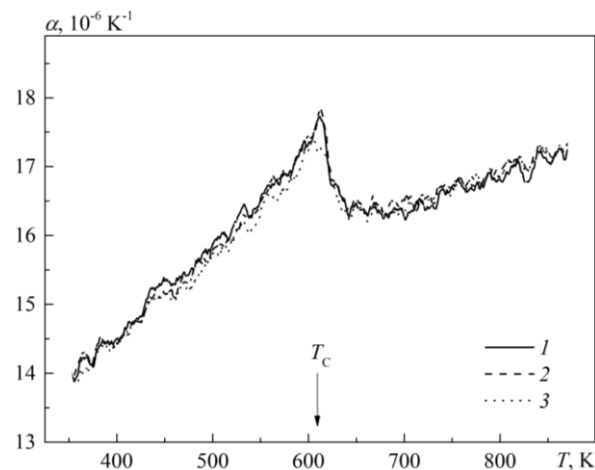


Рис. 1. ТКЛР никеля марки НП2.
1 – 2-й нагрев; 2 – 3-й нагрев; 3 – 4-й нагрев.

В окрестности температуры 600 К наблюдается аномальное изменение коэффициента расширения, что согласуется с приведенными в [3] данными о магнитном фазовом переходе никеля. Первичные данные обработаны методом наименьших квадратов степенными полиномами. А в критической области обработка проведена скейлинговыми зависимостями. Рассчитанные сглаженные значения ТКЛР и относительного удлинения, а также термического коэффициента объемного расширения и плотности сведены в таблицу.

Список литературы

1. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение самария в широком интервале температур // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 4. С. 625–631.
2. Kirby R.K. Platinum – a Thermal Expansion Reference Material // Int. J. Thermophys. 1991. V. 12, No. 4. P. 679–685.
3. Abdullaev R.N., Kozlovskii Yu.M., Khairulin R.A., Stankus S.V. Density and Thermal Expansion of High Purity Nickel over the Temperature Range from 150 K to 2030 K // Int. J. Thermophys. 2015. V. 36. P. 603–619.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРИКЛАЗА ПРИ ВЫСОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Маевский К.К.

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

e-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

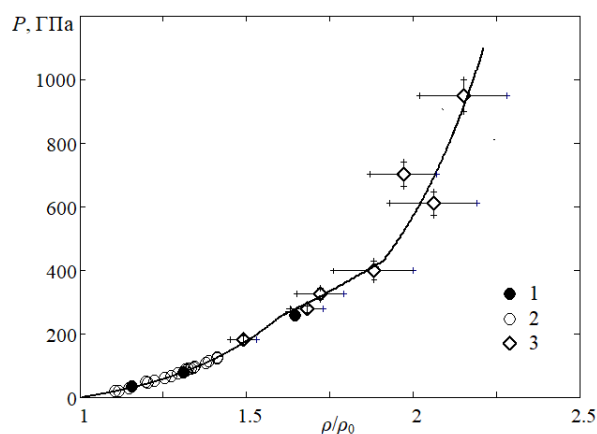
Исследования по динамическому сжатию геологических материалов важны для понимания состава и физического состояния глубинных недр Земли и других планет. Эти работы также дают представление о процессах воздействия, имеющих отношение к формированию и эволюции планет. Силикаты магния доминируют в мантии Земли и, как ожидается, станут основными фазами в скалистых экзопланетах [1]. Большое внимание уделяется возможности фазового перехода исследуемых силикатов магния. У многих твердых тел приложение ударного давления приводит к фазовым превращениям. Было отмечено, что наблюдалась диссоциация Mg_2SiO_4 в окислы MgO и SiO_2 (стишовит). Данные эксперименты проводились при значении давлениях 33 ГПа, что соответствует давлению в мантии Земли на глубине 1000 км.

В связи с этим представляет большой научный и практический интерес изучение поведения периклаза MgO , с учетом наличия, в частности, фазового перехода при высоких значениях давления [2]. С другой стороны, MgO применяется в производстве для производства огнеупоров, и в том числе как очень мелкий абразив для очистки поверхностей, в частности, в электронной промышленности.

Представлены результаты по моделированию ударно-волнового нагружения MgO . При расчетах используется термодинамически равновесной модель [3]. Рассматривая компоненты исследуемого материал в области фазового перехода как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, используемая модель позволяет достоверно описывать, в том числе, и область полиморфного фазового перехода. При моделировании в области фазового перехода предполагается, что объемная доля α фазы низкого давления перешла в фазу высокого давления. По данным экспериментов определяется значение давления, соответствующее началу процесса фазового перехода. Значение доли α близко к линейной в зависимости от приращения внутренней энергии: $\alpha = \Delta E / kf$, при этом $kf = E_f - E_b$, $\Delta E = E - E_b$. (E – текущая внутренняя энергия, E_b внутренняя энергия в начале фазового перехода, E_f внутренняя энергия в конце фазовый перехода, когда весь материал перешел в фазу высокого давления). Параметр kf позволяет описать данные экспериментов для исследуемых образцов имеющих различные значения пористости [4].

При расчетах учитывается полиморфный фазовый переход периклаза. Для MgO определены следующие значения: параметр kf равен 15.0 кДж/г, давление начала фазового перехода 250 ГПа. Результаты моделирования термодинамических параметров и данные, полученные на основании экспериментов, приведены на рис. 1 для MgO с учетом фазового перехода, в перемешанных давлении P – массовая скорость U .

Параметры, определенные для MgO , позволили непротиворечиво описать данные для эстантита, рассматривая его как смесь оксидов MgO и SiO_2 на уровне точности экспериментов.

Рис. 1. Ударная адиабата для MgO .

Расчет – сплошная линия. Данные: 1, 2 – [5] и 3 – [2].

Результаты проведенного моделирования показывают, что расчеты по термодинамически равновесной модели соответствует имеющимся экспериментальным данным. Получено достоверное описание фазового перехода высокого давления, возможность которого отмечается для MgO . Наличие данных в диапазоне давления выше 200 ГПа могло бы внести ясность в этот вопрос.

Данная методика, в частности, дает возможность оценить вклад фазовых переходов в изменение плотности мантии Земли в областях давлений, соответствующих фазовым переходам исследуемых материалов.

Список литературы

1. Duffy T.S., Smith R.F. Ultra-High Pressure Dynamic Compression of Geological Materials // *Front. Earth Sci.* 2019. V. 7:23. P. 1–20.
2. K.Miyanishi, Y.Tange, N.Ozaki, T.Kimura, T.Sano, Y.Sakawa, T.Tsuchiya, R.Kodama. Refractive index measurement of magnesium oxid uder ultra igh-pressure // *Phys. Rev. E* 2015. V. 92. P. 023103.
3. Маевский К.К. Численное моделирование поведения карбидов при высокоэнергетическом воздействии // *ЖТФ.* 2022. Т. 92. №1. С. 100–107.
4. Маевский К.К., Кинеловский С.А. Термодинамические параметры смесей с нитридом кремния при ударно-волновом воздействии в представлениях равновесной модели // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 6. С. 876–881.
5. P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, I.V. Lomonosov, V.E. Fortov. Database on shock-wave experiments and equations of state available via Internet // *AIP Conf. Proc.* 2004. V. 706. P. 87–90.

Работа поддержана
Бюджетным проектом III.22.3.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ ПЛАСТИН С КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Алифанов О.М.¹, Будник С.А.¹, Ненарокомов А.В.¹, Титов Д.М.¹, Моржухина А.В.¹,
Дельфини А.², Альбано М.², Марчетти М.²

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

² Римский университет Ла Сапиенца, Рим, Италия

e-mail: Aleksey.Nenarokomov@mai.ru

Конструкции современных высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) совершающие движение в атмосфере Земли, например, такие как спускаемые аппараты (СА) космических аппаратов (КА), многоразовые воздушно-космические самолеты (ВКС) и др. подвергаются воздействию высокоинтенсивных тепловых нагрузок. Для решения задач тепловой защиты наиболее теплонагруженных элементов таких ЛА используются специальные теплозащитные покрытия. Для многоразовых ВКС, а также для ЛА, для которых важным является сохранение их аэродинамической формы в процессе полета используется многоразовая (неразрушающаяся) теплозащита. В последнее время все более широкое применение в конструкциях аэрокосмической техники находят материалы на основе углерода, в частности композиционные материалы (КМ) углерод/углерод (С/С). Это связано с их высокой химической стабильностью и высокой относительной прочностью, способностью сохранять механические свойства при высоких температурах, которые возникают при движении ЛА в плотных слоях атмосферы Земли. Однако при длительном влиянии факторов космического пространства и последующих воздействиях экстремальных тепловых нагрузок эффективность теплозащиты на основе КМ С/С может быть значительно снижена. В связи с этим возникает задача защиты открытой поверхности КМ С/С как от окисления, так и от эрозии. Возможным решением задачи является нанесение барьерных покрытий для образования внешнего защитного слоя. В настоящее время для создания покрытий и их нанесения на поверхности используется широкий спектр технологических решений, таких как нанесение керамических слоев периодическим науглероживанием, реакционное спекание, пропитка матрицы и пиролиз или обработка поверхности осаждением. Однако, подобные решения еще далеки от широкого практического использования в связи с наличием ряда нерешенных проблем – разрушение объемного материала подложки после обработки покрытия, явления отслаивания из-за плохой адгезии подложки к покрытию, трудоемкость и т.д. Одним из возможных путей решения проблемы предлагается использование покрытия на основе термостойкого керамического лака, обогащенного керамическими наночастицами, наносимые на подложку из КМ С/С, наносимого кистью с последующим разравниванием по площади и выравниванием по толщине, и сушкой. В качестве исходного материала подложки использовался плиточный КМ С/С производства компании Mitsubishi Chemical с плотностью 1437 кг/м³ и толщиной 4 мм. В качестве основы защитного покрытия использовался термостойкий керамический лак компании Aremco ProductsInc на основе оксида алюминия Al₂O₃ с различным весовым содержанием

наносфер n- SiO₂ (0, 0,25, 0,5, 0,75 и 1,0%) и с рабочей температурой до 1800°C.

При проведении тепловых испытаний использовалась схема с симметричным расположением двух различных пар (две из пяти) одинаковых образцов относительно нагревателя с реализацией кондуктивно-радиационного нагрева, что позволило реализовать поля температур близкие к однородным и оценить плотность теплового потока на нагревательном элементе (НЭ) по его электрическим параметрам.

На рисунке 1 представлены результаты определения зависимостей $C(T)$ и $\lambda(T)$ для различных вариантов покрытий.

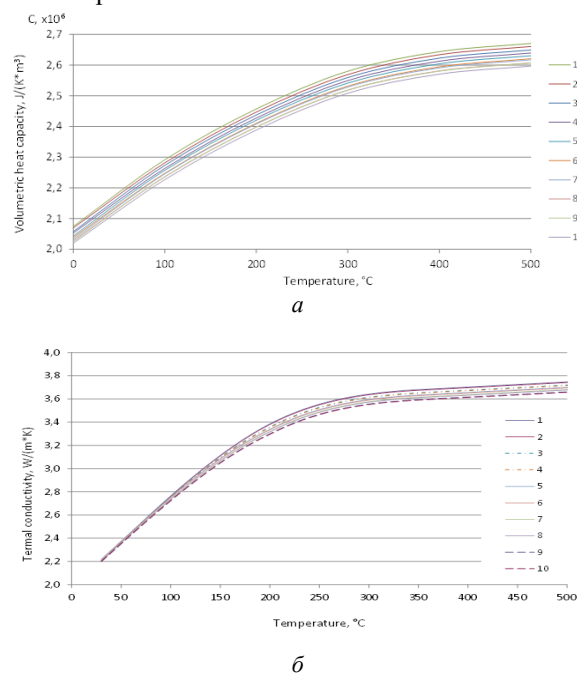


Рис. 1. Зависимости $C(T)$ (а) и $\lambda(T)$ (б) для защитного покрытия образцов: 1,2 – А1(0%) и В1(0%); 3,4 – А2(0.25%) и В2(0.25%); 5,6 – А3(0.5%) и В3(0.5%); 7,8 – А4(0.75%) и В4(0.75%); 9,10 – А5(1.0%) и В5(1.0%).

По результатам проведенных тепловых испытаний можно сделать вывод о том, что результаты сравнительного анализа прогрева образцов КМ С/С с покрытиями из керамического лака при различном весовом содержании наносфер n-SiO₂, проведенного на основании данных испытаний позволяют сделать однозначный вывод о влиянии, в определенной степени, количества наносфер на теплоизоляционные свойства исследуемых защитных покрытий.

Работа выполнена при поддержке РФФ
(грант № 18-19-00492)

ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО И ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: lafleur@tpu.ru

Известно [1], что поверхностные свойства и характеристики (смачивание, поверхностная энергия, шероховатость, элементный состав) в значительной степени влияют на процессы (испарение, кипение, конденсация), происходящие в энергогенерирующих и теплопередающих устройствах. Среди способов модификации поверхностей лазерное текстурирование в последнее время считается наиболее перспективным. Такой способ обработки, как правило, комбинируют с нанесением специального покрытия, благодаря которому происходит инверсия свойств смачиваемости до экстремальных (супергидрофобных), повышается стойкость к коррозии, биообрастанию, обледенению. В последние годы ведущими научными группами [2], работающими в области инновационного материаловедения и синтеза новых конструкционных материалов, характеризующихся уникальными функциональными свойствами, интенсивно разрабатывается новый класс материалов – SLIPS (Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces) поверхности. Их изготовление, как правило, осуществляется в два этапа: 1) формирование развитой многомодальной шероховатости; 2) заполнение специальными многокомпонентными жидкими веществами микро- и наноразмерных элементов, образующих текстуру поверхности. Благодаря своим исключительным свойствам такие материалы широко востребованы в авиакосмической, медицинской, судостроительной, химической, теплоэнергетической и других отраслях.

В работе разработан новый подход синтеза конструкционных материалов для энергогенерирующих и теплопередающих устройств на основе комбинации методов лазерного химического модифицирования и тестирования с последующим высокотемпературным отжигом с нанесением многокомпонентных углеродосодержащих жидкостей.

Суть разработанного подхода состоит, во-первых, в создании развитой многомодальной шероховатости на поверхностях традиционных конструкционных материалов (жаростойкая и жаропрочная сталь, сплавы алюминия, медь) и инновационных композитных материалов, в том числе с керамической матрицей Cu/SiC. Во-вторых, заполнение микро- и наноразмерных элементов, образующих текстуру поверхности наносферами углеродных соединений с поверхностными СН группами.

В работе с использованием нового подхода создана как группа конструкционных материалов традиционно применяемых для энергогенерирующих и теплопередающих устройств, так и группа новых композитных материалов с улучшенными теплофизическими свойствами.

Путем воздействия излучением иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера

IPG-Photonics (IPG-Photonics, Russia) с длиной волны 1064 нм на поверхностях конструкционных материалов создана развитая многомодальная шероховатость. Хорошо апробированной методикой с использованием стенда [3], обеспечивающего механизм подвода теплоты конвекцией, излучением и теплопроводностью проведена процедура высокотемпературного отжига модифицированных лазерным излучением поверхностей с нанесением многокомпонентных углеродосодержащих жидкостей.

Полученные образцы исследовались методами рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD7000, Рамановской спектроскопии, рентгеновского фотоэлектронного анализа с помощью сверхвысоковакуумного фотоэлектронного спектрометра Thermo Scientific K-Alpha Nexsa. Микрорельеф, геометрия и форма отдельных элементов, образующих шероховатость поверхностей, исследовались с помощью профилометрического комплекса “Micro Measure 3D station”. Микроструктура поверхностей изучена методом сканирующей электронной микроскопии.

По результатам анализа исследования химического состава поверхностных слоев и трехмерных параметров шероховатости сформулирована и доказана гипотеза, объясняющая инверсию свойств смачивания и улучшения функциональных свойств, созданных новым методом конструкционных материалов.

Свойства смачивания исследованы хорошо апробированной ранее методикой [4] с использованием оборудования, реализующего теневой метод, и с использованием методов обработки LB-ADSA и тангенциальный (Т-1).

В работе определены характеристики поверхностей конструкционных материалов, позволяющих сдвинуть возникновение кризиса теплообмена в область более высоких температур.

Список литературы

1. Kruse C., Anderson T., Wilson K., Zuhlke C., Alexander D., Gogos G., Ndao S. Extraordinary shifts of the Leidenfrost temperature from multiscale micro/nanostructured surfaces // *Langmuir*. 2013. V. 29. P. 9798–9806.
2. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M. Superhydrophobic versus SLIPS: Temperature dependence and the stability of ice adhesion strength // *J. Colloid Interface Sci.* 2022. V. 606. P. 556–566.
3. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Nikitin D.S., Orlova E.G., Paushkina K.K. Ignition and combustion characteristics of coal-water-oil slurry placed on modified metal surface at mixed heat transfer // *Fuel Proc. Techn.* 2022. V. 233. P. 107291.
4. Kuznetsov G.V., Orlova E.G., Feoktistov D.V., Islamova A.G., Zhuikov A.V. Droplet spreading and wettability of abrasive processed aluminum alloy surfaces // *Met. Mater. Int.* 2020. V. 26. P. 46–55.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 21-73-10245)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМООБРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЁРДОГО ОСТАТКА

Петраков В.Д., Тыра А.В., Ушаков К.Ю.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева г. Кемерово

e-mail: petrakov11012001@gmail.com

Коллективом кафедры теплоэнергетики КузГТУ проводятся комплексные исследования по разработке объединенной схемы утилизации резинотехнических отходов (РТО). Исследуются параметры процессов газификации и пиролиза резиновой крошки отработанных крупногабаритных шин карьерных самосвалов. Одним из целевых продуктов процесса термической переработки РТО является углеродный сорбент для очистки технических вод на угольных и нефтегазовых предприятиях. На эксплуатационные характеристики сорбента оказывают влияние температурные условия проведения стадий термической обработки РТО (пиролиза и газификации). Целью настоящего исследования является определение адсорбционной активности и характеристик удельной поверхности твёрдого углеродного остатка последовательного процесса пиролиза и газификации резиной крошки шин карьерных автосамосвалов.

В качестве объекта исследования были использованы продукты процесса углекислотной активации твёрдого остатка процесса пиролиза фракции резиновой крошки с размером частиц 2–3,5 мм шин карьерного автосамосвала. Адсорбционная активность активированных твёрдых остатков определялась с использованием фотоэлектроколориметра КФК-3 «ЗОМЗ» по методике, представленной в [1]. Погрешность измерения адсорбционной активности по метиленовому голубому, рассчитанная по экспериментальным результатам определения адсорбционной активности «ГОСТовских» сорбентов ОУ-А и БАУ-А с использованием методики [2] составила $\pm 0,054\%$; $\pm 0,034\%$, соответственно. Определение удельных характеристик поверхности твёрдого остатка углекислотной активации проводилось с использованием автоматического анализатора удельной поверхности и пористости 3P sync.

С целью определения влияния термических условий проведения стадий утилизации РТО на адсорбционные характеристики были проанализированы твёрдые остатки процесса углекислотной активации при температурах 940°C, 960°C, 980°C, в качестве сырья для активации были использованы твёрдые остатки процесса пиролиза исходной резины при температурах 550°C, 600°C, 650°C, 700°C. Часть результатов определения адсорбционной активности X , удельной поверхности F и размер мезопор D исследуемых образцов сведены в таблице 1. Определено, что при температуре углекислотной активации 960°C твёрдые остатки имеют наименьшие показатели адсорбционной активности (табл. 1). Вероятно, это связано с тем, что при температуре активации 940°C в твёрдом остатке имеется повышенное содержание водород- и кислород-содержащих структур, что отображается на ИК спектрах образцов, которые полностью исчезают с повышением температуры. В

свою очередь, при достижении температуры активации в 980°C наблюдается значительный рост удельной поверхности образцов, который так же приводит к увеличению их сорбционной активности по сравнению с образцом, полученным при углекислотной активации при температуре 960°C.

Таблица 1. Характеристики твёрдых остатков.

образец	$T_{\text{газиф.}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{пир.}}^{\circ}\text{C}$	$F_{\text{y.}} \text{ м}^2/\text{г}$	$D, \text{ нм}$	$X, \text{ мг/г}$
Г4	940	650	101,98	18,51	118,68
Г5	960	650	50,36	30,43	96,95
Г6	980	650	67,39	23,44	103,59
Г7	940	550	57,51	26,55	96,11
Г1	940	600	110,37	14,66	83,87
Г4	940	650	101,98	18,51	118,68
Г10	940	700	40,53	30,45	86,77

При повышении температуры пиролиза свыше 650°C средняя адсорбционная активность снизилась по всем образцам твёрдого остатка. Так же было проведено сравнение параметров образцов при различных температурах пиролиза, с постоянной температурой газификации таблица 2.

Определено, что при повышении температуры пиролиза до 650°C адсорбционная активность твёрдого остатка достигает максимального значения, после дальнейшего повышения температуры термического разложения, адсорбционная активность снижается.

В работе представлены характеристики твёрдых остатков процесса пиролиза и углекислотной активации резиной крошки РТО. Определено, что повышение температуры пиролиза свыше 650°C приводит к снижению сорбционной активности образцов. В свою очередь наиболее благоприятные условия для применения твёрдого остатка в качестве сорбента были получены для образцов после активации при 940°C и 980°C. На следующем этапе исследований авторами планируется определить влияние исходной фракции резиновой крошки на адсорбционные характеристики твёрдого остатка двухстадийной технологии утилизации РТО с получением востребованных на рынке продуктов.

Список литературы

1. ГОСТ 6217 – 74. Уголь активный древесный дробленый.
2. Чарыков А. К. Математическая обработка результатов химического анализа: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Химия, 1984. – 168 с.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки РФ в соответствии с дополнительным
соглашением о предоставлении субсидии
из федерального бюджета на финансовое
обеспечение выполнения государственного задания
на оказание государственных услуг
(внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3)*

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СМЕСИ R-32/R-125 (15/85) В ПАРОВОЙ ФАЗЕ

Расчектаева Е.П., Станкус С.В.

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

e-mail: raschektaevaep@gmail.com

Бинарные смеси гидрофторуглеродов (ГФУ) R-32/R-125 относятся к классу озонобезопасных соединений и являются альтернативой для фреона R-22 в холодильной технике, тепловых насосах и для кондиционирования воздуха. ГФУ не разрушают озоновый слой, однако имеют значительный потенциал глобального потепления. Согласно Когалийской поправке 2016 г. к Монреальскому протоколу планируется сокращение производства и потребления ГФУ на 85% на период до 2036 г. В настоящее время применение смесей ГФУ и изучение их теплофизических свойств является актуальной задачей. В данной работе исследована теплопроводность паров смеси хладагентов 15,2 мас. % R-32 и 84,8 мас. % R-125.

Смесь была приготовлена в лаборатории весовым методом, погрешность определения концентрации составляла 0,05–0,08 мас. %. В качестве компонентов состава были использованы образцы хладагентов R-125 (Китай) чистотой 99,5% и R-32 производства Россия чистотой 99,9%. Образцы взвешивались на лабораторных весах AND GX-6100 (разрешение 10 мг, абсолютная погрешность 50 мг).

Измерения теплопроводности смеси были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров в относительном варианте. Работы [1, 2] содержат подробное описание методики измерений и проведения эксперимента. Два вертикально расположенных соосных никелевых цилиндра образуют кольцевой зазор. Размеры цилиндров: длина внешнего составляет 140 мм, внутреннего – 101,3 мм. Ширина зазора между цилиндрами составляла $0,366 \pm 0,005$ мм. Нагреватель представляет собой нихромовый провод, равномерно намотанный на керамическую трубку, и расположен в отверстии диаметром 4 мм по центру внутреннего цилиндра. Исследуемый хладагент заполняет кольцевой зазор и две торцевые полости, образуемые соосными цилиндрами. Абсолютные температуры цилиндров и перепад температур между ними измерялись медь-константановыми термопарами. Влияние свободных концов на значения теплопроводности учитывалось введением соответствующих поправок [1]. Установка тарировалась на аргоне чистотой 99,998 об. %. Расхождение со справочными данными не превышало 1%. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1,5–2,5%, по температуре – 0,05 К, давлению – не более 4 кПа. Диапазон измерений теплопроводности смеси R-32/R-125 (15/85) в паровой фазе составлял: по температуре 305–411 К, по давлению 0,1–1,8 МПа. Было получено 68 экспериментальных значений по теплопроводности на 8 изотермах.

На рис. 1 приведены результаты измерений теплопроводности в паровой фазе в виде квазиизотерм. Как видно из графика, теплопроводность на изотермах увеличивается практически линейно с ростом давления.

Обработка результатов измерений выполнялась эмпирической зависимостью от температуры и давления:

$$\lambda(T, p) = a_0 + a_{12} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} + p \left(a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + p^2 \left(a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right), \quad (1)$$

где T – в К, p – в МПа, λ – в мВт/(м·К).

В работе показано, что зависимость (1) можно применить в широкой области параметров от атмосферного давления (λ_0) до давления на линии конденсации (λ_d).

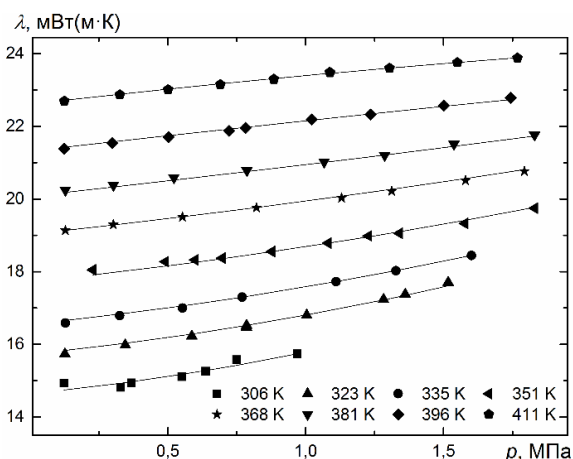


Рис. 1. Изотермы теплопроводности пара смеси R-32/R-125 (15/85 масс.%): точки – экспериментальные данные; линии – аппроксимация.

Также были получены температурные зависимости для λ_0 и λ_d . Данные по давлению пара на линии конденсации были взяты из [3]. Установлено, что в идеальном-газовом состоянии теплопроводность двухкомпонентной смеси можно рассчитать по правилу аддитивности. Используя (1) рассчитаны справочные таблицы температурных и барических зависимостей теплопроводности смеси R-32/R-125 (15/85 масс.%) и определены их погрешности.

Список литературы

1. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC 227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 3. С. 467.
2. Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Экспериментальное исследование теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 218.
3. Lemmon E.W., McLinden M.O., Huber M.L. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP. Version 8.0. Standard Reference Data Program. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2002.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЛЛИЕВЫХ ГРАНАТОВ ГСГГ И КНГГ

Самошкин Д.А.

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

e-mail: d.a.samoshkin@gmail.com

Синтетические кристаллы со структурой граната, наряду с традиционным использованием в квантовой электронике, нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В этой связи возникает необходимость в изучении теплофизических свойств гранатов, без знания которых затруднена разработка их технологии, а также проведение инженерных расчетов при конструировании соответствующих приборов. Обзор литературы показал, что к настоящему времени практически отсутствуют данные по теплоемкости галлиевых гранатов в области температур выше 300 К за единственным исключением [2]. Но именно эта область становится интересной при использовании гранатов в качестве функциональных элементов аппаратуры различного назначения и особенно в качестве активных элементов оптических квантовых генераторов, когда рабочие температуры могут значительно превосходить комнатные. В этой связи целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости галлиевых гранатов ГСГГ и КНГГ в широком интервале температур твердого состояния.

Удельная теплоемкость c_p исследовалась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на экспериментальной установке DSC 404 F1 фирмы Netzsch (Германия). Опыты проводились на образцах ГСГГ ($Gd_{3.04}Sc_{1.8}Ga_{3.16}O_{12}$) и КНГГ ($Ca_3Nb_{1.5}Ga_{3.5}O_{12}$). Массы образцов составляли 172,73 мг и 114,87 мг для ГСГГ и КНГГ, соответственно. Измерения осуществлялись в интервале температур 300–1270 К со скоростью нагрева 10 К/мин в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин) чистотой 99,992 об. %. Перед проведением измерений рабочий объем установки откачивался до вакуума 1 Па и несколько раз промывался аргоном. В качестве калибровочного образца использовался сапфир массой 85,26 мг. Оцениваемая погрешность полученных данных по c_p , подтвержденная экспериментами с эталонными образцами сапфира и платины, составила 2–4%.

Результаты измерений c_p ГСГГ, а также рекомендуемые значения теплоемкости ГСГГ и КНГГ, вместе с известными литературными данными представлены на рис. 1, 2. Как видно из рис. 1, данные по c_p , полученные в последовательных термических циклах нагрева–охлаждения, хорошо воспроизводятся. Из рис. 2 видно, что наши рекомендуемые значения для ГСГГ и КНГГ согласуются с данными [1–3] в пределах суммарных погрешностей измерений.

Получены новые экспериментальные данные по удельной теплоемкости ГСГГ и КНГГ в широком интервале температур. Для КНГГ в интервале 700–1270 К и для ГСГГ выше 300 К данные по c_p получены впервые. Разработана таблица рекомендуемых значений по удельной теплоемкости исследованных гранатов для научного и практического использования.

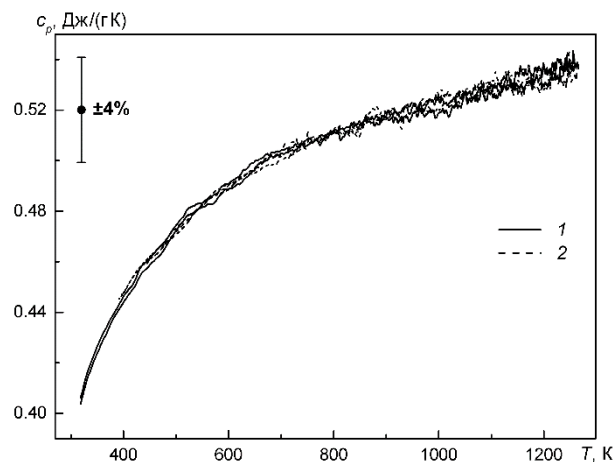


Рис. 1. Теплоемкость ГСГГ: 1 – нагрева, 2 – охлаждения.

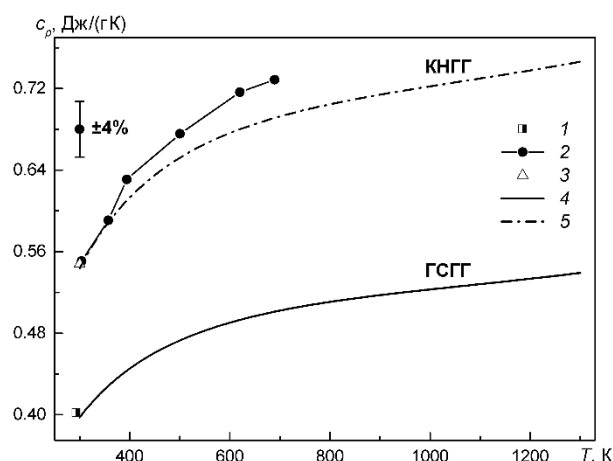


Рис. 2. Сравнение результатов удельной теплоемкости гранатов ГСГГ и КНГГ: 1 – [1], 2 – [2], 3 – [3], 4, 5 – наши рекомендуемые данные для ГСГГ и КНГГ, соответственно.

Список литературы

1. Krupke W.F., Shinn M.D., Marion J.E., Caird J.A., Stokowski S.E. Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet // JOSA B. 1986. V. 3. No. 1. P. 102–114.
2. Петрунин Г.И., Попов В.Г., Тимошечкин М.И. Температурные зависимости теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности галлиевых гранатов (300–700 К) // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27. № 6. С. 1097–1102.
3. Осико В.В., Петрунин Г.И., Попов В.Г., Тимошечкин М.И. Влияние химического состава на теплофизические характеристики галлиевых гранатов // Док. АН СССР. 1989. Т. 309. № 1. С. 92–96.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ КАТОДНОМ И АНОДНОМ РАСПЫЛЕНИИ В ГРАФИТОВОЙ ДУГЕ

Сахапов С.З., Скирда М.С.

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

e-mail: sakhapov@gmail.com

Дуговой разряд является одним из эффективных, хорошо изученных и перспективных методов получения наноматериалов [1–3] и наночастиц в углеродной матрице [4–5]. Так в дуговом разряде были обнаружены фуллерены [1] и впервые были обнаружены углеродные нанотрубки [2]. Для синтеза наночастиц в распыляемый анод, добавляют частицы металлов, получая при этом в синтезируемом материале наночастицы различных размеров, состава и морфологии. В условиях дугового разряда происходит атомарное распыление металла и углерода с последующей конденсацией при расширении в буферный газ.

Основные преимущества данного метода состоят в: химической чистоте синтезированных материалов; возможности модификации материалов в химически активной атмосфере; контроля размеров наноструктур путем выбора параметров разряда; простоте процесса. Продукты распыления композитных электродов в электрической дуге представляют собой наночастицы аддитива, окруженные углеродом, что предотвращает коагуляцию наночастиц, не препятствуя при этом диффузии газа или жидкости к частице, что позволяет использовать такие композиты в качестве высокоэффективных катализаторов. После кальцинации синтезируемых композитных материалов, углерод удаляется с частичным или полным окислением частиц аддитива, при этом могут возникать наночастицы с полый структурой [4–5].

В настоящее время при синтезе наночастиц в дуговых разрядах экспериментальные усилия сосредоточены на изучении механизмов, связанных с анодным распылением, конденсацией паров при охлаждении и исследовании влияния электрических характеристик разряда. В данной работе впервые исследуются продукты реакции как анодного, так и катодного распыления композитных алюминий-графитовых электродов. Экспериментальная установка аналогична использованной в работах [4–5].

Изучены электрические и оптические характеристики плазмы дугового разряда при среднем и низком вакууме, в которых процессы распыления анода и катода значительно отличаются. Показано, что при уменьшении давления буферного газа в вакуумной камере электродугового реактора процесс анодного распыления снижается, при этом графитовый катод начинает интенсивно испаряться. Добавление металла в катод также приводит к интенсификации его испарения.

Проведен анализ материалов полученных при распылении анода и катода методами термогравиметрии, рентгенофазовой спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Исследована морфология материала, формирующегося при электродуговом распылении композитного Al-C анода и катода и структура наноматериала формирующегося при последующем отжиге материалов в кислородной

атмосфере. Показано, что в обоих случаях формируются полые наночастицы Al_2O_3 . Обнаружено, что при распылении композитного катода и последующей кальцинации возникают более крупные полые частицы Al_2O_3 (рис. 1), при этом углерод полностью не сгорает даже при продолжительном отжиге синтезированного материала. На основе динамики распыления электродов и анализе параметров разряда предположено, что формирование более крупных полых частиц при катодном распылении связано с более интенсивным потоком массы и тепла.

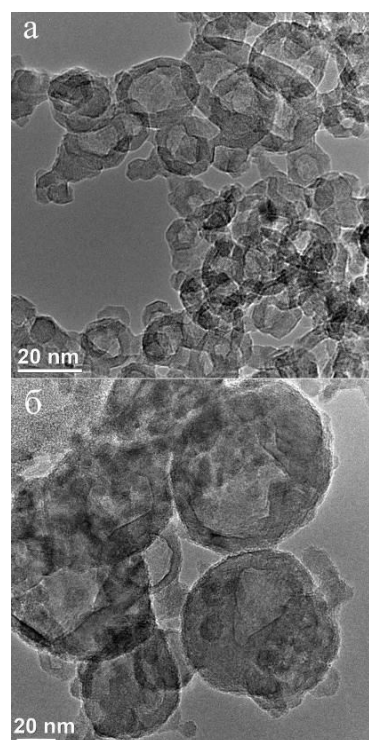


Рис. 1. Фотографии просвечивающего электронного микроскопа материалов полученных при распылении композитного алюминий-углеродного анода (а) и катода (б).

Список литературы

1. Kratschmer W. et al. Solid C60: a new form of carbon // Nature. 1990. V. 3347. P. 354–358.
2. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. V. 354. P. 56–58.
3. Scott J.H.J., Majetich S.A. Morphology, structure, and growth of nanoparticles produced in a carbon arc // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 12564–12571.
4. Smovzh D.V. et al. Morphology of aluminium oxide nanostructures after calcination of arc discharge Al-C soot // Ceram. Int. 2015. Vol. 41. P. 8814–8819.
5. Smovzh D.V. et al. Formation mechanism of MgO hollow nanoparticles via calcination of C-MgO composite produced by electric arc spraying // Ceram. Int. 2019. V. 45. P. 7338–7343.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-19-00213

РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СПЛАВОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА С КОБАЛЬТОМ

Середкин Н.Н.^{1,2,3}, Хищенко К.В.^{1,3,4,5}¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва³ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный⁵ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

e-mail: nikser12@yandex.ru

Знание термодинамических характеристик материалов при высоких давлениях и температурах представляет фундаментальный и практический интерес. В настоящей работе мы провели расчеты ударных адиабат сплавов карбида вольфрама (WC) с кобальтом (Co) на основе смесового метода (метода аддитивности) [1].

В смесовом методе объем ударно-сжатой смеси предполагается равным сумме объемов компонентов, сжатых по отдельности в виде гомогенных монолитных образцов в ударной волне той же интенсивности. Это условие выражается соотношением

$$V_{12}(P) = \alpha_1 V_1(P) + \alpha_2 V_2(P), \quad (1)$$

где P – давление; V_{12} – удельный объем смеси; V_1 и V_2 – удельные объемы легкого и тяжелого компонентов при ударном сжатии каждого из них порознь; α_1 и α_2 – весовые доли компонентов ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$); двойной индекс 12 означает смесь. Уравнение (1) позволяет по адиабатам смеси и одного компонента найти адиабату другого компонента [1]. Массовые и волновые скорости рассчитывались на основе законов сохранения $P = P_0 + \rho_0 D U$ и $\rho = \rho_0 D / (D - U)$, где $\rho = 1/V$:

$$U_{12} = \sqrt{(P - P_0)(V_{120} - V_{12})}, \quad (2)$$

$$D_{12} = V_{120} \sqrt{(P - P_0)/(V_{120} - V_{12})}. \quad (3)$$

Результаты проведенных в данной работе расчетов сопоставлены на рис. 1 с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов [2, 3] для карбида вольфрама, кобальта и сплава WC-Co(0.05) с массовой долей второго компонента $\alpha_2 = 0.05$. Как видно, ударная адиабата сплава WC-Co(0.05), рассчитанная по методу аддитивности, находится в хорошем согласии с экспериментальными точками [3].

Предложенную модель можно использовать при численном моделировании теплофизических и гидродинамических процессов в сплавах WC-Co с раз-

личными массовыми долями компонентов при высоких плотностях энергии.

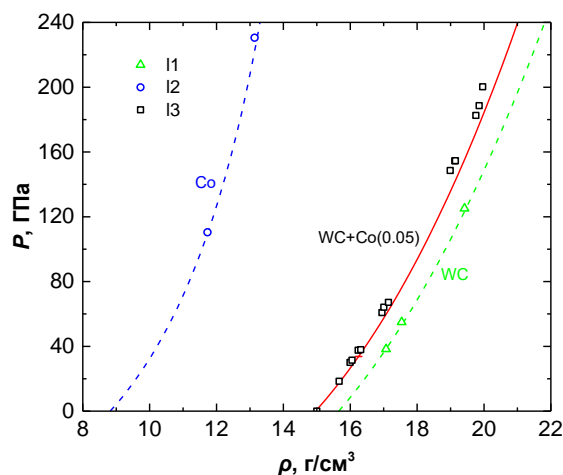


Рис. 1. Ударные адиабаты $P(\rho)$ для сплава WC-Co(0.05). Кривые – результаты расчетов по представленной модели (сплошная линия) и по аппроксимациям [2] (пунктир). Значки – экспериментальные данные: Π – для WC [2]; I_2 – для Co [2]; I_3 – WC-Co(0.05) [3].

Список литературы

1. Alekseev Yu.F., Al'tshuler L.V., Krupnikova V.P. Shock compression of two-component paraffin-tungsten mixtures // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1971. Т. 12. №4. С. 624–627.
2. Trunin R.F., Gudarenko L.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V. Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter. Sarov: RFNC-VNIIEF, 2001.
3. Marsh S.P. (ed.). LASL Shock Hugoniot Data. Berkeley, CA: University of California Press, 1980.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>)

РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СПЛАВОВ ЗОЛОТА С ГЕРМАНИЕМ

Середкин Н.Н.^{1,2,3}, Хищенко К.В.^{1,3,4,5}¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва³ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный⁵ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

e-mail: nikser12@yandex.ru

Знание термодинамических свойств веществ представляет как фундаментальный, так и практический интерес. В настоящей работе мы провели расчеты ударных адиабат для нескольких сплавов золота с германием Au-Ge на основе смесового метода [1]. Массовые доли компонентов Au и Ge в сплавах: 94.2 и 5.8%, 92.1 и 7.9%, 90.7 и 9.3% соответственно.

В смесовом методе объем ударно-сжатой смеси предполагается равным сумме объемов компонентов, сжатых по отдельности в виде гомогенных монолитных образцов в ударной волне той же интенсивности. Это условие выражается соотношением

$$V_{12}(P) = \alpha_1 V_1(P) + \alpha_2 V_2(P), \quad (1)$$

где p — давление; V_{12} — удельный объем смеси; V_1 и V_2 — удельные объемы легкого и тяжелого компонентов при ударном сжатии каждого из них порознь; α_1 и α_2 — их весовые концентрации ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$); двойной индекс 12 означает смесь. Уравнение (1) позволяет по адиабатам смеси и одного компонента найти адиабату другого компонента [1].

Массовые и волновые скорости рассчитывались на основе законов $P = \rho_0 U D$ и $\rho = \frac{\rho_{\text{осм}} D}{D - U}$ при постоянном давлении, где $\rho = \frac{1}{v}$:

$$U_{12} = \sqrt{P_{12}^2 (\rho_{12} - \rho_{120}) / \rho_{12} \rho_{120}} \quad (2)$$

$$D_{12} = \rho_{12} U_{12} / (\rho_{12} - \rho_{120}) \quad (3)$$

Рассмотрим условия, определяющие точность смесового метода (метода аддитивности). Результаты динамических экспериментов устанавливают зависимость удельного объема смеси от давления и для каждого p - V_{12} -состояния определяют удельную энергию сжатия: $\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} p (V_{120} - V_{12})$.

Данное выше уравнение может быть записано в форме

$$\alpha_1 \varepsilon_1^* + \alpha_2 \varepsilon_2^* = \frac{1}{2} p [\alpha_1 (V_{10} - V_1^*) + \alpha_2 (V_{20} - V_2^*)] \quad (4)$$

Здесь ε_1^* и ε_2^* — удельные энергии сжатия компонентов, приобретенные при сжатии смеси, V_1^* и V_2^* — их удельные объемы в тех же условиях, V_{10} и V_{20} — их начальные удельные объемы.

Условие аддитивности требует соблюдения дополнительно к уравнению (2) полученных равенств:

$$\varepsilon_1^* = \frac{1}{2} p (V_{10} - V_1^*), \quad \varepsilon_2^* = \frac{1}{2} p (V_{20} - V_2^*) \quad (3)$$

Результаты проведенных в данной работе расчетов сравниваются с уже имеющимися данными [2,3] ударно-волновых экспериментов для сплавов золота с германием.

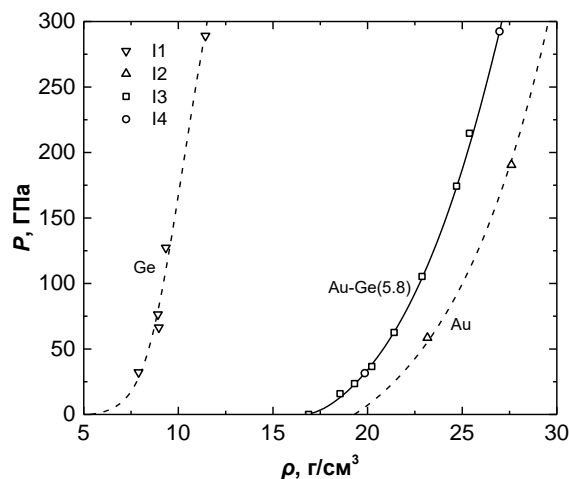


Рис. 1. Ударные адиабаты $P(\rho)$ для «Au-Ge(5.8%)»: 1 — экспериментальные значения для Ge из работы [2]; 2 — экспериментальные значения для Au из работы [2]; 3 — экспериментальные значения для AuGe(5.8) из работы [3]; 4 — границы диапазона давлений в котором определена ударная адиабата сплава.

На рисунке 1 пунктирные линии — ударные адиабаты для Ge и Au из работы [2] соответственно. Сплошная линия — результат нашего расчета смесовым методом ударной адиабаты сплава AuGe(5.8%).

Из рисунка видно, что экспериментальные значения из работы [3] ложатся на полученную нами ударную адиабату сплава AuGe(5.8%).

Аналогичные результаты получены для AuGe с массовыми долями Au и Ge 92.1% и 7.9%, 90.7% и 9.3% соответственно.

Список литературы

1. Alekseev Y.F., Altshuler L.V. and Krupnikova V.P. Shock compression of two-component paraffin-tungsten mixtures //Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 1971. — Т. 12. — №.4. — С. 624–627.
2. Trunin R.F. et al. Experimental data on shock compression and adiabatic expansion of condensed matter //Sarov: RFNC-VNIIEF. — 2001.
3. Marsh S. P. (ed.). LASL shock Hugoniot data. — University of California press, 1980.

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НА БИНОДАЛИ SF₆
В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ**

Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А., Рыков С.В.

Научно-исследовательский университет «МЭИ»

e-mail: evgust@gmail.com

Традиционная форма бинодали для индивидуального вещества задается функцией, $\rho_{lg}(\tau)$, здесь ρ_l – плотность жидкой фазы, ρ_g – плотность газовой фазы, $\tau=(T-T_c)/T_c$ – относительная температура, T – температура вещества на бинодали, T_c – температура в критической точке. Наряду с функцией, $\rho_{lg}(\tau)$, представляет интерес рассмотреть некоторые функции и комплексы, которые включают в себя (ρ_l, ρ_g) свойства; к указанным характеристикам вещества относятся, во-первых: $\Delta\rho_{lg}=(\rho_{lg}-\rho_c)/\rho_c$ – относительная плотность, $f_d=(\rho_l+\rho_g)/(2\rho_c) - 1$ – средний диаметр бинодали, $f_s=(\rho_l+\rho_g)/(2\rho_c)$ параметр порядка, $ur=f_d/f_s$ – комплекс, который зависит от температуры, здесь ρ_c – критическая плотность. В интервале ($0 < \tau < 10^{-4}$) для свойств (f_d, f_s) можно использовать следующие равенства ($f_d(\tau) \approx B_{d0}\tau^{2\beta}$, $f_s(\tau) \approx B_{s0}\tau^\beta$) в соответствии с масштабной теорией критических явлений (МТ), здесь B_{d0}, B_{s0} некоторые коэффициенты, β – критический индекс.

В данной работе поставлены следующие цели:

1) увеличить точность расчетных данных о свойствах ($\rho_l, \rho_g, f_s, f_d \dots$) в критической области SF₆, при этом намечено использовать комбинированные модели ($\rho_l(D, C, \tau)$, $\rho_g(D, C, \tau)$, ...) и некоторые экспериментальные данные,

2) исследовать поведение бинодали с использованием нескольких пар координат, в том числе в координатах ($Z_{lg} - ur_a$) (см. ниже).

В рамках поставленной проблемы нами отобран ряд литературных данных, включая:

а) (h_l, T) данные (Garrabos Y. et al, 2018), здесь h_l – высота, на которой размещается мениск, разделяющий газовую и жидкую фазы образца SF₆; последний находится, размещенного в цилиндрической ячейке при заданной температуре в эксперименте,

б) (ρ_l, ρ_g, T) данные для SF₆ (Wagner W. et al, 2001), полученные в эксперименте и имеющие оцененную точность,

в) некоторые функции ($\rho_l(\tau)$, $\rho_g(\tau)$, $f_s(\tau)$, $f_d(\tau)$), построенные применительно к SF₆.

Первая задача нашей работы связана с разработкой комбинированных моделей ($\rho_l(D, C, \tau)$, $\rho_g(D, C, \tau)$, ...), которые следуют некоторым граничным условиям ($I \dots Y$). В [1] разработаны модели (f_s, f_d) в виде $f_s(D, C, \tau) = B_{s0}\tau^\beta + B_{s1}\tau^{\beta+\Delta} + B_{s2}\tau^{\beta+2\Delta} + B_{s3}\tau^2 + B_{s4}\tau^3$, $f_d(D, C, \tau) = B_{d0}\tau^{2\beta} + B_{d1}\tau^{1-\alpha} + B_{d2}\tau^{1-\alpha+\Delta} + B_{d3}\tau + B_{d4}\tau^3$, (1) где (B_{si}, B_{di} , $i=0 \dots 2$) – коэффициенты скейлинговой части, $C=(B_{si}, B_{di}$, $i=3 \dots 4$) – коэффициенты регуля-

ной части этих моделей, $D = (T_c, \rho_c, \alpha, \beta, B_{d0}, B_{s0}, B_{d1})$ – критические характеристики.

Вторая задача связана с анализом экспериментальных (ρ_l, ρ_g, T) данных для SF₆ при ($2 \cdot 10^{-6} < \tau < 0.3$) и формированием исходного массива (ρ_l, ρ_g, T) данных для построения моделей (1) и соответствующих функций ($\rho_l(D, C, \tau)$, $\rho_g(D, C, \tau)$). В исходный массив включены, во-первых, опытные результаты (Wagner W. et al, 2001). Во-вторых, в этот массив внесены (ρ_l, ρ_g, T) данные, полученные путем преобразования (h, T) данных (Garrabos Y. et al, 2018) при $\tau = 10^{-4} \dots 10^{-8}$.

В рамках третьей задачи были вычислены (D, C) параметры, которые включены в модели (1), отвечающие условиям ($I \dots Y$). Модели (1) дали возможность рассчитать ряд свойств; так, определены (ρ_l, ρ_g, T) данные в интервале ($2 \times 10^{-8} < \tau < 0.3$), отвечающие исходному массиву. На основе этой информации сделано сравнение новых результатов с литературными данными, включая эксперимент. Определены локальные отклонения, $\delta\rho = 100(\rho - \rho_{(1)})/\rho$, %, здесь $\rho_{(1)}$ – плотности, рассчитанные на основе (1). СКО (S_g, S_l) исходных (ρ_l, ρ_g, T) данных составляют $S_g = 0.21\%$, $S_l = 0.036\%$. Эти оценки удовлетворительно согласуются с $\delta\rho_{exp} = \pm 0.15\%$ (Wagner W. et al, 2001).

В прикладной части нашей работы осуществлено несколько этапов.

1. Исследованы комплексы ur и ur_a , которые входят в функцию, $h_l(T)$, и записываются в виде: $ur = f_d/f_s$ и $ur_a = (B_{d0}/B_{s0})\tau^\beta$.

2. Рассмотрена бинодаль в координатах ($Z_{lg} - ur_a$), здесь Z_{lg} – некоторый комплекс, который связан с относительной плотностью, $\Delta\rho_{lg}$. Для жидкостной ветви Z_l , можно определить с помощью следующей зависимости

$$\Delta\rho_l = \rho_l/\rho_c - 1 = f_s + f_d = Z_l \tau^\beta = (B_{s0} + B_{d0}\tau^\beta + \dots)\tau^\beta. \quad (2)$$

Для газовой ветви Z_g , можно представить в виде

$$Z_g = |\Delta\rho_g|/\tau^\beta = (f_s - f_d)/\tau^\beta = B_{s0} - B_{s0} ur_a + \dots \quad (3)$$

3. В интервале ($0 < \tau < \tau_{asym}$) исследован комплекс ($Z_{lga} \approx B_{s0} \pm B_{s0} ur_a$).

4. Выполнено сравнение наших расчетных результатов с данными (Wagner W. et al, 2009). В указанной работе предложены расчетные (ρ_g, ρ_l, T) данные в интервале $5 \times 10^{-6} < \tau < 0.01$. Анализ показал, что отклонения достигают $\delta\rho = \pm 2\%$ от моделей ($\rho_l(D, C, \tau)$, $\rho_g(D, C, \tau)$).

Список литературы

1. V S Vorob'yev, E E Ustyuzhanin et al. J. Phys: Conf. Series, V. 774 (2016) 012047.

ЭНТАЛЬПИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЖИДКОГО СПЛАВА НАТРИЙ–СВИНЕЦ ЭКВИАТОМНОГО СОСТАВА

Хайрулин А.Р.

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

e-mail: rainjke95@yandex.ru

Жидкие сплавы щелочных металлов со свинцом обладают рядом уникальных особенностей, связанных со значительной разницей в электроотрицательности компонентов. Так, например, на концентрационной зависимости электросопротивления жидкой системы Cs–Pb наблюдается острый максимум в районе 50 ат. % Pb [1], а температурный коэффициент электросопротивления имеет минимум при данной концентрации. Жидкая система Na–Pb демонстрирует схожее поведение, но положение экстремумов сдвигается в область состава Na₄Pb [2]. Существует предположение, что такое поведение связано с образованием в структуре расплавов A–Pb (A – щелочной металл) ионных комплексов различных конфигураций [3, 4], причем вид комплекса зависит от размера атома щелочного металла [5]. Некоторые сплавы систем A–Pb предлагаются в качестве теплоносителей для перспективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах [6]. Основной целью данной работы было получение надежных экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости жидкого сплава Na₅₀Pb₅₀.

Измерения энтальпии сплава проводились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой [7]. Подготовка образца и его герметизация электродуговой сваркой в ампуле из нержавеющей стали происходила в перчаточном боксе в атмосфере аргона. Исходными компонентами являлись свинец марки С0 с чистотой 99,992 масс. % и натрий с чистотой 99,9 масс. %. Состав готовился весовым методом на электронных весах с погрешностью 2 мг. Содержание свинца в готовом образце составило 49,999 ат. %.

Заявленная точность измерений [7] подтверждается экспериментами по измерению энтальпии лейкосапфира Al₂O₃. Среднее отклонение полученных нами экспериментальных значений энтальпии лейкосапфира от прецизионных данных [8] составило всего лишь 0,065% или 0,26 Дж/г.

При проведении термического анализа сплава был обнаружен один тепловой эффект, соответствующий кристаллизации расплава. Измеренная температура ликвидуса составила 644,5 К, что в пределах оцениваемых погрешностей совпадает с данными [3].

Всего было получено 23 экспериментальные точки в интервале температур 420–1075 К. Данные по энтальпии аппроксимировались полиномами 2 степени. Экспериментальные точки, их аппроксимация, а также рассчитанная теплоемкость представлены на рис. 1.

Значения энтальпии расплава Na₅₀Pb₅₀ из [3] лежат выше рекомендуемой нами температурной зависимости не более чем на 1%. Максимальное расхождение значений теплоемкости достигает 2,2%.

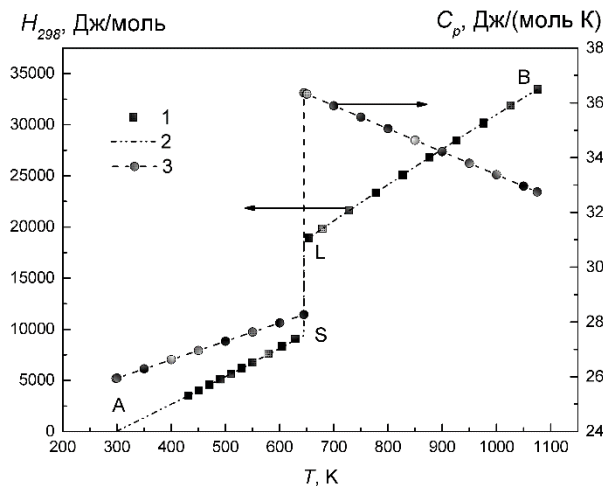


Рис. 1. Измеренные значения энтальпии (1), ее аппроксимация (2) и температурная зависимость теплоемкости (3) сплава Na₅₀Pb₅₀ в твердом (AS) и жидком (LB) состояниях.

В жидком состоянии наблюдается незначительное (по сравнению с другими эквивалентными сплавами A–Pb [3]) падение теплоемкости с температурой. Также мало (не более 22%) превышение теплоемкости расплава над теплоемкостью идеального раствора. Оба этих факта подтверждают предположение [3] о сравнительно низкой концентрации ионных комплексов в структуре эквивалентного расплава Na–Pb.

Список литературы

1. Meijer J. A., Vinke G. J. B., van der Lugt W. Resistivity of liquid Rb-Pb and Cs-Pb alloys //Journal of Physics F: Metal Physics. – 1986. – Vol. 16. – No. 7. – P. 845.
2. Calaway W. F., Saboungi M. L. Electrical resistivity of the Na-Pb system: measurements and interpretation //Journal of Physics F: Metal Physics. – 1983. – Т. 13. – №. 6. – С. 1213.
3. Saboungi M. L. et al. Heat capacity of some liquid Zintl compounds: Equiatomic alkali-lead alloys //The Journal of chemical physics. – 1988. – Vol. 89. – No. 9. – P. 5869–5875.
4. Гантмахер В. Ф. Химическая локализация //Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – №. 11. – С. 1283–1293.
5. Geertsma W., Dijkstra J., Van der Lugt W. Electronic structure and charge-transfer-induced cluster formation in alkali-group-IV alloys //Journal of Physics F: Metal Physics. – 1984. – Vol. 14. – No. 8. – С. 1833.
6. Субботин В. И. и др. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики //Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – №. 1. – С. 31.
7. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 4. – С. 150–156.
8. Ditmars D.A., Douglas T.B. Measurement of the relative enthalpy of pure α -Al₂O₃ (NBS heat capacity and enthalpy standard reference material No. 720) from 273 to 1173 K // Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry. – 1971. – Vol. 75A – P. 401–420.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2)

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ТАНТАЛА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ****Хищенко К.В.^{1,2,3,4}**¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва² Московский физико-технический институт, Долгопрудный³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск⁴ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

e-mail: konst@ihed.ras.ru

Для численного моделирования теплофизических и гидродинамических процессов в условиях интенсивного импульсного энерговыклада требуется знать уравнение состояния среды в широком диапазоне давлений и температур. Расчет термодинамических характеристик вещества сугубо теоретическими методами встречает трудности, связанные с необходимостью учета межчастичного взаимодействия в случае сильной неидеальности. Традиционным путем к созданию широкодиапазонных моделей термодинамики вещества является полуэмпирический подход, в котором вид функциональной связи между термодинамическими величинами устанавливается из теоретических представлений, а индивидуальные коэффициенты в этой функции находятся из требования хорошего согласия с имеющимися опытными данными.

Настоящая работа посвящена описанию термодинамических свойств тугоплавкого металла тантала при высоких давлениях и температурах. Предложена модель уравнения состояния на основе зависимости свободной энергии от удельного объема и температуры для разных фаз вещества (твердой, жидкой, газообразной). В отличие от известных ранее моделей

выбранная форма зависимости термодинамического потенциала обеспечивает более широкий диапазон применимости уравнения состояния, а также правильное поведение термодинамических функций при низких температурах.

Проведены расчеты термодинамических характеристик тантала при высоких давлениях и температурах. Рассчитаны параметры границ фазового равновесия кристалл–жидкость, кристалл–газ и жидкость–газ.

В докладе представлено сопоставление результатов расчетов с имеющимися данными экспериментов по изобарическому нагреву, изотермическому сжатию и ударно-волновому нагружению этого металла.

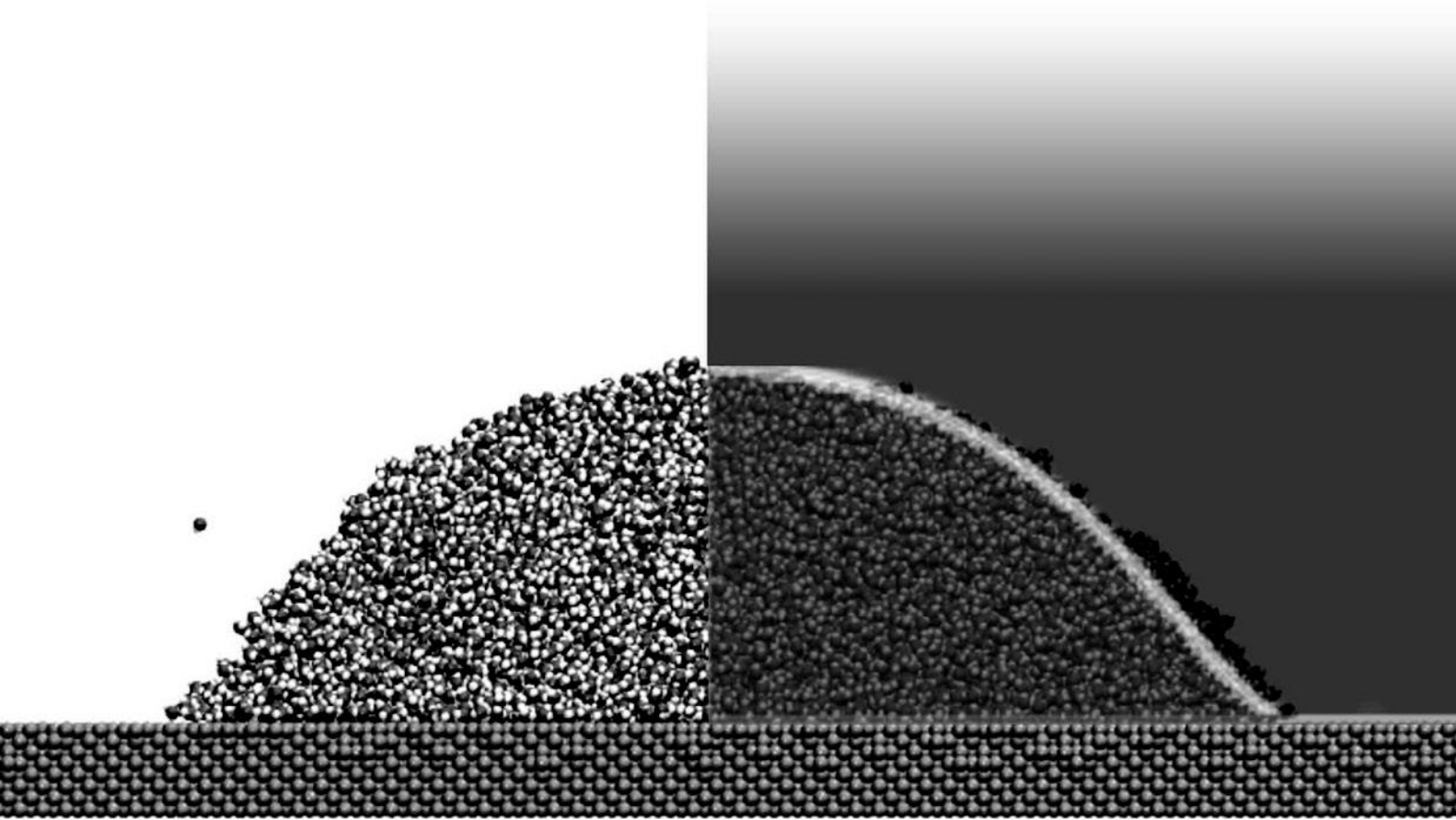
Полученное уравнение состояния тантала хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными и может быть эффективно использовано при моделировании теплофизики и гидродинамики процессов при высоких давлениях и температурах.

*Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00713,
<https://rscf.ru/project/19-19-00713/>)*



СЕКЦИЯ 9

Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах



ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

Бойко Е.В.^{1,2}, Пильник А.А.¹, Смозж Д.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: renboyko@gmail.com

Отличительная особенность устройств, генерирующих звук благодаря термоакустическому эффекту (в сравнении с традиционными звуковыми эмиттерами), является отсутствие механически подвижных частей, что позволяет получать звуковое излучение с частотой вплоть до 1 МГц [1]. Эффективный термоакустический эмиттер должен отвечать следующим требованиям: 1) Обладать низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью для возможности генерации высокочастотного звукового излучения; 2) Эффективно передавать тепло окружающей среде, с минимальными тепловыми потерями, связанными с контактом проводящего слоя с подложкой; 3) Обладать достаточной площадью проводящей поверхности для создания необходимого звукового поля.

Графен является наиболее подходящим материалом, отвечающим всем вышеперечисленным требованиям. Сочетание высокой теплопроводности в 5300 Вт/м×К, а также толщины в 0.3 нм, делает графен превосходным кандидатом для создания термоакустических устройств. Однако, остается вопрос об эффективной передаче тепла окружающей атмосфере, а также вопрос выбора подложки, на которой будет располагаться токопроводящий графеновый слой. Для подбора параметров графенового покрытия, а также параметров подложки, обеспечивающих наиболее эффективное преобразование тепла в звук, необходима приемлемая теоретическая модель.

Существующие теоретические модели хоть и дают качественные результаты для генерируемого звукового давления в зависимости от входной мощности, частоты возбуждения и прочих параметров, но приводят к различным количественным результатам.

Например, Арнольд и Крэндалл [2] предсказали линейную зависимость генерируемого звукового давления от входной мощности и корневую зависимость от частоты возбуждения.

Группа китайских исследователей под руководством Сяо [3] модифицировали формулу Арнольда и Крэндалла, сохранив корневую зависимость от частоты возбуждения и, основываясь на своих экспериментальных результатах, предложили свою теорию, в рамках которой был введен коэффициент эффективности термоакустической системы, численно равный отношению удельной теплоемкости к единице площади активного излучающего элемента. Они пришли к выводу, что эффективный термоакустический преобразователь должен обладать минимально возможной теплоемкостью на единицу площади.

Вестеринен [4] сформулировал аналитическое уравнение, очень похожее на уравнение Арнольда, Крэндалла и Сяо, но получил линейную зависимость

звукового давления от входной мощности и частоты возбуждения. Им также была проанализирована зависимость частоты и входной мощности термофона. Он пришел к выводу, что эффективность термофона линейно зависит от подаваемой мощности и от квадрата частоты теплового возбуждения.

Вдобавок к существующим различиям, ни одна из существующих теоретических моделей не учитывает наличия неоднородного распределения температурного поля в поликристаллическом покрытии графена. В работе [5] было показано, что температурный профиль в пределах одного кристаллита графена имеет вид гиперболического косинуса.

Таким образом, цель настоящей работы заключается в представлении наиболее полной теоретической модели термоакустического излучения в графеновом покрытии с учётом неоднородного распределения температуры на её поверхности.

В рамках работы была исследована амплитудно-частотная характеристика термофонов на основе полимер-графеновых композитов. Также было исследовано влияние термических параметров подложки на эффективность термоакустического преобразования. Показано, что для достижения максимального КПД необходимо использовать подложку с минимально возможной теплопроводностью и теплоёмкостью. Была построена модель для численного моделирования термоакустического элемента, описывающая распределение в пространстве полей давления и температуры вблизи поликристаллического покрытия графена – активного элемента термофона.

Список литературы

1. M. Daschewski, R. Boehm, J. Prager, M. Kreutzbruck, and A. Harrer, "Physics of thermo-acoustic sound generation," // *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 11, p. 114903, Sep. 2013.
2. H. D. Arnold and I. B. Crandall, "The thermophone as a precision source of sound," // *Phys. Rev.*, vol. 10, no. 1, pp. 22–38, Jul. 1917.
3. L. Xiao *et al.*, "Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers," // *Nano Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 4539–4545, Dec. 2008.
4. V. Vesterinen, A. O. Niskanen, J. Hassel, and P. Helistö, "Fundamental efficiency of nanothermophones: Modeling and experiments," // *Nano Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 5020–5024, Dec. 2010.
5. D. V. Smovzh *et al.*, "Joule heater based on single-layer graphene," // *Nanotechnology*, vol. 31, no. 33, pp. 335704–335711, Aug. 2020.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-00250)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА МАРАНГОНИ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСТВОРОВ В X-ОБРАЗНОМ МИКРОРЕАКТОРЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Брацун Д.А.¹, Костарев К.Г.^{1,2}, Мошева Е.А.^{1,2}, Шмыров А.В.^{1,2}, Мизев А.И.^{1,2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет

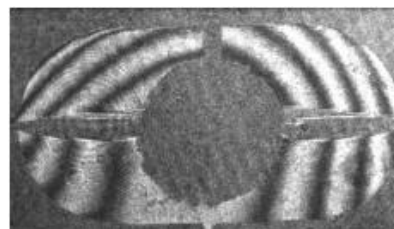
² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: DABracun@pstu.ru

Микрожидкостные устройства широко используются в микробиологии, тонком органическом синтезе, фармацевтике, биомедицине и т. д. В большинстве случаев требуется быстрое перемешивание жидкостей, проходящих через микрожидкостный чип. Микрореакторы проточного типа, используемые в химическом синтезе [1], имеют характерный размер канала, который достаточно мал по сравнению со стандартным размером лаборатории в гидромеханике, но достаточно велик, чтобы сделать механизм диффузионного смешения неэффективным. Одним из стандартных решений проблемы является выделение специальной зоны перемешивания со сложной формой границ канала с целью создания вихревых течений, что позволяет повысить эффективность смешения реагентов. При этом разработчиками, как правило, не рассматривается возможность использования механизмов естественной конвекции, интенсивность которой априори считается слабой на малых масштабах микрореакторов. В настоящем докладе показано, что в случае использования реагентов, один из которых (или оба) являются поверхностно-активными веществами, создание в зоне смешивания межфазной поверхности приводит к развитию интенсивного конвективного течения, обусловленного концентрационным эффектом Марангони. В данной работе мы экспериментально и численно изучаем возможность использования конвекции Марангони, усиленной воздействием поля тяжести через специальный механизм взаимодействия [2-4], для перемешивания растворов в X-образном проточном микрореакторе.

Предлагаемая схема смесителя включает прямоугольную полость размерами 10×15 мм и толщиной 2.0 мм, имеет два входных и два выходных канала, через которые осуществляется подача двух растворов с одинаковым расходом. Тестирование устройства проводилось для случая без реакции, где вода и водный раствор изопропилового спирта играли роль входящих растворов. Тонкое пластиковое кольцо диаметром 6 мм с двумя прорезями шириной 1 мм расположено в центре полости и заполнено воздухом. Таким образом, в системе есть две межфазные поверхности жидкость-газ, чувствительные к наличию поверхностно-активного вещества.

Экспериментальное исследование устройства показало, что концентрационно-капиллярный механизм конвекции Марангони может быть успешно использован для перемешивания потоков в микрореакторе. На рис. 1 приведены изображения, полученные с помощью интерферометра Физо, демонстрирующие распределение поля концентрации растворов, при отсутствии (а) и наличии (б) межфазной поверхности.



а)



б)

Рис. 1. Интерферограммы, демонстрирующие распределение концентрации растворов, в случае диффузионного (а) и конвективного (б) механизмов перемешивания в X-образном смесителе.

Важно отметить, что устройство адаптируется под неоднородность поступающих растворов. При возникновении сильного градиента вещества вдоль межфазной границы конвективный механизм включается и продолжает работать вплоть до полного исчезновения причины, вызвавшей движение поверхности. Включения и выключения миксера происходят периодически в соответствии с фундаментальным механизмом колебаний, изученным в работе [2]. Предложенная схема смешивания растворов может быть обобщена на случай многоканального устройства или целой системы точечных микромиксеров, расположенных в потоке.

Список литературы

1. Reschetilowski W. Microreactors in preparative chemistry: practical aspects in bioprocessing, nanotechnology, catalysis and more // Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2013.
2. Kostarev K., Shmyrov A., Zuev A., Viviani A. Convective and diffusive surfactant transfer in multiphase liquid systems // Exp. Fluids. 2011. Vol. 51, P. 457–470.
3. Bratsun D., Kostarev K., Mizev A., Aland S., Mokbel M., Schwarzenberger K., Eckert K. Adaptive Micromixer Based on the Solutocapillary Marangoni Effect in a Continuous-Flow Microreactor // Micromachines. 2018. Vol. 9, No.11. Art. 600.
4. Shmyrov A.V., Mizev A.I., Demin V.A., Petukhov M. I., Bratsun D.A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 877. P. 495–533.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-11-00133)

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В Y-ОБРАЗНОМ ПРОТОЧНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Брацун Д.А.¹, Сираев Р.Р.¹, Мошева Е.А.^{1,2}, Шмыров А.В.^{1,2}, Мизев А.И.^{1,2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: DABracun@pstu.ru, RRSiraev@pstu.ru

Микрожидкостные устройства широко используются в микробиологии, тонком органическом синтезе, фармацевтике, биомедицине и т. д. В большинстве случаев требуется быстрое перемешивание жидкостей, проходящих через микрожидкостный чип. Микрореакторы проточного типа, используемые в химическом синтезе [1], имеют характерный размер канала, который достаточно мал по сравнению со стандартным размером лаборатории в гидромеханике, но достаточно велик, чтобы сделать механизм диффузионного смешения неэффективным. В данной работе мы впервые экспериментально и теоретически изучаем эффективность использования различных механизмов естественной конвекции для перемешивания жидкостей, поступающих в Y-образный микрореактор проточного типа.

Растворы, вступающие в реакцию, как правило, различаются плавучестью и скоростью диффузии растворенных веществ, что делает их чувствительными к различным типам гидродинамической неустойчивости. Примером такой реакции может служить нейтрализация раствора кислоты раствором основания. Известно, что протекание такой реакции в двухслойной системе жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу может сопровождаться формированием неустойчивости Рэлея-Тейлора (RT), двойной диффузии (DD) и диффузионного слоя (DLC) [2,3]. При исследовании данной реакции в проточном Y-образном канале нами также обнаружено развитие этих типов неустойчивости (рис. 1).

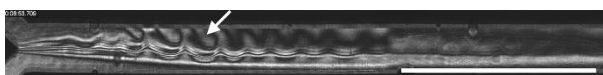


Рис. 1. Интерферограмма, демонстрирующая развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора, в Y-образном канале проточного типа в условиях реакции нейтрализации. Стрелкой показаны всплывающие плюмы вследствие развития неустойчивости. Горизонтальная белая черта – 1 см.

В силу того, что в реакционной системе неустойчивость может быть обусловлена множеством механизмов, на первом этапе исследования мы изучаем каждую из неустойчивостей в проточной системе без реакции. Мы рассматриваем Y-образный канал [1], в каждое плечо которого поступают два раствора по разным трубкам в общий канал, где начинается их смешение (рис. 2а). Размеры используемого канала: $d = 2.5$ мм, $l = 70$ мм, толщина – 200 мкм. Численный расчет производился в трехмерной постановке задачи. Оценка степени смешения основывалась на вычислении величины:

$$M(x) = \left(1 - \frac{\sigma(x)^2}{\sigma_{\max}^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где x – координата вдоль канала. В эксперименте для визуализации использовался краситель (родамин). В этом случае стандартное отклонение яркости серого $\sigma(x)$ создается концентрацией красителя. В расчётной модели $\sigma(x)$ – стандартное отклонение концентрации раствора, поступающего из верхнего входного отверстия. На основании (1) оценивалась удельная длина смешивания L/L_{DD} (выраженная в единицах для DD-неустойчивости), после которой происходит полное ($M = 1$) или частичное перемешивание растворов.

Обнаружено, что DD-конвекция [4], мгновенные поля концентраций которой представлены на рис. 2б,в, уменьшает длину смешения на порядок по сравнению с чистой диффузией, что указывает на возможность использования механизмов естественной конвекции для смешения потоков в микроканалах.

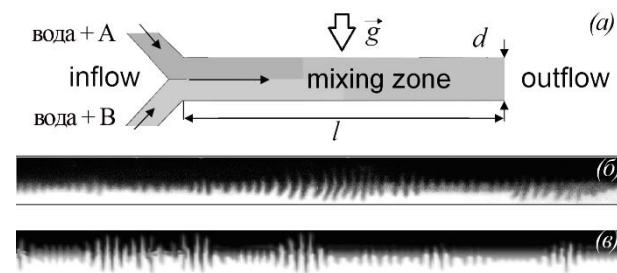


Рис. 2. (а) Схематическое изображение Y-образного микрореактора проточного типа; мгновенный вид неустойчивости двойной диффузии, наблюдаемой в ходе эксперимента (б) и при численном моделировании (в).

Эффективное перемешивание становится возможным благодаря возникновению конвективной структуры, выполняющей роль локального перемешивателя. В докладе обсуждается влияние объемного расхода Q на эффективность смешения, а также приводится сравнительная характеристика результатов, полученных для различных механизмов естественной конвекции и чистой диффузии.

Список литературы

1. Reschetilowski W. Microreactors in preparative chemistry: practical aspects in bioprocessing, nanotechnology, catalysis and more // Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2013.
2. Mizev A., Mosheva E., Bratsun D. Extended classification of the buoyancy-driven flows induced by a neutralization reaction in miscible fluids. Part 1. Experimental study // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 916. A22.
3. Bratsun D., Mizev A., Mosheva E., Extended classification of the buoyancy-driven flows induced by a neutralization reaction in miscible fluids. Part 2. Theoretical study // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 916. A23.
4. Turner J.S. (1974) Double-diffusive phenomena // Annual Review of Fluid Mechanics. 1974. V. 6, No. 1. P. 37–54.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-11-00133)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРОМ МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ С БИФИЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАНИЯ

Васильев М.М.^{1,2}, Шухов Ю.Г.¹, Терехов В.В.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}, Самохвалов Ф.А.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: vasilevmik.arck@gmail.com

В последние годы ведется активное исследование поверхностей с бифильными свойствами смачивания, ввиду их большого потенциала для прикладного применения: создание самоочищающихся и антикоррозийных поверхностей [1, 2], улучшенного спрейного охлаждения [3], интенсификация теплообмена [4] и т.д. Поверхности с бифильными свойствами представляют собой набор областей с различными свойствами смачиваемости (гидрофобными и гидрофильными). Особый интерес проявляется к поверхностям, у которых бифильные паттерны образованы супергидрофобными и супергидрофильными участками. Очевидно, что подбор узора на поверхности зависит от поставленной прикладной задачи и может быть осуществлен с помощью численного моделирования и последующей экспериментальной реализации.

Известно, что смачиваемость поверхности определяется химическим составом и ее морфологией на микро-/наноуровне. Одним из наиболее перспективных подходов, способных тонко контролировать оба этих параметра, является импульсная лазерная абляция (ИЛА) [5]. Однако, использование лазера для получения бифильных поверхностей ограничено представлено в литературе [6]. Основное преимущество лазерной обработки – возможность создания паттерны произвольной геометрии с высоким пространственным разрешением. В данной работе предлагается комплексно исследовать взаимодействие капель воды с поверхностями меди модифицированных лазером: провести численное моделирование методом решеточных уравнений Больцмана и экспериментальную реализацию падения капель воды на поверхности с бифильными свойствами смачивания.

Процесс изготовления бифильной медной поверхности представлен на рис. 1. На первом этапе медная поверхность (чистота 99.9%) обрабатывалась в воздухе с помощью Nd:YAG лазера ($\lambda = 1064$ нм) для достижения супергидрофильных состояний. Параметры обработки представлены в предыдущей работе авторов [7]. На втором этапе локально были созданы гидрофильные участки, путем удаления супергидрофильного слоя лазером в условиях вакуума. Численное моделирование в данной работе осуществляется с помощью метода решеточных уравнений Больцмана (LBM). Метод LBM хорошо известен в литературе, как инструмент для описания различных задач физики течений с фазовыми превращениями [8, 9]. В ходе работы была получена база экспериментальных данных о динамике взаимодействия капель воды при падении на поверхности с бифильными свойствами смачивания, которая позволила верифицировать численную модель. В итоге получена

численная модель на основе LBM, позволяющая обобщить полученные экспериментальные результаты на широкий диапазон режимов. Что дает возможность создания текстурированных поверхностей с заданными свойствами смачивания для практических и экспериментальных задач.

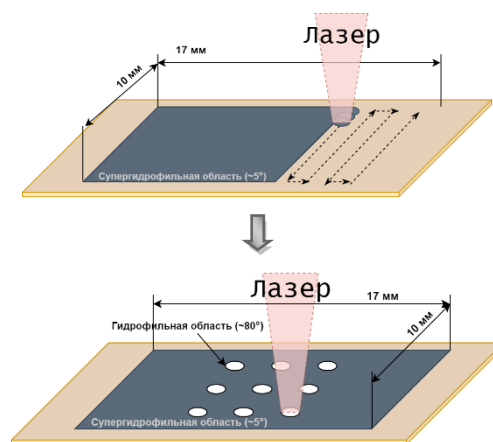


Рис. 1. Схема процесса создания бифильной медной поверхности. Сначала медь обрабатывается в условиях атмосферы. Затем в условиях вакуума лазером локально удаляются супергидрофильные участки.

Список литературы

1. Ganesh V. A. et al. A review on self-cleaning coatings // Journal of Materials Chemistry. 2011. T. 21. № 41. P. 16304–16322.
2. Zhang F. et al. Preparation of superhydrophobic films on titanium as effective corrosion barriers // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V., 2011. Vol. 257, № 7. P. 2587–2591.
3. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling—Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 115. P. 1174–1205.
4. Venkata K.D., Suresh S. Wettability control of copper surface using picosecond laser for enhancing condensation heat transfer // Mater. Sci. Forum. 2020. Vol. 978 MSF, № February. P. 505–513.
5. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Applied Surface Science. 2020. T. 512. C. 145753.
6. Koukoravas T. P. et al. Spatially-selective cooling by liquid jet impinging orthogonally on a wettability-patterned surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – T. 95. – С. 142–152.
7. Vasilev M. M. et al. Modification of the copper wettability by nanosecond laser texturing // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 2119. – №. 1. – С. 012126.
8. Tai Y. et al. Research on the contact time of a bouncing microdroplet with lattice Boltzmann method // Physics of Fluids. – 2021. – T. 33. – №. 4. – С. 042011.
9. Li Q., Luo K. H., Li X. J. Lattice Boltzmann modeling of multiphase flows at large density ratio with an improved pseudopotential model // Physical Review E. – 2013. – T. 87. – №. 5. – С. 053301.

Работа поддержана РФФ
(грант №18-79-10119П)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА ПРИ ДВУХФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА MICRO-LIF

Вострецов С.О.^{1,2}, Ягодницына А.А.^{1,2}, Ковалев А.В.^{1,2}, Бильский А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: yagodnitsinaaa@gmail.com

В настоящее время применение микроканалов в различных отраслях промышленности и науки является весьма перспективным. Они могут применяться как теплообменники, химические реакторы, микромиксеры и микроэкстракторы. Ввиду своих малых размеров микроканалы обеспечивают высокое отношение площади межфазной границы к объёму, что позволяет достичь высоких интенсивностей различных процессов.

Использование микроканалов в качестве экстракторов способствует нивелированию недостатков экстракторов, используемых на промышленных предприятиях, путём повышения интенсивности экстракции и безопасности устройств. Использование снарядного режима течения позволяет в значительной степени интенсифицировать массообмен за счёт увеличения площади межфазной границы, а также циркуляции скорости внутри снарядов и перемычек.

Основными величинами при изучении массообмена между фазами при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей являются: эффективность экстракции, показывающая отношение текущей концентрации примеси в фазе к максимально возможному значению, и общий объёмный коэффициент массообмена, показывающий интенсивность массообмена на участке канала.

$$\%E = \frac{c}{c^*} \quad k_L a = \frac{\ln\left(\frac{c^{in} - c^*}{c^{out} - c^*}\right)}{\tau \left[\frac{1}{K\varepsilon_1} + \frac{1}{1 - \varepsilon_1}\right]}$$

где c^* - равновесная концентрация, τ - время пребывания, ε - объемная доля, K - коэффициент распределения.

Существующие экспериментальные исследования массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканалах либо выполнены интегральными методами измерения, либо характеризуются узкими диапазонами расходов и отношений расходов. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния отношения расходов и общего расхода фаз на эффективность массообмена при течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с гидравлическим диаметром 267 мкм. В качестве дисперсной фазы использовался водный раствор глицерина 70%, в качестве несущей - трибутилфосфат (ТБФ). Экстрагируемой примесью являлся родамин 6Ж, который использовался в качестве флуоресцентного красителя для метода micro-LIF. Поток создавался с помощью двойного шприцевого насоса и освещался ртутной лампой. Картины флуоресценции записывались на цифровую камеру 4 МПикс.

Разработана методика локального исследования массообмена посредством измерения концентрации в перемычках несущей фазы. Первым этапом является

определение равновесной концентрации между фазами. Для этого водоглицериновые растворы родамина 6Ж в различных концентрациях приводились в контакт с несущей фазой в равных объемах и перемешивались на магнитной мешалке. После отстаивания фазы разделялись. С помощью метода micro-LIF строилась калибровочная кривая для водной фазы и определялись остаточные (равновесные) концентрации в разделённых фазах, что позволило рассчитать коэффициент распределения.

Вторым этапом является измерение полей концентраций в перемычках несущей фазы при течении несмешивающихся жидкостей в микроканале. С одного входа микроканала подавался водный раствор глицерина с концентрацией родамина 6Ж 30 мг/л, а с другого - ТБФ, поток создавался с помощью двойного шприцевого насоса. Измерения полей концентраций проводилось в пяти областях микроканала. Концентрации определялись с помощью калибровочной кривой, построенной по разделённым жидкостям. Для расчета коэффициента массообмена и эффективности экстракции использовались средние значения концентраций в перемычках.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что повышение общего расхода фаз приводит к росту эффективности экстракции (см. Рис.1) и объемного коэффициента массообмена при равных временах пребывания. Это связано с повышением интенсивности вихрей внутри перемычек и снарядов, что влияет на градиент концентрации на межфазной границе. Показано, что увеличение отношения расходов дисперсной и несущей фаз приводит к уменьшению эффективности экстракции и объемного коэффициента массообмена при равных временах пребывания. Полученные экспериментальные данные могут напрямую использоваться при проектировании микроэкстракторов и микрореакторов.

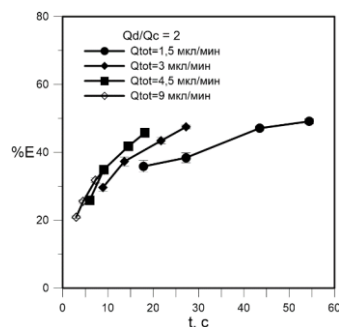


Рис.1 Зависимость эффективности экстракции от времени прохождения при постоянном расходе дисперсной (Q_d) и несущей (Q_c) фаз; Q_{tot} - суммарный расход.

Работа поддержана МК (грант № МК-1230.2021.4)

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ МИКРОЭМУЛЬСИЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Замула Ю.С., Батыршин Э.С., Афанасьев М.О., Питюк Ю.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: yuriy zamula@gmail.com

Микроэмульсии (МЭ) – это термодинамически устойчивые микрогетерогенные системы, образованные несмешивающимися жидкостями в присутствии мицеллообразующих ПАВ [1]. МЭ нашли широкое распространение в пищевой и нефтегазовой промышленности, фармацевтике, синтезе наночастиц и др. Сверхнизкие значения межфазного натяжения и солюбилизующая способность МЭ делает их очень привлекательными для использования в нефтегазовой промышленности в качестве агентов для повышения нефтеотдачи продуктивных пластов. Физические свойства МЭ, такие как, например, вязкость или поверхностное натяжение напрямую связаны с их внутренней структурой. Для характеристики структуры МЭ применяют различные методы. Одними из основных являются реологические исследования, измерение электропроводности, определение коэффициентов самодиффузии, ЯМР, дифрактометрия и др. Для прямой визуализации микроструктуры МЭ используют трансмиссионные (ТЭМ) и сканирующие электронные микроскопы (СЭМ). Атомно-силовая микроскопия (АСМ) часто используется в качестве дополнительного инструмента для определения характеристик капель нано- и микроэмульсий. В настоящей работе применялся метод АСМ основанный на сканировании адсорбированных структур на границе твердая подложка-МЭ [2].

Для приготовления МЭ были использованы анионный ПАВ – додецилсульфат натрия (Sigma-Aldrich, США) и соПАВ – *n*-бутанол (Химреактивснаб, Россия). Соотношение (по массе) ПАВ/соПАВ = 1:2 выбиралось на основании данных из литературных источников как оптимальное [3]. В качестве масляной фазы использовался *n*-гептан (Химреактивснаб, Россия). Водная фаза представляла собой 4% (по массе) водный раствор NaCl (Химреактивснаб, Россия). Граница однофазной области в трехкомпонентной диаграмме определялась обычным методом титрования МЭ водным раствором. Эффективная вязкость МЭ определялась в однофазной области. Были получены МЭ с одинаковым содержанием ПАВ, но различным соотношением рассол/масло. Кроме чистых МЭ были приготовлены растворы МЭ с наночастицами диоксида кремния. Для этого для приготовления рассола была использована 1% (по массе) суспензия наночастиц в воде. Использовались промышленно выпускаемые гидрофильные наночастицы пирогенного диоксида кремния Аэросил 300 (Evonik Operations GmbH) со средним размером отдельных частиц 7 нм. Суспензия приготавливалась в два этапа с использованием ротационной мешалки и ультразвукового диспергатора. Измерение эффективной вязкости растворов проводилось на ротационном вискозиметре Brookfield DV-III-Pro. Измерения вязкости проводились при термостатировании при температуре 30°C. Замечено, что

вязкость увеличивается при увеличении соотношения рассол/гептан, а добавление наночастиц в малых концентрациях практически не влияет на вязкость МЭ.

Образцы для АСМ приготавливались следующим образом: на пластинку слюды размером 15×15 мм, предварительно очищенную с помощью скотча путем снятия единичного слоя, наносилась МЭ в объеме 100 мкл с помощью дозатора. После адсорбции на поверхности слюды, имеющей отрицательный заряд высокой плотности [4], в течение 1 мин образец промывался сверхчистой водой Milli-Q, остатки воды удалялись с помощью сжатого воздуха, после чего высушивался при 105°C в течение 30 мин.

Эксперименты по изучению структуры МЭ проводились на АСМ Agilent 5500AFM в полуконтактном режиме кантилевером NSG30 (TipsNano), радиус кривизны острья <10 нм. Размер скана 5×5 мкм с разрешением 512×512 точек. Результат сканирования представлен на рис.1.

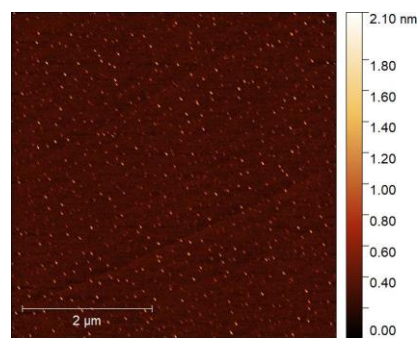


Рис. 1. АСМ топография поверхности слюды после взаимодействия с МЭ.

Средний размер наблюдаемых структур адсорбированного вещества изменялся в диапазоне 32÷108 нм, высотой 2÷7 нм. Также было замечено, что с уменьшением содержания ПАВ/соПАВ в МЭ увеличивается средний размер структур адсорбированного вещества и уменьшается их количество.

Список литературы

1. Миттел К. Л., Мукерджи П., Принс Л. М. и др. Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии / Под ред. Миттел К.Л. М.: Мир, 1980. 597 с.
2. Salvia-Trujillo L. et al. Effect of processing parameters on physicochemical characteristics of microfluidized lemongrass essential oil-alginate nanoemulsions //Food Hydrocolloids. 2013. V. 30. No. 1.P. 401–407.
3. Bellocq A. M. et al. Three—dimensional phase diagram of the brine-toluene-butanol-sodium dodecyl sulfate system //Journal of Colloid and Interface Science. 1980. V. 74. No. 2. P. 311–321.
4. Preetz C. et al. Application of atomic force microscopy and ultrasonic resonator technology on nanoscale: Distinction of nanoemulsions from nanocapsules //European Journal of Pharmaceutical Sciences. 2010. V. 39. No. 1–3. P. 141–151.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-10212)

РАЗРАБОТКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ОБЪЕКТОВ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ

Ковалев А.В.^{1,2}, Ягодницына А.А.^{1,2}, Бильский А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: bilsky@itp.nsc.ru

Аддитивные технологии 3D-печати на настоящий момент являются одними из наиболее перспективных методов производства как прототипов устройств, так и конечных функциональных изделий. Метод робокастинга, основан на выдавливании вязкого материала с псевдопластическими свойствами для создания трехмерной формы. Отличием от стандартного экструзионного метода 3D-печати является отсутствие нагрева термопластиков. Реакция отверждения происходит посредством дозирования двух реагирующих компонентов либо под воздействием тепла или УФ-излучения. Метод робокастинга хорошо зарекомендовал себя для печати сложных электронных компонент, каркасов для тканевой инженерии, керамических изделий, аккумуляторов энергии и т.д.

Актуальной для робокастинга является задача 3D-печати функционально гетерогенных объектов без использования многоступенчатого процесса. Ряд подходов включают последовательную печать различных чернильных материалов через несколько сопел или смешивание чернил в разных пропорциях до этапа экструзии. Недостатками данных подходов являются воздушные зазоры, возникающие в процессе смены чернил. Принципиально другим подходом является использование микрофлюидных устройств для создания двухфазных или двухжидкостных чернил с программируемыми свойствами, при этом во время 3D-печати изменяются свойства капельных или жидкостных включений, такие как размер, частота следования, что приводит к изменению механических свойств напечатанных объектов после отвердевания несущей фазы чернил.

Настоящая работа направлена на разработку фундаментальных основ построения устройств 3D-печати двухфазными или двухжидкостными чернилами с программируемыми свойствами с помощью микрофлюидных устройств. Проведено экспериментальное исследование влияния режимов работы и геометрии микрофлюидных устройств, а также физических свойств жидкостей на формирование капельных включений. В работе исследовались Т-образная и Х-образная геометрии микроканалов с гидравлическим диаметром 267 мкм. В качестве несущей фазы использовались вязкие и слабоупругие вязкие жидкости: термоотверждаемый полимер ПДМС Sylgard 184 без и с добавлением термоотверждающего агента, а также силиконовые масла с близкими значениями вязкости. В качестве дисперсной фазы использовалась дистиллированная вода. На основе результатов визуализации выделено три различных вида сегментированных режимов течения: устойчивый снарядный режим, снарядный режим со срывом микрокапель дисперсной фазы и неустойчивый переходной режим течения (см. Рис. 1). Построены карты режимов, показано,

что влияние входа в канал на границы режимов течения для случая Х- и Т-образных геометрий несущественно.

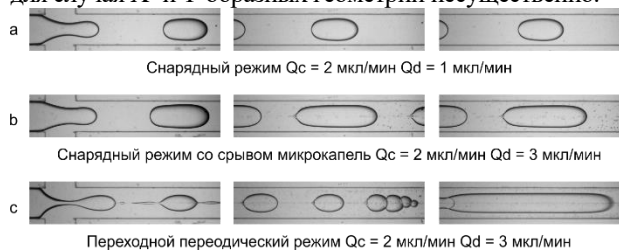


Рис.1 Характерные режимы течения для системы ПДМС – вода в Х-канале в области формирования и вниз по потоку.

Обнаружено, что переход между устойчивым снарядным режимом и снарядами с отрывом микрокапель лучше всего описывается в терминах числа капиллярности, построенного по суммарной среднерасходной скорости фаз Ca_{bulk} и отношения расходов (см. Рис. 2). Данный переход является наиболее важным для задач 3D-печати, так как основным режимом работы предполагается снарядный или капельный, а распад изначальных капель и формирование дочерних может приводить к неоднородности дисперсного состава.

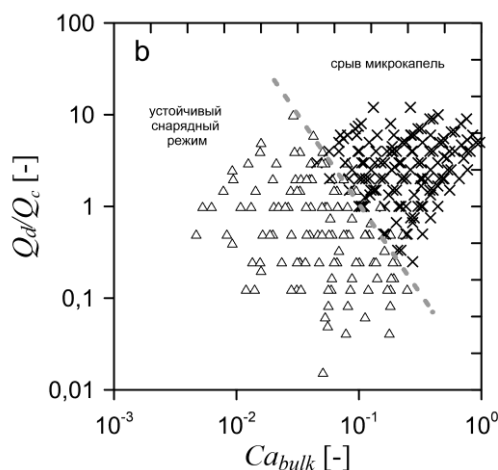


Рис.2 Карта режимов. Пунктиром показан переход между устойчивым снарядным режимом и снарядным режимом с отрывом микрокапель.

Измерены свойства капель и снарядов: длина, площадь, скорость движения, которые являются важными параметрами при проектировании 3-D принтера для печати материалов с программируемыми свойствами. Показан значительный рост размера дочерних микрокапель, отрывающихся от снарядов, в случае вязкоупругой несущей фазы.

Работа поддержана РНФ (грант № 21-19-00732)

ВЛИЯНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ В МИКРОКАНАЛАХ

Ковалев А.В.^{1,2}, Ягодницына А.А.^{1,2}, Бильский А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: therfmig@gmail.com

Микроканальные потоки жидкость-жидкость на сегодняшний день являются перспективной альтернативой для проведения химических реакций, биологических и медицинских исследований и анализов, создания эмульсий с заданным размером включений и многих других практических приложений. Микроканалы позволяют интенсифицировать процессы теплообмена за счёт высокого отношения площади поверхности фаз к их объёму. Большинство микроканальных устройств на практике работает в снаряжном или капельном режиме течения, где одна жидкость диспергирована внутри другой в виде капель или удлинённых пузырей, ограниченных размерами канала. Однако во многих случаях создаваемые капли и снаряды дисперсной фазы имеют большой разброс по размерам, а в случае, например, вязких жидкостей, область существования снаряжного режима течения мала. Одним из вариантов решения этих проблем является активное управление потоком с помощью наложения внешних возмущений расхода или давления.

В настоящей работе исследовались фундаментальные аспекты влияния пульсаций расхода дисперсной фазы на режимы течения жидкость-жидкость в микроканалах и их характеристики. В экспериментах использовались микроканалы из полиметилметакрилата, выполненные микрофрезированием. Ширина выходного канала составляла 425 мкм, входных 223 мкм, высота канала 212 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру выходного канала 283 мкм. Исследовались потоки трёх различных наборов жидкостей: жидкий полидиметилсилоксан (Dow Corning Sylgard 184) – вода, силиконовое масло – вода и силиконовое масло – водный раствор глицерина объёмной концентрации 85%. Метод высокоскоростной видеосъёмки применялся для определения режима течения и его статистических характеристик: частоты отрыва пузырей, капель и снарядов, диапазона скоростей и размеров дисперсных включений. Для задания потока жидкости и управления внешними возмущениями использовался контроллер давления на основе пьезоактуаторов Elveflow OB-1, позволяющий подавать на вход давление в виде сигнала заданной формы с частотой до 25 Гц и расходомер Bronkhorst BFS, подключенный через систему обратной связи к контроллеру. Амплитуда возмущений выбиралась кратной 1 и 2 средним перепадам давления в невозмущённом потоке.

Было исследовано влияние внешних возмущений расхода на устойчивость параллельного режима в случае силиконовое масло – вода. В зависимости от характерных параметров сигнала показана потеря устойчивости параллельного режима течения

(см. рис. 1), при этом обнаружено, что пульсации затухают тем быстрее, чем выше их частота. Определяющим параметром для однофазных пульсирующих потоков является число Уомерсли (Wo), которое выражает отношение пульсационных эффектов к вязкости среды. На основе анализа размерностей для описания перехода между параллельным и снаряжным режимом за счёт внешних пульсаций была предложена следующая комбинация параметров: $A \cdot Wo_d / Ca^{0,3}$, где A – безразмерная амплитуда, а Ca – число капиллярности.

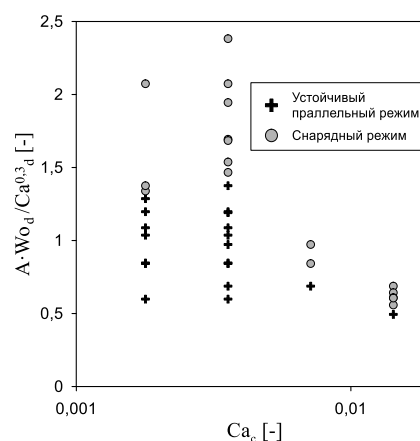


Рис. 1 Карты устойчивости параллельного режима под действием внешних пульсаций дисперсной фазы различной частоты и амплитуды.

Отдельно было исследовано влияние пульсаций на снаряжный и капельный режимы течения. Измерены значения скорости, длины и площади снарядов для всех исследуемых наборов жидкостей. В наборе силиконовое масло – вода имеет место резонансное поведение длины в зависимости от частоты возмущений с точкой резонанса $\omega_r \sim 0,5\omega_0$. Максимальное увеличение средней длины снарядов в этом наборе жидкостей достигало в два раза больших значений, чем в невозмущённом потоке. Для всех амплитуд и всех наборов жидкостей была обнаружена стабилизация снаряжного режима на частотах пульсаций, равным собственным частотам невозмущённого потока. Возможность контролировать среднюю длину снарядов и разброс по длинам за счёт внешнего воздействия может быть использована для разработки интеллектуальной системы управления потоком.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-10307)

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ТРЕХФАЗНЫМИ ЛИНИЯМИ КОНТАКТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРЕВА

Кочкин Д.Ю.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет

e-mail: kochkin1995@mail.ru

Процессы в пленках жидкости широко используются в различных технологических системах. Одним из видов пленочного течения, обеспечивающих высокую интенсивность тепломассопереноса и значительную поверхность контакта фаз при относительно малых удельных расходах жидкости, является ручейковое течение. Ручеек или ривулет определяется как поток жидкости, стекающий по твердой поверхности и ограниченный контактными линиями, где, к слову, наблюдаются максимальные коэффициенты теплоотдачи.

На рис. 1 показан экспериментальный стенд для изучения гидродинамики ручейкового течения жидкости на вертикальной нагреваемой пластине. Экспериментальный стенд включает в себя: рабочий участок (1), систему подачи жидкости (2), оптическую систему визуализации (3), а также инфракрасный сканер (4). Рабочий участок представляет собой сапфировую пластину размером $30 \times 17 \times 2$ мм³, на одну сторону которой нанесено покрытие из оксида индия-олова (ITO). Нагрев подложки осуществляется пропусканием электрического тока через ITO покрытие. Сапфировая пластина в отличие от ITO покрытия прозрачна в инфракрасном диапазоне, что позволяет провести измерения поля температур напыленного нагревателя через сапфировую пластину ИК сканером. В качестве рабочей жидкости используется фторуглеродная жидкость FC-72.

На рисунке 2 представлена эволюция ручейка жидкости FC-72, стекающего по вертикальной пластине с однородным нагревом, в зависимости от средней температуры ITO нагревателя. С увеличением мощности нагрева ширина ручейка существенно уменьшается (рис. 3). Данный эффект обусловлен действием термокапиллярных касательных напряжений, действующих на границе раздела жидкость-газ в направлении увеличения поверхностного натяжения, т.е. в направлении от области контактной линии (где вследствие малой толщины слоя жидкости температура свободной поверхности имеет более высокую температуру) к центру ручейка (где толщина ручейка максимальна). Всего в ходе экспериментов было обнаружено пять режимов течения жидкости в зависимости от температуры нагревателя. Без нагрева ручейки жидкости стабильны и стекают прямолинейно во всем диапазоне исследуемых расходов. Однако при увеличении температуры пластины ручейки жидкости становятся нестабильными и меняют свою форму под действием термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Дальнейшее увеличение температуры нагреваемой пластины вызывает переход к капельному режиму течения, при этом дробление ручейка на капли объясняется неустойчивостью Рэлея – Плато.

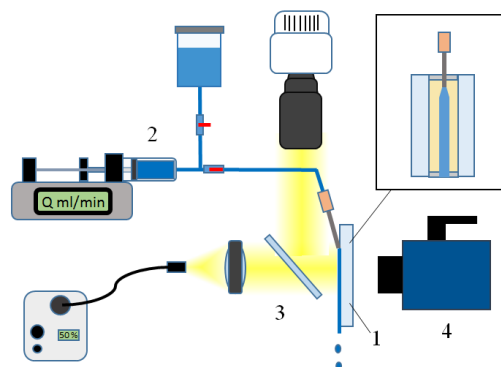


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

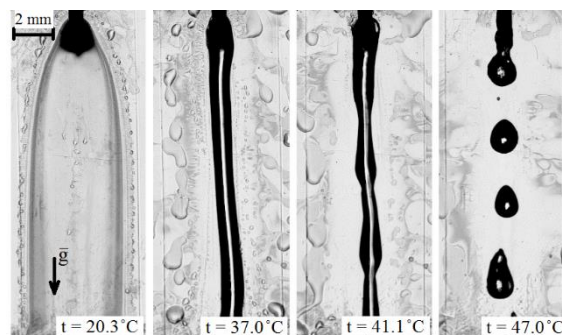


Рис. 2. Ширен изображения ручейка жидкости, расход жидкости $G = 0,7$ мл/мин (в нижнем углу указана средняя температура ITO нагревателя).

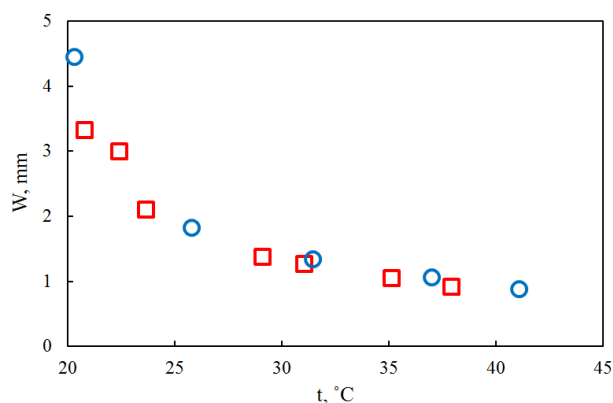


Рис. 3. Ширина ручейка W в зависимости от средней температуры ITO нагревателя t , синие кружки – расход жидкости $G = 0,7$ мл/мин, красные квадраты – расход жидкости $G = 0,3$ мл/мин.

Таким образом, в работе впервые показано, что под действием нагрева со стороны подложки существенно меняется режим пленочного течения, вплоть до расщепления потока на отдельные капли.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00695)

ГИДРОБОФИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ НАНОЧАСТИЦ

Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Иванов Н.С., Лавриков А.В.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

e-mail: chugunkovdv@mpei.ru

Гидрофобные и супергидрофобные покрытия обладают рядом уникальных свойств – водонепроницаемостью, стойкостью против коррозии, биообрастания, неорганических, и органических отложений [1]. Примером сверх гидрофобного покрытия является лист лотоса.

Для создания гидрофобных покрытий необходимо провести анализ процессов, происходящих на нано- и микромасштабах [2–4].

Один из самых простых методов получения гидрофобного покрытия – это механическая деформация поверхности. Для проведения экспериментов были подготовлены пластины из алюминия марки А95 с размерами 4×2×0.1 см. Перед формированием текстуры пластины были обработаны на шлифовальном станке абразивной бумагой с зерном 3 мкм. Затем промыты с помощью ацетона и гидроксида натрия для удаления остатков абразива и других загрязнений, а после промыты в дистиллированной воде.

Метод формирования рельефа с помощью механического воздействия заключался в тиснении текстуры в виде полусфер с помощью гидравлического пресса. Для продавливания использовались твердые сферические частицы алмазной пыли и вольфрама с размерами: 0.1 мм и 0.025 мм, и абразивные структуры с размером зерна от 20 мкм до 200 мкм.

С целью улучшения гидрофобных свойства применяют наночастицы углерода. В начале, на образце продавливалась текстура. Использовались сферические частицы размером 80 мкм. После формирования текстуры образец был установлен в камеру, где осуществляли процесс горения углеводорода с выделением в газовой фазе углерода. Газообразный углерод осаждался на поверхности подложки (рис. 1). После нанесения слоя наночастиц углерода проводилась обработка 0.1% раствором синтетического каучука в ацетоне для упрочнения связи наночастиц с текстурой.

Для сравнения были получены образцы гидрофобных структур, изготовленных с помощью плазменной обработки, микродугового оксидирования и химической полировки. Обработка поверхности металла плазмой приводит к появлению многочисленных углублений и увеличению пористости покрытия, а в результате электрохимической реакции шероховатость поверхности меди уменьшалась. Для поверхности с МДО покрытием получен краевой угол 70°.

Анализ данных для покрытия с гидрофобной текстурой, полученной методом плазменной обработки, показал, что краевой угол не превышает 110°. Максимальный краевой угол обнаружен у покрытия с комбинацией механического продавливания и нанесения слоя наночастиц углерода и пленки полимера – 158°.



Рис. 1 – гидрофобное покрытие на основе наночастиц углерода на поверхности алюминия. Увеличение ×1500.

Таким образом разработанная технология получения гидрофобной структуры на поверхности включает следующие операции: продавливание микротекстуры, нанесение нанорельефа на поверхность микротекстуры, закрепление нанорельефа с помощью пропитки раствором каучука в ацетоне. Данная технология обеспечивает краевой угол от 150 до 160°. Предложенная технология защищена патентом [5].

Для полученного покрытия получены опытные данные по теплоотдаче. При конденсации на горизонтальной трубе с покрытием коэффициент теплоотдачи выше, чем при конденсации на трубе без покрытия при близких параметрах: перепад температуры, газосодержание и давление. Опыты проведены в диапазонах температурных напоров от 10 до 40°C, давлений от 0.009 до 0.1 МПа при газосодержании до 80%.

Список литературы

1. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscale // Begell House, New York, 2016, pp. 50–55.
2. Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V. et al. Wetting of Hydrophobic and Hydrophilic Coatings // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 94. – No 6. – P. 1549–1556.
3. Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Lavrikov A.V. Transport Properties of Coatings Consisting of Al₂O₃ Nanoparticles // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 1. – No 94. – P. 30–35.
4. Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V. et al. Studying the wetting of a surface with combined structure // Thermophys. Aeromech. 28 (6), 849–856 (2021).
5. Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Лавриков А.В. и др. Способ формирования комбинированной супергидрофобной структуры поверхности // Патент № 2769107, опубл. 28.03.2022.

Работа поддержана МинОбрНауки
(тема № FSWF-2020-0021)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ТОНКОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ

Мунгалов А.С.^{1,2}, Кочкин Д.Ю.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: a.mungalov@g.nsu.ru

Исследование термокапиллярных явлений в тонком слое жидкости при локальном нагреве в настоящее время является востребованной задачей в области технологических процессов, так как тонкие пленки обеспечивают высокую интенсивность тепло-массообмена и значительную поверхность контакта фаз при малых удельных расходах жидкости. Термокапиллярные явления в слоях жидкости активно изучаются на протяжении последних десятилетий, однако по-прежнему остаются малоизученными.

В работе проводилось численное моделирование деформаций свободной поверхности тонкого неизотермического слоя жидкости. Задача решалась методом конечных объемов с использованием программного обеспечения Ansys fluent. Для моделирования движения фаз использовался метод VOF (volume of fluid). Конфигурация задачи, включая расчетную сетку, представлена на рис. 1. Количество конечных элементов: 201742, число узлов: 181359. Вблизи свободной поверхности произведено сгущение, а также созданы прямоугольные слои. Толщина первого слоя составляла 0,1 мкм, всего слоев 40. Размер области: 20×3 мм², толщина слоя жидкости 1,25 мм. Исследуемая жидкость – силиконовое масло ПМС-100. В области нагрева задана зависимость температуры от времени, рассчитанная для эксперимента, проведенного в работе [1].

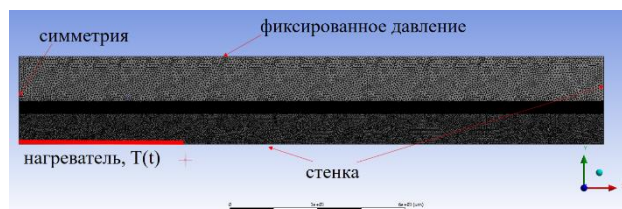


Рис. 1. Конфигурация задачи, а также расчетная сетка для моделирования деформаций свободной поверхности жидкости.

Сопряжение между полем скорости и давления реализуется с помощью алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Для решения уравнения неразрывности использовалась схема PRESTO! (PREssure STaggering Option). Для определения градиентов использовался алгоритм Least Squares Cell Based. Дискретизация конвективных членов производилась с помощью схемы Second Order Upwind. Схема дискретизации Georeconstruction использовалась для аппроксимации границы раздела. Алгоритм непрерывной поверхностной силы (CSF) был использован для моделирования поверхностного натяжения. В модель включались линейная зависимость плотности жидкости и поверхностного натяжения от температуры. На рис. 2 представлены расчетные профили деформаций, вы-

званные термокапиллярным эффектом, а также термическим расширением, полученные методом VOF.

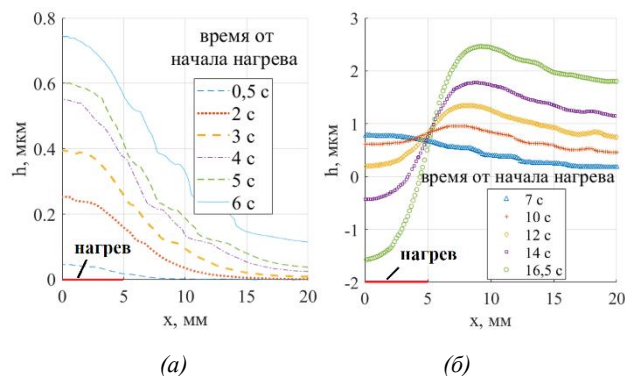


Рис. 2. Расчетные профили деформаций, вызванные термическим расширением (а), а также термокапиллярным эффектом (б).

Было зарегистрировано, что после начала нагрева над нагревателем образуется выпуклая деформация, за которой следует образование углубления в верхней части выступа. Образование бугорка детально исследовано для относительно толстых слоев жидкости и вызвано эффектом плавучести (конвективные потоки, возникающие из-за зависимости плотности от температуры). Используя численное моделирование, в работе было показано, что в тонких слоях жидкости выпуклая деформация возникает за счет термического расширения. Кроме того, результаты моделирования качественно согласуются с данными эксперимента, полученными в работе [1]. Исследование сходимости численного решения представлено на рис. 3 для расчетной сетки, состоящей из 629746 и 201742 элементов. Данные полученные на более мелкой сетке отличаются незначительно.

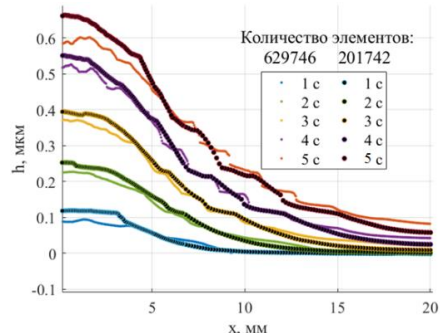


Рис. 3. Исследование сходимости численного решения.

Список литературы

- Kochkin D.Y., Mungalov A.S., Zaitsev D.V., Kabov O.A., Use of the reflective background oriented schlieren technique to measure free surface deformations in a thin liquid layer non-uniformly heated from below// Exp. Therm. Fluid Sci. 2022. V 133, 110576.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00695)

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Петрова А.В.^{1,2}, Богословцева А.Л.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}, Сафонов А.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: safonov@itp.nsc.ru

Придание поверхностям функциональных свойств находит применение в большинстве современных приложений. Свойства материала в основном зависят от двух параметров: химического состава приповерхностных слоёв и геометрии поверхности. Поиск новых методов, позволяющих эффективно управлять этими параметрами, является актуальнейшей задачей. Одним из простых и эффективных методов управления этими параметрами является обработка поверхности материала плазмой тлеющего разряда в среде различных газов. В результате обработки поверхности плазмой в её приповерхностных слоях происходят различные процессы, такие как: нагрев, распыление материала, химические реакции (в том числе и окисление) и др. Такой подход позволяет не только структурировать поверхность, но и изменять её химический состав.

В представленной работе исследована возможность использования плазмы тлеющего разряда для предварительной обработки кремния с целью получения развитой структурированной поверхности. Изучалось влияние различных параметров (давления газа в процессе обработки, плотности тока, времени обработки, концентрации кислорода) на строение и свойства поверхностей. Для этого был создан экспериментальный участок. Схема экспериментального участка представлена на рис. 1. В вакуумной камере образец из кремния размещался на катоде. Далее воздух из камеры откачивался, через регуляторы расхода подавался рабочий газ (аргон, кислород, воздух, смесь аргона с кислородом), устанавливалось заданное давление и происходила обработка поверхности образца плазмой.

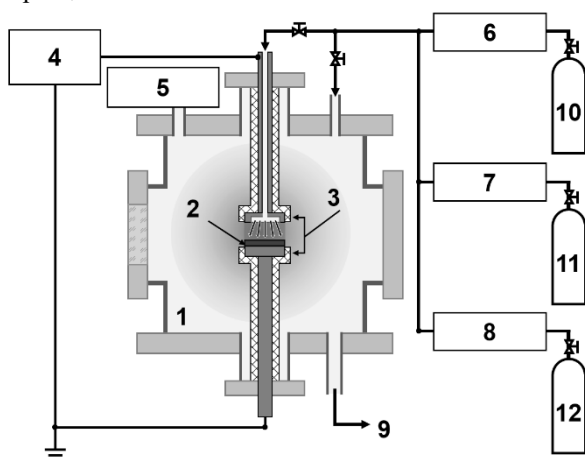


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – электроды,
4 – источник постоянного тока, 5 – вакуумметр,
6, 7, 8 – расходомеры, 9 – вакуумный насос, 10 – баллон с аргоном, 11 – баллон с кислородом, 12 – подача воздуха.

После обработки поверхность образца была исследована с помощью методов электронной микроскопии (СЭМ, EDX). На рис. 2 в качестве примера показана морфология поверхности до и после обработки тлеющим разрядом. Наблюдается существенное изменение морфологии кремния на микро- и наноуровне.

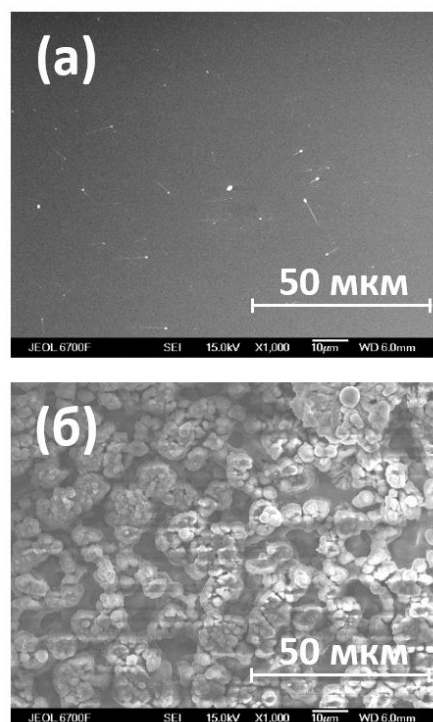


Рис. 2. Морфология поверхности кремния: (а) исходного и (б) обработанного плазмой тлеющего разряда.

Полученные результаты подтвердили возможность изменения морфологии поверхности кремния при определённых параметрах тлеющего разряда. В результате обработки в исследуемом диапазоне параметров наблюдается различная стадия процесса окисления поверхности. Это выражается в виде формирования нано- и микроструктур из кремния и его оксида. Степень воздействия процесса окисления на структуру, состав и свойства поверхности зависит от параметров тлеющего разряда.

Работа поддержана РНФ
(грант № 18-79-10119-П)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В ЩЕЛЕВОМ МИКРОКАНАЛЕ

Роншин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А.

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

e-mail: f.ronshin@gmail.com

В последние два десятилетия, фактически происходит революционное развитие теплообменных систем с мини-, микро- и наноразмерами, и эти системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов 3–100 мм [1]. Величина отводимых тепловых потоков в создающихся мини- и микротеплообменниках может достигать 1000 Вт/см² и более. Наиболее перспективным решением охлаждения представляется использование микроканалов, которые подводятся внутрь чипа, непосредственно к тепловыделяющему элементу. При этом поперечные размеры микроканала связаны с размерами чипа. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет определение режимов кипения в мини- и микроканалах, которые обеспечивают наиболее эффективные процессы тепло- и массопередачи. В микроканалах смачиваемость и шероховатость поверхности начинают оказывать существенное влияние на формирование режимов двухфазных течений. Хотя к настоящему времени исследования для весьма малых диаметров до 20 мкм, горизонтальные щелевые каналы высотой около 100 мкм остаются не изученными. Однако, в литературе отсутствуют систематические данные по исследованию процесса кипения щелевых микроканалов.

В работе проведено исследование кипения в щелевых микроканалах с характерным размером (высотой) от 50 до 100 мкм. Ширина микроканала выбрана из соображений размера вычислительного чипа – 10 мм. Оптически прозрачный нагревательный элемент (тонкопленочный ИТО нагреватель) размером 100 мм² напылен на сапфировое окно, прозрачное в инфракрасном диапазоне, для визуализации поля температур на нагревателе ИК методом. В качестве жидкости использована диэлектрическая жидкость FC-72 с температурой кипения 56°C, что позволяет поддерживать оптимальную для вычислительных микропроцессоров температуру на нагревателе. Для визуализации использовалась модификация шпирен-метода [2]. Использование данной методики позволит достаточно точно фиксировать структуру двухфазного потока в каналах и четко определить границы между режимами. Для визуализации быстропротекающих процессов использована скоростная камера Phantom 7.0. Для измерения поля температур на поверхности нагревателя экспериментальный стенд оснащен высокоскоростной термографической камерой Titanium HD 570M “FLIR Systems ATS”. Проведена серия экспериментов по исследованию кипения и гидродинамики двухфазных течений в широких (шириной 10 мм) микроканалах высотой 50–100 мкм. Исследованы режимы кипения в широком диапазоне расходов жидкости (0.5–10 мл/мин) и широком диапазоне тепловых потоков (0–50 Вт). Конвективный

режим теплообмена использовался для валидации экспериментальных данных и численного моделирования. При увеличении теплового потока начинали формироваться пузыри, начинался процесс кипения.

На рисунке представлена зависимость теплового потока на нагревателе от температурного напора при различных расходах жидкости. При небольших тепловых потоках пузыри формировались возле стенок микроканала. С увеличением теплового потока пузыри начинают формироваться и на центре нагревателя. Когда размер пузырей становится достаточно большим, происходит коалесценция, режим кипения становится вспененным. При дальнейшем увеличении теплового потока, газосодержание увеличивается, происходит переход к кольцевому режиму. Область с небольшим наклоном при небольших температурных напорах и небольших тепловых потоках соответствует конвективному режиму нагрева. С увеличением температурного напора и теплового потока, начинается процесс кипения, интенсивность теплообмена возрастает. При максимальном температурном напоре и максимальном тепловом потоке наблюдалось испарение тонкой пленки жидкости в кольцевом режиме течения, интенсивность теплообмена также возрастала. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки, наблюдалось практически полное испарение рабочей жидкости, режимы были близки к предкризисным, в этом случае эксперименты останавливались для того, чтобы избежать сгорания нагревателя.

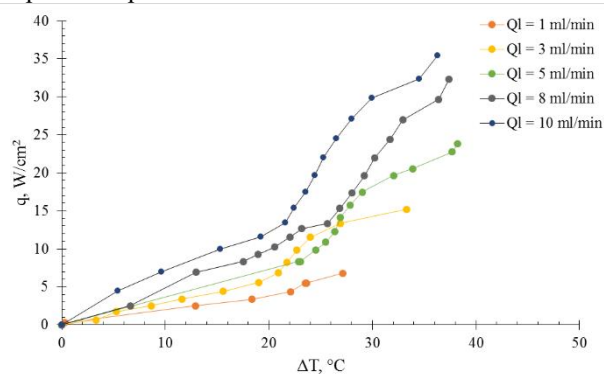


Рис. 1. Зависимость теплового потока от температурного напора в зоне нагревателя в зависимости от расхода.

Список литературы

1. Jaeseon L., Mudawar I. Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics // Components Packaging Technol. IEEE Trans. 2009. V. 32. № 2. P. 453.
2. Ronshin F., Chinnov E. Experimental characterization of two-phase flow patterns in a slit microchannel. // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 103. P. 262–273.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 21-79-10357,
<https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ОНЛАЙН-МОНИТОРИНГА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В МИКРОКАНАЛАХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Серёдкин А.В.^{1,2}, Ягодницына А.А.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: yagodnitsinaaa@gmail.com

В последние десятилетия микрогидродинамика стала одной из важнейших областей науки в связи с бурным развитием микроканальных устройств и технологий. Экстремальное высокое отношение площади поверхности к объему позволяет использовать микроканальные течения для снятия высоких тепловых потоков, проведения высокоэффективных реакций, а также создания лабораторий на чипе и органов на чипе. Газожидкостные течения и течения несмешивающихся жидкостей используются в различных приложениях в химии, биологии, медицине, материаловедении для проведения химических реакций [1] и процессов экстракции [2], инкапсулирования и сортировки биологических объектов [3], создания нано- и микрочастиц [4]. На текущий момент происходит активное внедрение микроканальных технологий в промышленности, например, в системах охлаждения процессоров, в топливных ячейках, в технологиях 3D печати, проточных биореакторах и аналитических системах. Большинство предлагаемых подходов, связанных с применением двухфазных микроканальных потоков, основываются на использовании характерных для них режимов течения – сегментированного (капельного и снарядного), либо непрерывного (параллельного, кольцевого, ривулетного и т.д.).

Для разработки и корректной работы микрофлюидных устройств с применением двухфазных течений требуется информация о режиме течения, а также о свойствах снарядного режима течения, таких как скорость и размер снарядов. Существующие на настоящий момент подходы к определению свойств снарядного режима, основанные на обработке изображений с помощью пространственных фильтров для поиска границ снарядов, требуют ручной подстройки ряда параметров и не могут применяться в автоматических системах онлайн мониторинга свойств двухфазного режима. В настоящей работе реализованы методы определения режима течения и свойств снарядного режима течения по изображениям потока на основе нейронных сетей.

Для решения задачи определения свойств снарядного режима по изображениям потока была подготовлена уникальная база данных, состоящая из наборов изображений, полученных в различных экспериментах посредством скоростной визуализации снарядного режима течения несмешивающихся жидкостей в прямых и криволинейных микроканалах (см. рис. 1). Шум на изображениях, а также различия в показателях преломления, смачиваемости материала стенок канала и форме снарядов позволили составить исчерпывающую базу данных для дальнейшего обучения нейронной сети. На основе подготовленной базы данных была обучена и протестирована нейронная

сеть U-Net. Проведено тестирование нейронной сети и сравнение со стандартными методами обработки изображений на отдельных данных, которые не входили в исходную базу данных для обучения и валидации. Среднее отклонение площади и скорости снарядов, полученных с помощью нейросетевого подхода и стандартного подхода с ручной настройкой параметров обработки, составило 1,67% и 0,91%.

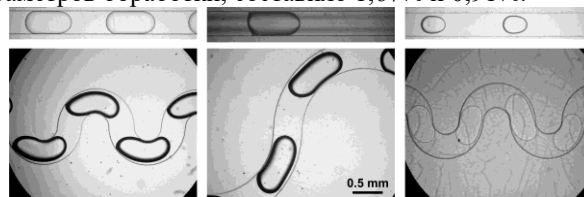


Рис. 1. Примеры изображений из базы данных для обучения нейронной сети для определения свойств снарядного режима течения в микроканалах [5].

Для решения задачи классификации режима течения по изображениям потока была подготовлена база данных картин течения, состоящая из более 4 тысяч изображений для двух классов: сегментированный режим течения (капельный/снарядный) и непрерывный режим течения (параллельный/кольцевой). Обучена и протестирована нейронная сеть ResNet50 для решения задачи классификации режима течения по изображениям. На тестовых изображениях, не входящих в исходную базу данных для обучения, сеть показала точность 100%.

Разработанные решения будут использованы в системах онлайн-мониторинга и управления двухфазными потоками в микроканалах, когда в течение времени наблюдения изменяются такие условия, как смачиваемость стенок канала, освещение и толщина межфазной границы. Кроме того, разработанная методика может быть использована для исключения трудоемких классических методов при обработке экспериментальных данных.

Список литературы

1. Wang K. et al. Liquid-liquid microflow reaction engineering // *React. Chem. Eng. Royal Society of Chemistry*, 2017. Vol. 2, № 5. P. 611–627.
2. Kriel F.H. et al. Microfluidic solvent extraction, stripping, and phase disengagement for high-value platinum chloride solutions // *Chem. Eng. Sci. Elsevier*, 2015. Vol. 138. P. 827–833.
3. Samiei E., Tabrizian M., Hoorfar M. A review of digital microfluidics as portable platforms for lab-on a-chip applications // *Lab Chip. Royal Society of Chemistry*, 2016. Vol. 16, № 13. P. 2376–2396.
4. Liu Y. et al. A review on emulsification via microfluidic processes // *Front. Chem. Sci. Eng.* 2020. Vol. 14, № 3. P. 350–364.
5. Seredkin A. V., Yagodnitsyna A.A. Neural network approach for plug flow analysis in microchannels // *Interfacial Phenom. Heat Transf.* 2022. Vol. 10, № 1. P. 15–24.

Работа поддержана РФФ (грант № 21-79-10307)

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Старинский С.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

e-mail: starikhbz@mail.ru

Дизайн поверхностей с экстремальными смачивающими свойствами (супергидрофобными и суперлиофильными) является быстроразвивающейся тематикой в области материаловедения. Такие материалы очень перспективны для широкого спектра применений, включая самоочищающиеся, анти-запотевающие и коррозионностойкие поверхности, разделительные фильтры, биосенсоры, биочипы и т.д. [1–4].

На данный момент пока не разработан единый «рецепт» создания поверхности с требуемыми характеристиками. В первую очередь это связано со сложностью моделирования взаимодействия жидкости с текстурированной поверхностью. Качественное описание может быть получено с использованием хорошо известных теоретических моделей – Вензеля и Касси-Бакстера [5]. Первая предполагает гомогенный контакт жидкой фазы с поверхностью, второй – наличие газовой фазы (так называемого пластрона) в текстуре материала. Хотя модели применяются для объяснения эффекта влияния текстуры поверхности на смачиваемость, некоторые аспекты остаются под вопросом [6]. К таковым можно отнести сложность расчета шероховатости поверхности, что особенно критично при контакте жидкости с иерархическими структурами. Применение численного моделирования позволяет глубже понять особенности взаимодействия жидкости с текстурированной поверхностью [7]. Однако, результаты расчетов требуют тщательной верификации, причем зачастую необходимо воссоздать достаточно сложную морфологию.

Вероятно, одним из самых перспективных методов контролируемого управления как структурой, так и составом поверхности является импульсная лазерная абляция. Основным недостатком метода традиционно считается низкая производительность. Однако, развитие микроразнообразной базы, методов создания активной среды, волоконных технологий и т.д. существенно снизило стоимость оборудования и повысило его производительность. Так, недавно было показано, что лазерный синтез коллоидных систем уже может конкурировать с классическими жидкостными подходами [8].

Изменения поверхностных свойств может реализоваться как в подходе «сверху вниз», так и «снизу вверх». В первом случае на материалы воздействует достаточно интенсивное лазерное излучение, что приводит к разогреву, плавлению и абляции. Сценарий процесса существенным образом зависит от условий воздействия и типа облучаемого материала. Так, при наносекундном лазерном воздействии на кремний структура поверхности критическим образом зависит от длины волны излучения из-за разницы в глубине поглощения [9]. Результирующее отличие

в поле температур определяет дальнейший тепломассообмен в материале. Не менее важным фактором является длительность импульса, поскольку ультракороткие пучки позволяют использовать «нетепловые» эффекты. Так, в отличие от нс пучков, применяемых для создания супергидрофильного кремния, фс пучки позволяют сформировать супергидрофобную структуру [10]. Подход «снизу вверх» предполагает нанесение на интересующий объект структуры с помощью лазерного излучения. Реализация может быть различной, например, лазерное осаждение при абляции, химическое осаждение, инициированное лазером или вариации лазерной печати [11].

Данная работа посвящена анализу ключевых аспектов дизайна поверхностей с экстремальными свойствами смачивания. Особое внимание уделяется применению лазерного излучения для создания подобных материалов. Освещены комбинированные подходы и возможность создания бифильных поверхностей.

Список литературы

1. V. Serdyukov, S. Starinskiy, I. Malakhov, A. Safonov, A. Surtaev, Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer, *Appl. Therm. Eng.* 194 (2021) 117102.
2. A. Lebedev, K. Dobroselsky, A. Safonov, S. Starinskiy, V. Sulyaeva, A. Lobasov, V. Dulin, C.N. Markides, Control of the turbulent wake flow behind a circular cylinder by asymmetric sectoral hydrophobic coatings, *Phys. Fluids*. 33 (2021) 121703.
3. V.A. Ganesh, H.K. Raut, A.S. Nair, S. Ramakrishna, A review on self-cleaning coatings, *J. Mater. Chem.* 21 (2011) 16304–16322.
4. J. Drelich, A. Marmur, Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings, *Surf. Innov.* 2 (2014) 211–227.
5. A.J.B. Milne, A. Amirfazli, The Cassie equation: How it is meant to be used, *Adv. Colloid Interface Sci.* 170 (2012) 48–55.
6. G. McHale, Cassie and Wenzel: Were they really so wrong?, *Langmuir*. 23 (2007) 8200–8205.
7. Q. Du, P. Zhou, Y. Pan, X. Qu, L. Liu, H. Yu, J. Hou, Influence of hydrophobicity and roughness on the wetting and flow resistance of water droplets on solid surface: A many-body dissipative particle dynamics study, *Chem. Eng. Sci.* 249 (2022) 117327.
8. S. Jendrzej, B. Gökce, M. Epple, S. Barcikowski, How Size Determines the Value of Gold: Economic Aspects of Wet Chemical and Laser-Based Metal Colloid Synthesis, *ChemPhysChem*. 18 (2017) 1012–1019.
9. S.V. Starinskiy, A.A. Rodionov, Y.G. Shukhov, A.I. Safonov, E.A. Maximovskiy, V.S. Sulyaeva, A. V. Bulgakov, Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon, *Appl. Surf. Sci.* 512 (2020) 145753.
10. T. Baldacchini, J.E. Carey, M. Zhou, E. Mazur, Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser, *Langmuir*. 22 (2006) 4917–4919.
11. A. Piqué, R.C.Y. Auyeung, H. Kim, N.A. Charipar, S.A. Mathews, Laser 3D micro-manufacturing, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49 (2016) 223001.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект №18-79-10119П)*

ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛИ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ АБРАЗИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ И ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, НА ПРОЦЕССЫ ЗАЖИГАНИЯ, ГОРЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЫГОРАНИЯ КАПЕЛЬ ТОПЛИВ**Феоктистов Д.В., Глушков Д.О., Вершинина К.Ю.**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: fdv@tpu.ru

В работе показаны принципиально новые возможности применения лазерной обработки поверхностей металлов для нужд теплоэнергетики в области процессов зажигания, микровзрывного горения, выгорания перспективных видов топлива. Научная проблема состоит в том, что процессы зажигания, горения, выгорания капель и фрагментов топлив в условиях взаимодействия с шероховатыми поверхностями нагрева топочной камеры не изучены на уровне, позволяющем разработать практические рекомендации к обработке поверхностей топочной камеры, в частности к формированию текстуры (шероховатости), которая может быть охарактеризована параметрами шероховатости. Цель работы – определение влияния шероховатости поверхности жаростойкой и жаропрочной стали, модифицированной абразивными материалами и лазерным излучением на закономерности и характеристики процессов зажигания, горения и диспергирования капель композиционного топлива (оразоводугольного топлива), а также изучение стойкости к осаждению продуктов выгорания в условиях кондуктивного, смешанного механизма подвода теплоты.

В качестве топлива использовалась органоводугольная суспензия. Топливный состав выбран и приготовлен согласно рекомендациям, разработанным по результатам исследований антропогенных газообразных выбросов (CO_2 , NO_x , SO_x). В качестве материала выбрана сталь марки 20Х23Н18 широко применяется для изготовления конструкций промышленных энергогенерирующих установок. С использованием шлифовально-полировального станка сформированы текстуры абразивными материалами со средним размером зерна до 269 мкм. Одна группа поверхностей стали модифицирована лазерной обработкой наносекундной длительности с энергией в импульсе 1 мДж в условиях многократного прохождения луча по поверхности. Полученные текстуры исследовались методами сканирующей электронной микроскопии и профилометрии. Оценка шероховатости выполнена по трехмерным параметрам шероховатости.

Процессы зажигания, горения, выгорания ОБУТ на модифицированных поверхностях стали исследовались в условиях кондуктивного и смешанного нагрева. В условиях кондуктивного нагрева поверхность стали помещалась между витками спирали индуктора и нагревалась до 900°C. Капля топлива массой 7 мг (радиус около 1.2 мм) размещалась на конце держателя и помещалась на поверхность. В условиях смешанного нагрева (кондуктивного, лучистого и конвективного) высокотемпературная воздушная среда (900°C) генерировалась в полости трубчатой

муфельной печи. На поверхность стали с температурой 23–25°C капля объемом 47.2 мкл (массой 50 мг, диаметр 0.44 мм) дозировалась электронным дозатором. С помощью координатного механизма образец поверхности стали вводился в полость печи.

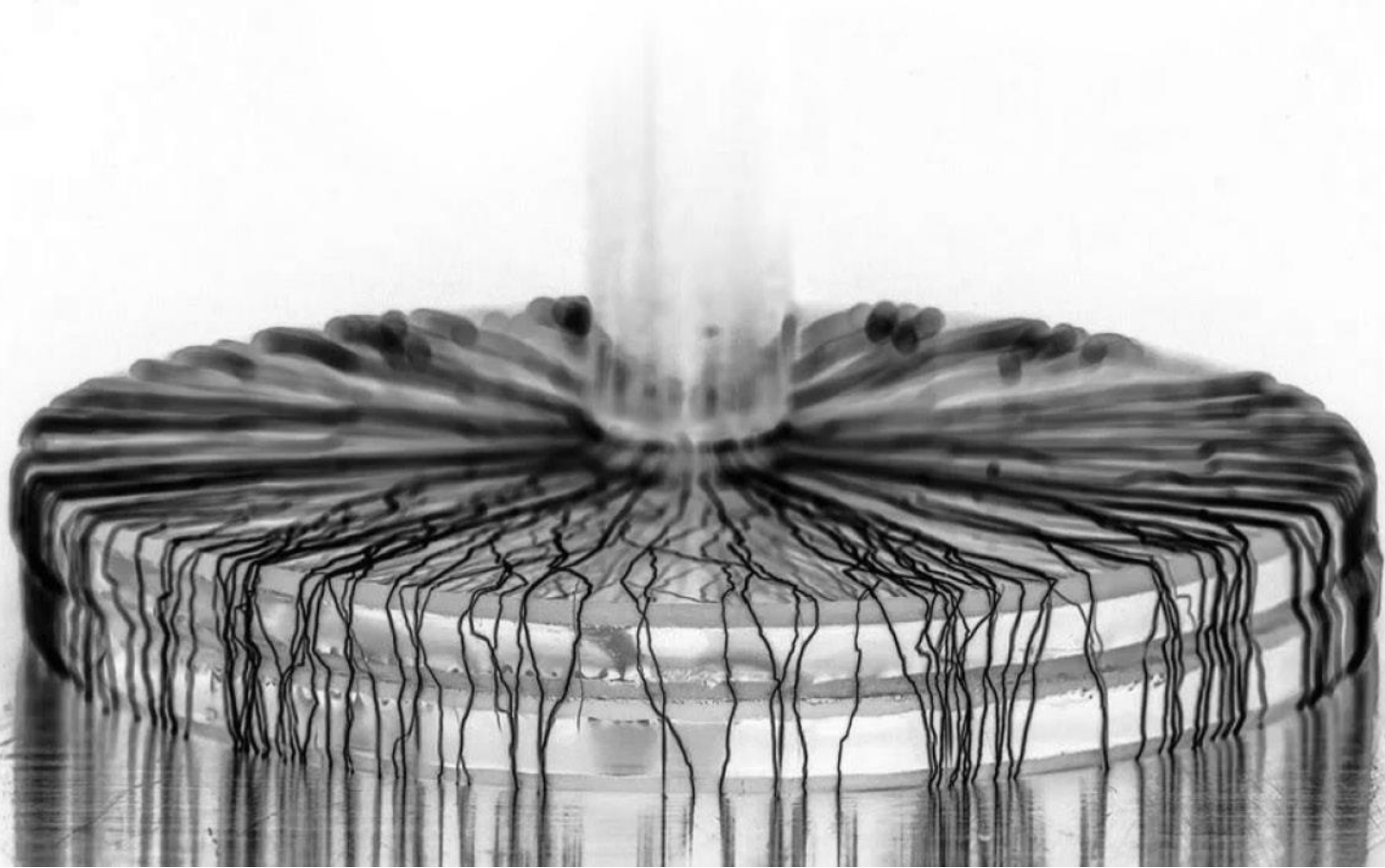
Анализ видеозаписей исследуемых процессов проводился с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control, Tema Automotive. Регистрировались: площадь осаждения продуктов горения после очистки воздухом давлением 10 бар, время задержки зажигания, скорость движения газовой среды при горении после диспергирования капли вблизи поверхности; средний и максимальный характерные размеры области выгорания, скорость мелкодисперсных фрагментов при горении топлива в условиях диспергирования, время выгорания топлива. В условиях смешанного нагрева дополнительно регистрировались диаметр растекания капли топлива по поверхности стали, количество диспергирований капли топлива за время выгорания, размер мелкодисперсных фрагментов при горении топлива в условиях диспергирования.

Установлено, что увеличение шероховатости поверхностей стали, модифицированных абразивными материалами, приводит к интенсификации осаждения твердого остатка (зола) горения капель органоводугольного топлива в условиях кондуктивного нагрева. Установлено, что на поверхности стали, обработанной абразивными материалами со средним размером зерна 269 мкм, в 5 раз больше площадь осаждения твердых продуктов горения (зола) по сравнению с поверхностью стали, обработанной абразивными материалами со средним размером зерна 15 мкм. Лазерная модификация поверхностей стали позволяет улучшить стойкость поверхностей стали к осаждению твердого остатка от горения капель суспензионного топлива в условиях кондуктивного и смешанного нагрева. Также установлено, что модификация поверхностей лазерным излучением приводит к увеличению характерного размера области выгорания продуктов диспергирования капли ОБУТ, к росту числа центров нуклеации (образования парогазовых пузырей) с последующим их разрушением и паффингом, позволяет контролировать время зажигания и время выгорания в широком диапазоне значений, увеличивает более чем в 2.5 раза скорость движения продуктов диспергирования вдоль поверхности нагрева.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-23-00040)*



СЕКЦИЯ 10
Электрофизические явления
в газовых и жидких средах



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУИ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЭЛЕКТРОДОВ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Андрющенко В.А., Смовж Д.В.

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

e-mail: vladimir.andryushchenko@gmail.com

Электродуговой разряд является одним из самых простых и эффективных способов получения углеродных наноматериалов [1]. Данная технология доказала свою эффективность при производстве, как углеродных наноструктур (фуллерены, графен, нанотрубки), так и их композитов с наночастицами различных химических элементов. Экспериментальные исследования в данном направлении сосредоточены, главным образом, на поиске оптимальных параметров синтеза, что требует существенных временных и материальных затрат.

Для развития понимания механизмов процессов, происходящих при дуговом распылении и способов управления этими процессами, экспериментальные исследования должны дополняться соответствующими теоретическими и численными расчетами. Существует ряд работ, посвященных моделированию дуговых разрядов, используемых для синтеза углеродных материалов [2]. Так были построены модели с катодным распылением [3], модели плазмы разрядного промежутка [4] и др. Однако, как было указано в обзорной статье [2], до сих пор не существует детальной модели, позволяющей установить соотношения между параметрами разряда и синтеза углеродных наноматериалов.

В данной работе было проведено экспериментальное и теоретическое исследование режимов электродугового распыления и структуры формирующегося углеродного депозита при различных давлениях, токах разряда в атмосферах: азота, аргона и гелия. Температурные профили были получены с использованием термопары (диапазон температур до 1400 К), температура в центре дуги определялась на основе анализа спектра излучения дуги по максимуму интенсивности излучения. Для реализации численного расчета была модифицирована модель дугового распыления электродов, предложенная в работе [5], а также модель дугового разряда, учитывающая связь между плазмой разрядного промежутка, катодного и анодного слоев, перенос тока, тепловой режим электродов и испарение анода. Таким образом, обобщающая модель состоит из пяти основных частей, описывающих: процессы, происходящие в дуге, сублимацию анода, распространение струи, перенос частиц струй и их ионизацию. Так сублимация компонент анода рассчитывается на основе модели Ленгмюра. Распространение струи и соответствующие ей поля плотности и температуры определяются из системы уравнений: неразрывности, уравнения Навье-Стокса с учетом гравитационного и электромагнитного полей и уравнения для переноса тепла в энтальпийной форме, учитывающего Джоулево тепло и тепловой поток электронов. Перенос частиц определяется согласно стандартным диффузионным уравнениям, а

степень их ионизации по системе уравнений Саха для плазмы.

Реализованная модель позволила получить температурные профили, согласующиеся с экспериментальными данными, а также вычислить времена нахождения частиц в различных температурных диапазонах. Примеры, полученных температурных профилей, для различных давлений представлены на рис. 1.

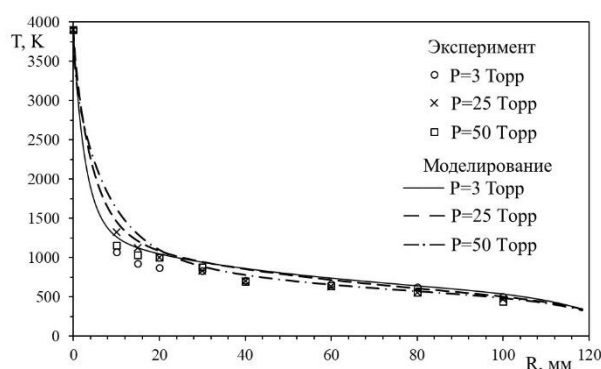


Рис. 1. Радиальное распределение температуры в углеродной дуге при различных давлениях гелия, ток и напряжение разряда равны 100 А и 20 В, соответственно.

С помощью методов РФА, ТГА, HRTEM и STEM было проведено исследование структуры и морфологии осаждающейся на стенках камеры сажи, обнаружено, что при варьировании параметров изменяется структура и степень графитизации сажи. Проведен анализ механизмов конденсации в графитовой дуге, и показано, что изменение условий синтеза приводит к изменению механизма формирования сажи, что связано с различной концентрацией фуллереновых зародышей, формирующихся на начальной стадии конденсации.

Список литературы

1. Keidar M. Factors affecting synthesis of single wall carbon nanotubes in arc discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. V. 40, No. 8. P. 2388–2393.
2. Farhat S., Scott C.D. Review of the arc process modeling for fullerene and nanotube production // *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2006. V. 6, No. 5. P. 1189–1210.
3. Lefort A., et al. Erosion of graphite electrodes // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1993. V. 26. No. 8. P. 1239–1243.
4. Bilodeau J., Pousse J., Gleizes A. A mathematical model of the carbon arc reactor for fullerene synthesis // *Plasma chemistry and plasma processing*. 1998. V. 18, No. 2. P. 285–303.
5. Kundrapu M., Keidar M. Numerical simulation of carbon arc discharge for nanoparticle synthesis // *Physics of Plasmas*. 2012. V. 19, No. 7. P. 073510.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 18-19-00213)*

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ЧАСТИЦ В ВЯЗКИХ И ВЯЗКОУПРУГИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Ганченко Г.С.¹, Попов В.А.², Пономарев Р.Р.², Шелистов В.С.¹

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ, Краснодар

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

e-mail: ganchenko.ru@gmail.com

Начало исследований электрофореза началось ещё в прошлом веке с работ Гельмгольца [1]. Тогда была получена простая зависимость скорости движения заряженных частиц микронного и субмикронного масштаба в электролитах под действием внешнего электрического поля. И только заметно позднее, благодаря новым методам микроскопии и численным методам моделирования удалось более детально изучить феномен электрофореза как экспериментально [2,3], так и теоретически [4].

С активным развитием микрофлюидики, в том числе разработки лабораторий-на-чипах, возрос практический интерес к разработкам в области электрофореза. После открытия электрокинетической неустойчивости и электроконвекции в начале этого века [5] использование ионоселективных мембран также стало важной частью проектирования микрофлюидных устройств. Как известно, около ионоселективных поверхностей под действием электрического тока возникает расширенная зона пространственного заряда, которая содержит в себе значительное количество заряда, по сравнению с слоем Дебая. Благодаря этому объёмному заряду возможно на порядок увеличить скорости электроосмоса по сравнению с обычными диэлектрическими поверхностями, что позволяет использовать их для создания новых типов микромиксеров и микронасосов, а также позволяет разрабатывать устройства прекоцентрации. Вместе с тем поведение электролита около таких поверхностей становится гораздо сложнее.

Результаты численного моделирования электрофореза ионоселективной микрогранулы под действием внешнего электрического поля показали, что при малых напряженностях электрического поля поведение такой частицы схоже с поведением диэлектрической, а скорость электрофореза прямо пропорционально напряженности поля [6], однако с увеличением напряженности внешнего поля начинают проявляться неравновесные электрокинетические эффекты, характерные для электроконвекции около ионоселективной мембраны и скорость электрофореза начинает расти быстрее линейного закона. Численное моделирование, дополненное асимптотическим аналитическим анализом показало [7, 8], что около ионоселективной поверхности возникает целая структура слоев: дебаевский слой, расширенная зона пространственного заряда, диффузионный слой, область концентрирования, которая характерна для плоских электромембранных систем. В сферической геометрии, однако, распределение этих слоев вокруг микрогранулы оказывается более сложным. Для критических значений напряженности внешнего поля стационарное обтекание теряет устойчивость и возникает

электрокинетическая неустойчивость и электроконвекция. Интересно, что для некоторых докритических значений напряженности поля, при одних и тех же значениях параметров существует два стационарных решения, и какое из них будет реализовано зависит от начальных условий. Каждое из этих решений по-своему теряет устойчивость, что порождает сложное поведение для значительно закритических значений напряженности, где наблюдается стохастический режим.

В докладе будут представлены новые результаты численного моделирования микроустройства, основанного на использовании описанных выше эффектов электрофореза, которое может одновременно работать как микронасос, микромиксер и микроконцентратор. Результаты моделирования качественно подтверждаются проведенными экспериментами. Также благодаря обобщению математической модели на случай вязкоупругих электролитов удалось оценить влияние упругих свойств таких жидкостей, поведение которых основано на моделях Oldroyd-B и FENE [9], на возникновение и развитие электроконвекции при больших значениях напряженностей электрического поля, чем были исследовано ранее [10].

Список литературы

1. Helmholtz H. Studien über electrische Grenzschichten // *Annalen der Physik und Chemie*. 1879. № 7 (243). С. 337–382.
2. Dukhin S. S. Electrokinetic phenomena of the second kind and their applications // *Advances in Colloid and Interface Science*. 1991. (35). С. 173–196.
3. Mishchuk N. A., Takhistov P. V. Electroosmosis of the second kind // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1995. № 2–3 (95). С. 119–131.
4. Yariv E. Migration of ion-exchange particles driven by a uniform electric field // *Journal of Fluid Mechanics*. 2010. (655). С. 105–121.
5. Rubinstein I., Zaltzman B. Electro-osmotically induced convection at a permselective membrane // *Physical Review E*. 2000. № 2 (62). С. 2238–2251.
6. Frants E. A. [и др.]. Nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule for weak and moderate external electric fields // *Physics of Fluids*. 2018. № 2 (30). С. 022001–16.
7. Ganchenko G. S. [и др.]. Extreme nonequilibrium electrophoresis of an ion-selective microgranule // *Physical Review Fluids*. 2019. № 4 (4). С. 043703.
8. Ganchenko G. S. [и др.]. Instabilities, bifurcations, and transition to chaos in electrophoresis of charge-selective microparticle // *Physics of Fluids*. 2020. № 5 (32). С. 054103.
9. Chilcott M. D., Rallison J. M. Creeping flow of dilute polymer solutions past cylinders and spheres // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1988. (29). С. 381–432.
10. Li G., Koch D. L. Electrophoresis in dilute polymer solutions // *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. (884). С. A9.

Работа частично поддержана грантом Президента (грант № МК-259.2021.1.1).

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАЗВИТИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Гашков М.А.¹, Зубарев Н.М.^{1,2}, Кочурин Е.А.^{1,3}

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

e-mail: kochurin@ier.uran.ru

Хорошо известно, что нелинейные волновые системы могут переходить в состояние квазистационарного хаотического движения (волновая турбулентность) в результате резонансных волновых взаимодействий [1]. Слабонелинейная теория (или теория слабой турбулентности) описывает статистические свойства различных нелинейных волновых систем. В конце 1960-х годов Захаровым В.Е. и соавторами были найдены точные решения кинетических уравнений для капиллярных и гравитационных волн на поверхности жидкости. Эти решения, известные теперь как спектры Колмогорова-Захарова (КЗ), описывают стационарную перекачку энергии в малые или большие масштабы (прямой и обратный каскад энергии, соответственно).

В настоящее время наименее изученным типом волновой поверхностной турбулентности является электро- или магнитогидродинамическая (ЭГД и МГД, соответственно) турбулентность, возникающая под воздействием внешнего электрического или магнитного поля. Явление волновой МГД турбулентности на поверхности жидкости впервые открыто экспериментально в относительно недавних работах [2, 3]. До сих пор полного теоретического описания такого типа турбулентности не существовало. Расчеты волновой ЭГД турбулентности поверхности жидкости проводились только в одномерной плоско-симметричной геометрии [4, 5]. Ясно, что такая вырожденная геометрия не может полностью соответствовать условиям экспериментов [2, 3]. Целью настоящей работы является прямое численное моделирование ЭГД течения непроводящей жидкости в полной трехмерной геометрии.

В работе рассматривается потенциальное течение идеальной несжимаемой диэлектрической жидкости со свободной поверхностью, помещенной во внешнее электрическое поле, направленное тангенциально невозмущенной границе. Численная модель включает эффекты энергетической накачки (внешнего механического воздействия), вязкости, а также действие электростатических и капиллярных сил. Под воздействием внешней силы система переходит в режим квазистационарной диссипации энергии, когда действие внешней силы компенсируется вязкостью.

На рис.1 показана плотность потенциальной энергии на поверхности жидкости в некоторый момент времени на стадии квазистационарного турбулентного движения. Можно видеть, что движение жидкости имеет сложный и хаотический характер. В отсутствие поля распределение потенциальной энергии имеет изотропный характер. В целом, для нулевого поля расчеты хорошо воспроизводят выводы теории слабой турбулент-

ности Захарова. При включении внешнего поля характер движения жидкости меняется: распределение потенциальной энергии сильно анизотропно. Такая анизотропия связана со стабилизирующим влиянием электрического поля на динамику поверхности жидкости в направлении совпадающим с направлением самого поля. Таким образом, возмущения поверхности жидкости, распространяющиеся перпендикулярно полю играют доминирующую роль в развитии поверхностной ЭГД турбулентности, так как они не могут быть стабилизированы внешним электрическим полем.

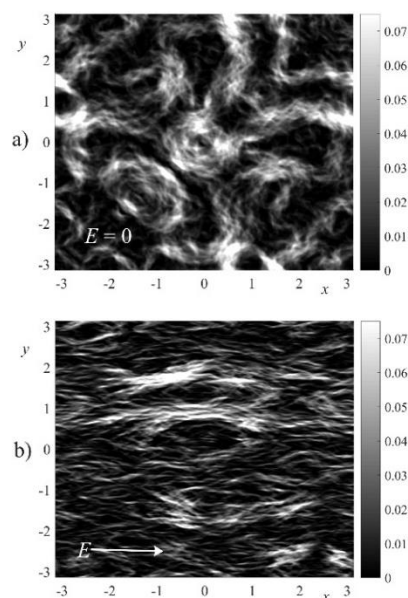


Рис.1. Распределение плотности потенциальной энергии на поверхности жидкости в отсутствие поля (а) и в сильном электрическом поле (б).

Список литературы

1. Zakharov V.E., Falkovitch G., and L'vov V.S. Kolmogorov Spectra of Turbulence I: Wave Turbulence // Berlin Springer-Verlag, 1992, 266.
2. Boyer F., Falcon E. Wave turbulence on the surface of a ferrofluid in a magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008 V. 101, P. 244502.
3. Dorbolo S., Falcon E. Wave turbulence on the surface of a ferrofluid in a horizontal magnetic field // Phys. Rev. E 2011, V. 83, P. 046303.
4. Kochurin E.A. Wave turbulence of a liquid surface in an external tangential electric field // JETP Lett. 2019, V. 109, P. 303.
5. Kochurin E.A. Numerical simulation of the wave turbulence on the surface of a ferrofluid in a horizontal magnetic field // J. Magn. Mater. 2020 V. 503, P. 166607.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-71-00006)

ПЕРФОРАЦИЯ ТОНКИХ ЖИДКИХ ПЛЕНОК НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Куперштох А.Л., Медведев Д.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: skn@hydro.nsc.ru

В [1] было показано, что процесс интенсификации теплоотдачи тесно связан с наличием контактных линий у капель, испаряющихся на поверхности подложки. В работе [2] показана принципиальная возможность разрыва пленок жидкости неоднородным электрическим полем. В данной работе исследуется процесс создания контактных линий при перфорации тонких пленок жидкости с учетом свойств смачиваемой поверхности. Трехмерное моделирование двухфазных течений с границами жидкость-пар проводилось методом решеточных уравнений Больцмана (LBM) на решетке D3Q19 с учетом фазовых переходов [3]. Использовалось уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Рассмотрен изотермический случай (приведенная температура $\tilde{T}=0.6$). При этом на границах раздела фаз имеется поверхностное натяжение $\sigma = 5.08$ единиц LBM.

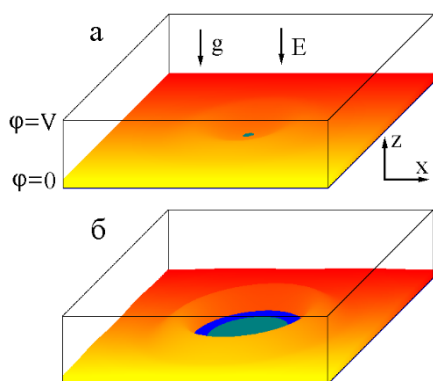


Рис. 1. Процесс перфорации пленки жидкого диэлектрика после включения электрического поля. Краевой угол 90° . Сетка $560 \times 560 \times 144$. $t = 4000$ (а), 7200 (б). $\delta = 20$, $R_{из} = 80$, $\epsilon_l = 4$, $Bo_E^* = 19$.

На рис. 1 показан процесс перфорации тонкой пленки с диэлектрической проницаемостью ϵ_l после включения напряжения между горизонтальными электродами. Неоднородность поля создавалась круглой изолирующей вставкой радиуса $R_{из}$ в центре нижнего электрода (показана зеленым цветом). На нижней и верхней границах использовались условия непротекания и несползания. По x и по y – периодические граничные условия. На электроды подавался импульс постоянного напряжения V . Распределение потенциала электрического поля ϕ при изменении формы пленки рассчитывалось на каждом шаге по времени путем решения уравнения Пуассона $\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon \nabla \phi) = 0$.

Проведена серия расчетов для $R_{из} = 40$ и краевого угла 90° . При увеличении толщины пленки δ время до разрыва t увеличивается, и электрическое число Бонда должно при этом уменьшаться (см. таблицу).

Для этого в целях оценки предложено использовать модифицированное электрическое число Бонда, зависящее от толщины пленки δ как

$$Bo_E^* = \epsilon_0(\epsilon_l - 1)E_0^2 R_{из}^2 / (\delta \epsilon_l \sigma). \quad (1)$$

δ	20	30	40	50	60
t , единиц LBM	4400	6000	7600	9400	11000
Bo_E^*	6.84	4.56	3.42	2.74	2.28

Смачиваемость подложки моделировалась заданием сил взаимодействия узлов жидкости с ближайшими пятью узлами на твердой поверхности [4]

$$F(x) = B\Phi(x) \sum_{k=1}^5 w(e_k) \Phi_{solid}(x + e_k) \cdot e_k. \quad (2)$$

Здесь функция Φ_{solid} принимает то же значение, что и значение в узле жидкости x непосредственно над данным узлом твердой поверхности. Статический угол смачивания (контактный угол) при $B = 1$ равен 90° , при $B = 1.06$ – 60° , а при $B = 0.92$ – 130° . Результаты моделирования показаны на рис 2. Времена до момента разрыва пленки при углах смачивания $60, 90, 130^\circ$ составили 4800, 3600 и 3200 единиц LBM. При уменьшении смачиваемости поверхности время до момента перфорации уменьшается.

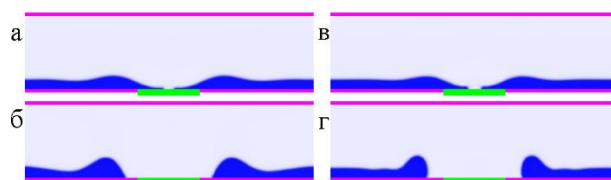


Рис. 2. Распределение плотности жидкости. (а, б) контактный угол 60° , (в, г) – 130° . $t = 4800$ (а), 8200 (б), 3200 (в), 5000 (г). $\delta = 20$, $R_{из} = 60$, $\epsilon_l = 4$, $Bo_E^* = 12,9$.

Таким образом, продемонстрирована возможность перфорации диэлектрических пленок жидкости импульсным электрическим полем. При этом образуются новые контактные линии, что способствует увеличению теплоотдачи с подложки.

Список литературы

1. Karchevsky A. L., Marchuk I. V., Kabov O. A. Calculation of the heat flux near the liquid-gas-solid contact line // Appl. Math. Modell. 2016. V. 40, No. 2. P. 1029–1037.
2. Medvedev D. A., Kupershtokh A. L. Electric control of dielectric droplets and films // Phys. Fluids. 2021. V. 33, No. 12. P. 122103.
3. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A., Karpov D. I. On equations of state in a lattice Boltzmann method // Computers and Mathematics with Applications. 2009. V. 58, No. 5. P. 965–974.
4. Kupershtokh A. L. Contact angles in the presence of an electrical field // Journal of Physics: Conf. Ser. 2020. V. 1675. P. 012106.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-29-01055, <https://rscf.ru/project/22-29-01055/>)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Мухаметова З.С., Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: MuchametovaZ@mail.ru

Лабораторные фильтрационные исследования кернов с проницаемостью менее 0.001 мкм^2 свидетельствуют о наличии нелинейной фильтрации в низкопроницаемых пластах и существенном снижении эффективной проницаемости при низких градиентах давления [1]. Авторы исследований [1–3] по результатам работы [1] предложили зависимости скорости фильтрации от градиента давления, а моделирование в гидродинамическом симуляторе «РН-КИМ» позволило исследовать влияние нелинейной фильтрации на показатели различных систем разработки [3] и рассчитать эффективные радиусы дренирования вокруг добывающих скважин [4]. Исследования по влиянию нелинейной фильтрации на распределение давления в пласте и динамику изменения притока жидкости в скважине представлены в работах [5–8].

Сверхнизкопроницаемые коллектора, нефтематеринские пласты, залежи сверхвязкой и битумной нефти характеризуются более низкими фильтрационными свойствами по сравнению с рассмотренными в [1–4, 7, 8] примерами. При моделировании притока жидкости из таких пластов также требуется учет эффектов нелинейной фильтрации. В данной работе приводятся результаты численного моделирования притока жидкости с учетом нелинейной фильтрации для подобных пластов при высокочастотном (ВЧ) электромагнитном (ЭМ) воздействии посредством системы труб скважины, являющейся коаксиальной линией передачи ЭМ-волн. Особенность ВЧ электромагнитного излучения по сравнению с другими термическими способами воздействия на пласт – это возникновение в продуктивном пласте объемных тепловых источников [9, 10].

Рассматривается нестационарная работа скважины при тепловом воздействии на околоскважинную зону, которая описывается уравнениями пьезопроводности (1) и конвективной теплопроводности (2) с выражением для плотности источников тепла в пласте:

$$\varphi_m C_{mt} \frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_x}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_y}{\mu_o} a(G) \frac{\partial P_m}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{mt} \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xt} \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yt} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) - \rho_o c_o \left(v_{mx} \frac{\partial T_m}{\partial x} + v_{my} \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + q^{(E)}, \quad (2)$$

где $a(G)$ – приближенная аппроксимация нелинейного закона фильтрации. Выражение для плотности источников тепла $q^{(E)}$ принято из работы Абернетти [11]. При осуществлении добычи в скважине поддерживается постоянное забойное давление. Добыча осуществляется в несколько этапов: на первом и третьем – с выключенным генератором ЭМ волн;

на втором этапе – с одновременным электромагнитным воздействием. Расчетная область симметрична относительно своих границ, поэтому, на всех гранях модели задаются условия симметрии по давлению и температуре.

Сравнение полученных кривых распределения давления при осуществлении добычи жидкости с различными значениями предельного градиента давления $G_0=0.01 \text{ МПа/м}$ и $G_0=0.1 \text{ МПа/м}$ показало, что эффективные радиусы дренирования вокруг добывающей скважины могут отличаться более чем в 1.5 раза. При этом значения скоростей фильтрации для притока в скважину с линейной фильтрацией по Дарси и с нелинейной фильтрацией при градиенте давления $G_0=0.1 \text{ МПа/м}$ могут отличаться в 4 раза.

Список литературы

1. Байков В.А., Колонских А.В., Макастров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керна Приобского месторождения // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. № 2. С. 4–7.
2. Боршук О. С., Житников В. П. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Численная схема, анализ устойчивости и сходимости // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. № 2. С. 13–16.
3. Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В., Якасов А.В., Торопов К.В. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Влияние на технологические показатели разработки месторождения // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. № 2. С. 17–19.
4. Байков В.А., Давлетбаев А.Я., Иващенко Д.С. Моделирование притока жидкости к скважинам в низкопроницаемых коллекторах с учетом нелинейной фильтрации // Нефтяное хозяйство. 2014. № 11. С. 54–58.
5. Xu J. et al. Non-Darcy flow numerical simulation for low-permeability reservoirs // Proc. SPE Europe/EAGE Annual Conf. Copenhagen, Denmark, 2012. Paper SPE-154890-MS.
6. Liu S., Han F., Zhang K., Tang Z. Well test interpretation model on power-law non-linear percolation pattern in low-permeability reservoirs // Proc. Int. Oil and Gas Conf. and Exhibition in China, 2010. Paper SPE-132271-MS.
7. Давлетбаев А.Я., Ишкин Д.З. Моделирование фильтрационных исследований на неустановившихся режимах при закачке воды в образцы со сверхнизкой проницаемостью // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 3. С. 531–538.
8. Шагапов В.Ш., Белова О.В., Давлетбаев А. Я. Особенности фильтрации в низкопроницаемых коллекторах с проявлением предельного градиента // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 6. С. 1269–1281.
9. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф., Сектаров Э.С., Шашков Ф.И. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на нефтяные сланцы // Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24, №1. С. 43–48.
10. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Heavy oil production by electromagnetic heating in hydraulically fractured wells // Energy Fuels. 2014. V. 28, No. 9. P. 5737–5744.
11. Abernethy E.R. Production increase of heavy oils by Electromagnetic heating // J. Can. Petrol. Technol. 1976. V. 15, No. 3. P. 91–97.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 22-11-20042)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЫДЕЛИВШИХСЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕФТЕМАТЕРИНСКИЕ ПОРОДЫ

Мухаметова З.С., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: muchametovaz@mail.ru

Потенциал нефтегазовой промышленности может быть связан с разработкой нефтематеринских пород. В [1] рассмотрены перспективные способы воздействия на подобные породы. В данной работе предлагается рассмотреть метод электромагнитного воздействия на нефтематеринские пласты для максимизации добычи содержащихся в них флюидов. Электромагнитное излучение способствует изменению температуры в нефтематеринских породах, создавая условия для превращения органического вещества в углеводороды нефти и газа.

Рассматривается образец нефтематеринской породы. Считается, что образец помещается в область воздействия высокочастотного (ВЧ) или сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля (ЭМП) напряженности E . Под действием электромагнитного поля в среде возникают распределенные источники тепла. Повышение температуры способствует переходу керогена в углеводороды и образованию кокса. Для моделирования распределения температуры в образцах нефтематеринских пород и определения концентрации образовавшихся углеводородов рассматривается следующая математическая модель.

Распределение температуры определяется из решения уравнения теплопроводности для насыщенной пористой среды:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + \frac{q}{c\rho} \quad (1)$$

$$q = \frac{2\pi v \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta}{2} |E_0|^2 \quad (2)$$

где m – пористость; $c\rho$ – объемная теплоемкость насыщенной пористой среды; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь насыщенной пористой среды, ε – диэлектрическая проницаемость насыщенной пористой среды, ε_0 – электрическая постоянная; v – частота электромагнитного поля; q – плотность распределенных источников тепла в насыщенной пористой среде; E_0 – напряженность электрического поля. Значения параметров, используемых при расчетах, соответствуют экспериментальным данным [2].

Определение концентрации образовавшихся углеводородов осуществляется по уравнениям, описывающим кинетические реакции.

$$-\frac{\partial c_k}{\partial t} = k \cdot c_k^n \quad (3)$$

где c_k – количество исходного вещества; k – константа скорости; n – порядок реакции (0, 1, 2, 3); t – время. Константа скорости связана с температурой и выражается законом Аррениуса:

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

где E – энергия активации; A_0 – предэкспоненциальный множитель; T – температура эксперимента.

При изменении температуры в эксперименте следует учесть скорость нагрева:

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} = \frac{\partial c_k}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

где $\beta = \frac{\partial T}{\partial t}$ – скорость нагрева.

Тогда для неизотермических условий

$$-\frac{\partial c_k}{\partial T} = \frac{A_0}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) c_k^n, \quad (6)$$

параметры E , A_0 , n определяются на основании экспериментальных данных [3].

При математическом моделировании задаются начальные и граничные условия

В начальный момент времени до ЭМ воздействия температура образцов пород равна комнатной, концентрация исходного вещества постоянна:

$$T(t=0) = T_0 \quad (7)$$

$$c_k(t=0) = c_{k0} \quad (8)$$

На всех границах выполняется условие отсутствия теплообмена и отсутствие диффузионного потока:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

Проведено численное решение задачи. Полученное распределение температуры в образце породы согласуется с исследованиями [3, 4]. Определенные в данной работе концентрации компонентов при электромагнитном воздействии на керогенсодержащие породы могут свидетельствовать о выделении углеводородных газов.

Список литературы

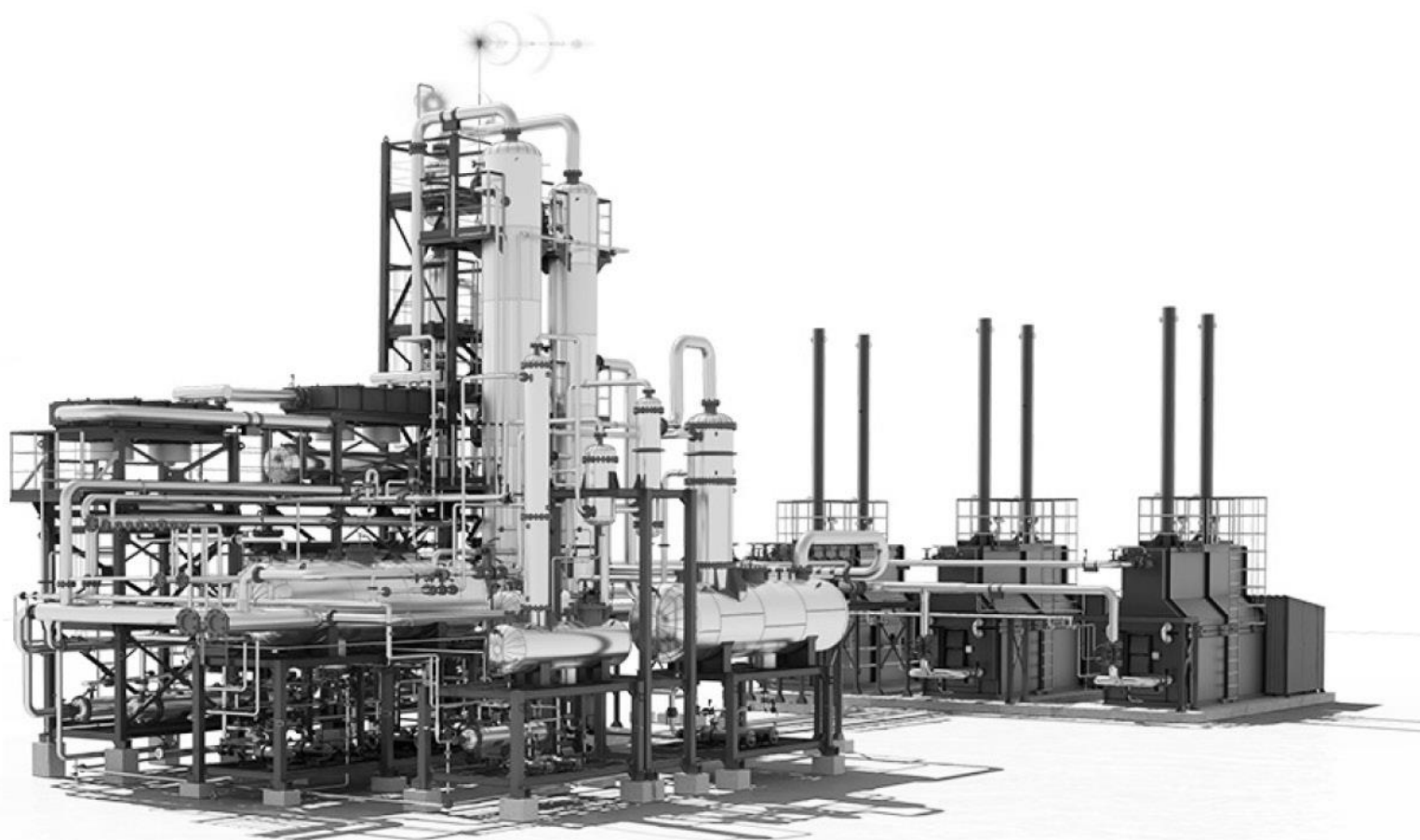
1. Кравченко М.Н., Дмитриев Н.М., Мурадов А.В., Диева Н.Н., Герасимов В.В. Инновационные методы разработки керогеносодержащих коллекторов, стимулирующие нефтегенерационный потенциал // Георесурсы. 2016. Т. 18, № 4. Ч. 2. С. 330–336.
2. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангузин Р.Ф., Сектаров Э.С., Шашков Ф.И. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на нефтяные сланцы // Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24, №1. С. 43–48.
3. Кашапов Р.С., Обласов Н.В., Гончаров И.В., Самойленко В.В., Гринько А.А., Трушков П.В., Фадеева С.В. Определение кинетических параметров пиролитической деструкции органического вещества нефтегазоматеринских пород // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. Т. 14, №1. С. 1–20.
4. Мухаметова З.С., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А. Математическое моделирование электромагнитного воздействия на нефтематеринские горные породы с учетом фазовых переходов // Вестник Башкирского университета. 2021. Т. 26, №2. С. 274–280.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 20-05-00535)*



СЕКЦИЯ 11

Теплообмен и гидродинамика
в технологических процессах
и защита окружающей среды



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА СЛОЕВОГО ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ

Астафьев А.В.^{1,2}, Ибраева К.Т.², Табакаев Р.Б.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

² Тюменский государственный университет

e-mail: a.v.astafev@utmn.ru

В последнее время одной из наиболее актуальных проблем в энергетическом секторе является вопрос снижения выбросов парниковых газов и переход на углеродную «нейтральность». Эффективным решением является вовлечение в топливно-энергетический баланс биоотходов. Это связано с тем, что такие ресурсы поглощают при жизни такое же количество CO₂, которое выделяется при эмиссии в ходе их переработки [1].

Одним из наиболее эффективных методов получения из биомассы энергии является пиролиз, весомое преимущество которого заключается в протекании экзотермических реакций при разложении органической части биоотходов. Однако, на величину суммарного тепловыделения, выделяющегося в ходе этих реакций, существенное влияние оказывают параметры процесса. В связи с этим целью работы является установление влияния скорости нагрева на величину суммарного тепловыделения пиролиза биомассы (на примере древесных опилок).

Для изучения тепловых эффектов проводили синхронный ТГ-ДСК анализ на микротермоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия) в следующих условиях: инертная среда (аргон), масса навески – 20 мг, температурный диапазон – 20-900°C, скорость нагрева – 5, 15 и 30°C/мин. Анализ полученных данных и оценку величины тепловыделения осуществляли согласно методике, подробно описанной в [2].

Из полученных результатов (рис. 1) следует отметить, что в температурном интервале от 20 до 120°C наблюдается эндотермический минимум, связанный с испарением влаги. Первое проявление экзотермических реакций происходит в зависимости от скорости нагрева при температурах 150–165°C. В этот момент начинают разлагаться термически наименее стойкие компоненты биомассы – пектин и ксилан. При температурах до 400°C экзотермический эффект связан в основном с разложением целлюлозы и гемицеллюлозы и сопровождается значительным уменьшением массы образца. При более высоких температурах тепловой эффект разложения связан с разложением лигнина (с незначительной потерей массы) и происходящим при этом формированием углеродистого остатка.

Стоит отметить, что при увеличении скорости нагрева происходит сужение экзотермических максимумов, а начало второго «пика» смещается с 360 до 395°C. Данный факт объясняется тем, что в каждый момент времени сырье получает меньшее количество тепловой энергии и для начала разложения требуется нагрев до более высокой температуры.

В таблице 1 представлены результаты вычисления величины суммарного тепловыделения, выделяющегося в ходе пиролизической переработки биомассы.

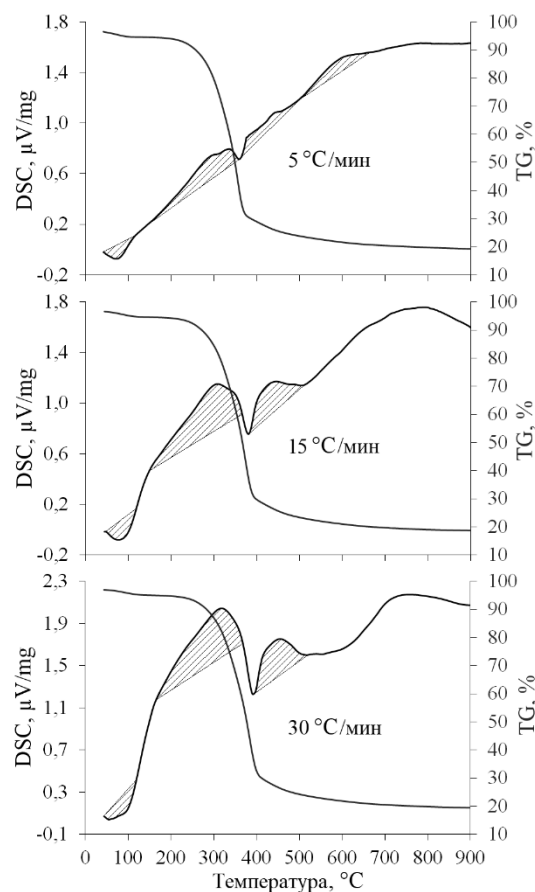


Рис. 1. ТГ-ДСК кривые пиролиза опилок.

При увеличении скорости нагрева с 5 до 30°C/мин тепловой эффект возрастает, однако несущественно (на 10%). Данный факт свидетельствует о возможности использования среднего значения скорости нагрева в рамках медленного (слоевого) пиролиза биомассы при проведении экспериментальных исследований.

Табл. 1. Величина теплового эффекта пиролиза

Скорость нагрева, °C/мин	Тепловой эффект, кДж/кг
5	1156,0
15	1233,4
30	1271,7

Список литературы:

1. Зайченко В.М. и др. Направления развития энергетики // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5, №. 3. С. 53-61.
2. Астафьев А.В. Обоснование условий реализации автотермического пиролиза органической биомассы применительно к теплотехнологическому оборудованию // Автореферат дисс. ... канд. тех. наук. – Томск, 2021. – 19 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-38-90180) и Госзаданием (грант № FEWZ-2021-0014)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБЪЁМЕ РЕГУЛЯРНОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ ОБТЕКАНИИ КРЕСТООБРАЗНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Афремов Д.А.¹, Бондар Ф.Д.¹, Сапожников И.С.¹, Сергеев К.М.¹, Тутукин А.В.¹, Волков С.М.², Курдюмов А.С.², Лобанов П.Д.², Прибатурин Н.А.², Чинак А.В.²

¹ АО «НИКИЭТ», Москва

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

e-mail: a.tutukin@nikiet.ru, lobanov@ip.nsc.ru

В начале 2019 года, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ» (г. Гатчина) прошёл первый этап энергетического пуска исследовательского ядерного реактора ПИК. Несмотря на то, что история создания этого реактора берёт своё начало в середине 1970-х годов, характеристики этого многоцелевого исследовательского реактора, предназначенного для изучения элементарных частиц, структуры материалов и биологических молекул, а также многих других задач, остаются передовыми и в наши дни. Активная зона (а.з.) этого реактора собрана из чехловых тепловыделяющих сборок, набранных из крестообразных витых тепловыделяющих элементов (твэл). Как следствие, в а.з. этого реактора формируется течение с характеристиками, требующими адекватных расчётных средств для корректных оценок локальных значений теплогидравлических параметров потока теплоносителя.

Настоящее исследование выполнено совместно коллективами из ИТ СО РАН (г. Новосибирск) и АО «НИКИЭТ» (г. Москва) с целью получения экспериментальных данных по неравномерности распределения теплогидравлических параметров потока теплоносителя для класса течений, характерных для условий а.з. реактора ПИК. Эти данные использованы для валидации расчётной программы для ЭВМ (кода) STAR-CCM+. Данный расчётный код использует методы вычислительной гидродинамики (CFD) для трёхмерного моделирования течений.

Для решения этой задачи, в ИТ СО РАН выполнены прецизионные эксперименты по исследованию неравномерности распределения скорости теплоносителя (воды) в гидравлическом тракте модели регулярной ячейки ТВС реактора ПИК, включающей в себя один твэл. Эксперименты выполнены на электрообогреваемой модели твэл, выполненной в увеличенном масштабе 5:1, размещённой в канале шестигранного сечения, моделирующем регулярную ячейку. При этом, в целях соблюдения критериев подобия, скорость теплоносителя соответствовала масштабу 1:5 по отношению к натурному изделию. Число Рейнольдса в экспериментах изменялось в диапазоне от 11000 до 44000.

Измерение скорости потока теплоносителя в рабочем участке выполнены с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Измерения выполнены вдоль нескольких контрольных линий с шагом 0,4 мм. В качестве прибора для измерения локальной скорости течения модельного теплоносителя был использован лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛАД-08), в котором реализована диффе-

ренциальная схема ЛДА с обратным рассеянием. Для усиления рассеянного излучения в поток были добавлены полиамидные частицы PSP-20. Данный прибор обладает фокусным расстоянием 500 мм. (точность прибора составляет $\pm 0,5\%$) Лучи в рабочий участок заходились перпендикулярно передней стенке, чтобы исключить преломление. Перемещение ЛДИС осуществлялось с помощью координатного позиционирующего устройства (КПУ), точность позиционирования которого – 0,1 мм.

Математическое моделирование экспериментов выполнено в АО «НИКИЭТ» при помощи CFD-кода ЭВМ STAR-CCM+. Задача решалась в RANS-приближении с использованием модели турбулентности $k-\epsilon$ realizable two-layer, толщина призматических ячеек, прилегающих к поверхности имитатора равнялась одному вязкому масштабу, размер ячеек в остальной части расчётной области равнялся примерно сорока вязким масштабам. Общая размерность модели составляет около 4.4 млн. ячеек. Величина среднего отклонения расчётных значений продольной компоненты скорости теплоносителя от результатов измерений не превышает 10%.

Тем самым, в результате выполненных расчётно-экспериментальных работ подтверждена возможность использования предложенной методики моделирования для расчёта локальных значений теплогидравлических параметров теплоносителя в а.з. (в однофазной области) при выполнении НИОКР по обеспечению эксплуатации реактора ПИК.

Список литературы

1. Tropea C. et al. (ed.). Springer handbook of experimental fluid mechanics. – Berlin: Springer, 2007. – Т. 1. – С. 237.
 2. Xiong J., Lu C., Qu W. Validation for CFD simulation in rod bundles with split-vane spacer grids based on LDA measurement //Frontiers in Energy Research. – 2020. – Т. 8. – С. 43.
- Bertocchi F., Rohde M., Kloosterman J. L. LDA measurements of coherent flow structures and cross-flow across the gap of a compound channel with two half-rods //Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Т. 326. – С. 17–30.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ, СИСТЕМОЙ ВОЗДУХООБМЕНА И ЛОКАЛЬНЫМ ОГРАЖДЕНИЕМ

Борисов Б.В., Вяткин А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

e-mail: elf@tpu.ru

Проведён численный анализ влияния локального полупрозрачного ограждения (ширмы) на процессы теплообмена в помещении, с работающей системой обеспечения теплового комфорта в локальной рабочей зоне (газовый инфракрасный излучатель и система воздухообмена). Математическое моделирование конвективного теплопереноса с учетом лучистого теплопереноса проводилось аналогично [1]. Использовалась плоская постановка для области, схематично представленной на рис. 1.

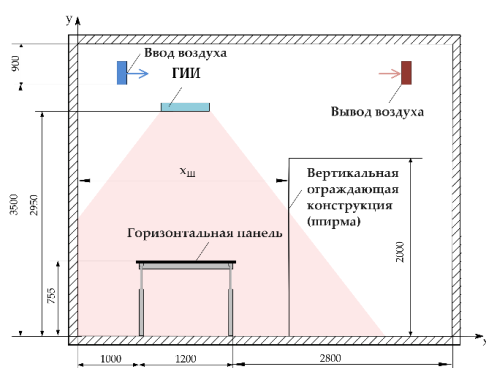


Рис. 1. Схема области решения. Размеры представлены в мм.

Начальный момент времени характеризовался термическим равновесием всей области и неподвижного воздуха. Внешние поверхности пола, потолка и стен теплоизолированы. На всех границах «воздух – ограждающая конструкция» теплообмен моделировался в сопряженной постановке с учетом тепловых радиационных потоков, проходящих в прозрачном для излучения воздухе. На твердых поверхностях, граничащих с воздухом, устанавливались условия прилипания с использованием пристеночных функций. Приток воздуха задавался массовым расходом, на выходе внешним давлением. При проведении вычислений принято: начальная температура в помещении – 7°C ; температура нагретой поверхности ГИИ – 800°C ; расход воздуха на входе $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$, температура приточного воздуха – 7°C .

Анализ результатов численного моделирования показывает, что к 60-ой минуте работы газового инфракрасного излучателя (ГИИ) и системы воздухообмена устанавливаются слабо меняющиеся во времени поля скоростей и температур (рис. 2–3). При отсутствии ширмы (рис. 2) течение воздуха характеризуется формированием обширной зоны рециркуляционного течения в области ниже уровня ГИИ. Относительно холодный воздух из системы воздухообмена, расположенной в верхней области помещения, омывая ГИИ, нагревается и поступает в нижнюю область повышая температуру в локальной рабочей зоне. На формирование направления движения обширного циркуляционного вихря (по часовой стрелке) также оказывают влияние нагретая левая и холодная

правая ограждающие конструкции. Перемещение воздушных масс способствует выравниванию температурного поля в нижней локальной зоне влияния ГИИ. Наличие непроницаемой для перемещения воздуха, но в данном случае абсолютно прозрачной для лучистого теплового потока ширмы (рис. 3), разделяет описанное выше движение воздуха на две части: левую более нагретую от горизонтальной панели, создавая в докальной рабочей зоне более комфортные температурные условия чем в помещении без ширмы, и правую менее нагретую вблизи с более холодной стеной. Направление движения по часовой стрелки у потоков не изменилось.

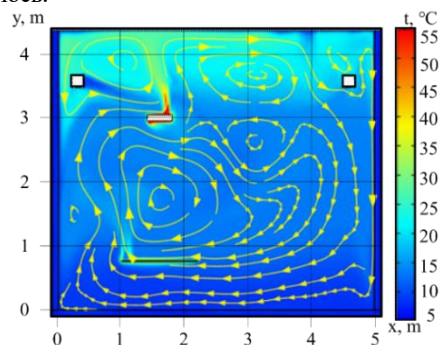


Рис. 2. Линии тока и поля температур, установившиеся к 60 минуте нагрева в свободном помещении.

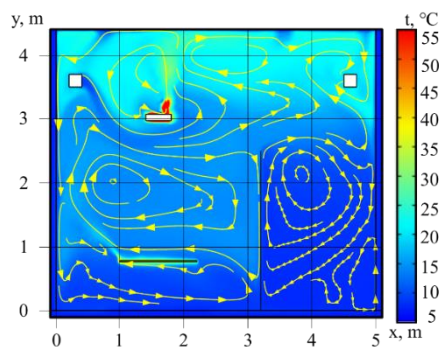


Рис. 3. Линии тока и поля температур, установившиеся к 60 минуте нагрева при дополнительной ограждающей конструкции.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, о том что размещая вертикальную ограждающую конструкцию на границе области влияния ГИИ можно изменять температурный и скоростной режим воздуха в локальной рабочей зоне.

Список литературы

1. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Numerical analysis of the equipment position influence on the premises thermal regime under gas infrared emitter operation and mixed convection conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2119, Paper 012092.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-19-00226)

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ И ЗАЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БУРОГО УГЛЯ И ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Калтаев А.Ж.

Томский политехнический университет, Томск

e-mail: avz41@tpu.ru

За последние несколько десятилетий в мире наблюдался достаточно быстрый рост мегаполисов и населения в них [1]. Вводятся в эксплуатацию новые предприятия, стремительно развивается электро-транспорт, увеличивается число небольших объектов производства и потребления энергии [2]. К последним можно отнести объекты малого и среднего бизнеса, имеющие собственные источники генерации энергии. Чтобы покрыть такой стремительно растущий спрос на энергию во многих странах мира вводятся в эксплуатацию новые энергоблоки или модернизируются действующие. Причем одним из главных критериев, предъявляемых к новым источникам энергии является снижение выбросов в атмосферу парниковых газов [3]. Такие новые экологические требования предъявляются ко всем, независимо от мощности, энергетическим объектам.

В качестве достаточно перспективного и экологически безопасного топлива во многих странах мира рассматривают древесные брикеты. Как правило их изготавливают из прессованных древесных опилок или щепы. Также, одним из способов изготовления топливных древесных брикетов является процесс пиролиза. В результате которого получается полукокс (биоуголь). Такое топливо является самостоятельным энергетическим и достаточно калорийным сырьем и позволяет утилизировать древесные отходы. Такое топливо, с экологической точки зрения, чистое и безопасное для человека и окружающей среды. Но его производство сопровождается образованием достаточно большого количества пирогенетической воды. Последняя содержит в себе различные соединения фенолов и кислот (прямая утилизация в систему канализации запрещена), но при этом обладает калорийностью (примерно 1–4 МДж/кг в зависимости от технологических условий процесса пиролиза). Одним из вариантов ее утилизации является сжигание путем подмешивания к традиционным жидким топливам, например, мазуту или водоугольному топливу (ВУТ).

Цель работы заключается в обосновании возможности использования водоугольных топлив на основе достаточно типичного низкосортного бурого угля и жидких продуктов пиролиза древесных отходов по результатам экспериментальных исследований характеристик распыления и горения таких топлив в энергетических котлах.

Таблица 1. Исследованные составы ВУТ

Бурый уголь	Вода	Пирогенетическая жидкость	Обозначение
%, по массе			
50	50	0	Образец 1
45	50	5	Образец 2
40	50	10	Образец 3
50	45	5	Образец 4
50	40	10	Образец 5

Исследованные параметры:

- динамическая вязкость – вискозиметр Brookfield RVDV-II+Pro;
- плотность – ареометры общего назначения;
- скорость капель – метод PIV (Particle Image Velocimetry);
- средний размер капель после распыления – метод IPI (Interferometric Particle Imaging);
- угол раскрытия струи – графический метод;
- зажигание – высокотемпературная муфельная печь.

Принципиальная схема измерений скоростей, размеров и угла раскрытия струи представлена на рис. 1.

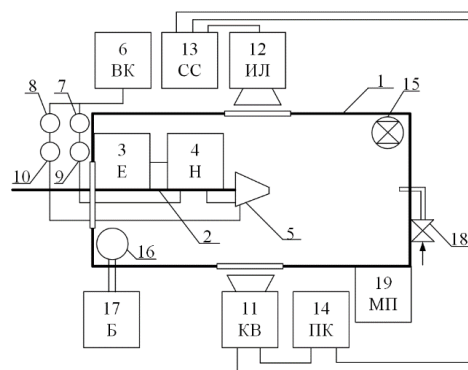


Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки

При проведении экспериментов использовалась форсунка (масштабированная) с камерой внутреннего смешения ВУТ и воздуха. Эксперименты по распылению ВУТ проведены при давлении топлива 0.3 МПа и воздуха 0.28 МПа. Давление последнего задавалось на 0.02 МПа меньше чем ВУТ чтобы исключить обратное течение жидкости по топливному трубопроводу. Это обусловлено особенностью конструкции форсунки. Выбранные значения давлений характерны для полномасштабных энергетических установок, работающих на жидком топливе.

Список литературы

1. Wang Q., Su M., Li R., et al. The effects of energy prices, urbanization and economic growth on energy consumption per capita in 186 countries // J Clean. Prod. 2019. V. 225. P. 1017–1032.
2. Khan B., Dey X., Ampofo G., et al. Energy consumption and economic growth nexus: new evidence from Pakistan using asymmetric analysis // Energy. 2019. V. 189. 116254.
3. Muhammad B. Energy consumption, CO2 emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries // Energy. 2019. V. 179. P. 232–245.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 075-00268-20-02)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ

Геворгиз Р.Г.^{1,2}, Железнова С.Н.^{1,2}, Наумов И.В.²

¹ ФИЦ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь

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

e-mail: r.gevorgiz@yandex.ru

Исследование и применение вихревых потоков жидкости и газа – одно из наиболее перспективных бурно развивающихся направлений в технике. На основе теоретических представлений о закрученных потоках разработано множество промышленных технологий, позволяющих эффективно утилизировать тепло, очищать жидкости и газы, проводить очистку химических элементов и т.п. [1, 2].

Особый интерес вихревые технологии представляют для биотехнологии, в частности, для интенсивного культивирования микроорганизмов в лабораторных и промышленных масштабах [3]. Обусловлено это тем, что использование вихревых технологий решает целый ряд проблем, с которыми неизбежно сталкиваются биотехнологи при культивировании любых видов микроорганизмов, а именно: активное, но щадящее перемешивание суспензии клеток, эффективность массообмена, пеногашение и т.п.

Для целей микробиологического синтеза был разработан ряд лабораторных и промышленных аппаратов с вихревым перемешиванием [4, 5]. Но все эти разработки направлены на получение интенсивных культур гетеротрофных микроорганизмов. Гораздо более сложная ситуация складывается в работе с фототрофными микроорганизмами. В отличие от гетеротрофов для роста и развития фотосинтезирующих микроорганизмов необходим свет, причем существенную роль играет не только поверхностная облучённость суспензии клеток, но и распределение энергии света внутри суспензии, что накладывает определенные ограничения на геометрическую форму фотобиореактора и вихревые потоки при интенсивном культивировании низших фототрофов.

На сегодняшний день опыт применения вихревых потоков для интенсивной культуры микроводорослей достаточно ограничен [3, 6]. А также практически отсутствуют теоретические представления, позволяющие моделировать закрученные потоки суспензии с учетом особенностей геометрии фотобиореакторов (ФБР) для низших фототрофов, роста и физиологии различных видов микроводорослей.

В данной работе представлен обзор применения газовихревых технологий для интенсивного культивирования морских диатомовых водорослей в промышленных масштабах, а также результаты исследований структуры потоков в газовихревых ФБР малой глубины.

В эксперименте использовали промышленный вихревой ФБР, разработанный ООО «МикроБиоТех» (рис. 1). Объём суспензии 280 л; глубина 0.08 м; естественная облучённость. Объект исследования –

Cylindrotheca closterium (Ehrenberg) Reimann et Lewin из коллекции культур ИнБИОМ г. Севастополь.



Рис. 1. Фотобиореактор малой глубины для культивирования микроводорослей.

В результате за 15 дней культивирования получено 2 кг сухой биомассы; максимальная продуктивность культуры составила 1,2 г/(л×сут) (95 г/(м²×сут). В качестве источника углерода при накопительном культивировании использовался атмосферный CO₂ без дополнительной подачи CO₂ из баллона

Список литературы

1. Лянцберг А.Р., Латкин А.С. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004, 149 с.
2. Сулов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М., Машиностроение, 1985, 256 с.
3. Геворгиз Р.Г., Уваров И.П., Репков А.П., Железнова С.Н. Вихревое перемешивание культур микроводорослей // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2021. – Т. 6, No. 4. – С. 559–563.
4. Бадаев Б.Н., Воробьев И.Д., Кислых В.И., Харченко В.А., Репков А.П. Аппарат для культивирования клеток тканей или микроорганизмов. Пат. SU 1779690 (51) МПК C12M 1/04 (1990.01). Заявка: No 89 4700908, заявл. 06.06.1989, опубл. 07.12.1992, бюл. No 34.
5. Кислых В.И., Рамазанов Ю.А., Репков А.П., Воробьев И.Д. Аппарат для суспензионного культивирования клеток тканей и микроорганизмов. Пат. RU 2125579 C1, МПК C12M 1/14,3/00. No 98117375/13, заявл. 22.09.1998, опубл. 27.08.1999, бюл. No 34.
6. Геворгиз Р.Г., Железнова С.Н., Зозуля Ю.В., Уваров И.П., Лелеков А.С., Нехорошев М.В. Промышленная технология производства фукоксантина на основе интенсивной культуры морской диатомы *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & Lewin в газовихревом фотобиореакторе // Российский биотерапевтический журнал. – 2016. – Т. 15, no. 1. – С. 22.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00083)

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ CCUS ПРИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, СПЕЦИФИКА ТРАНСПОРТА И КОМПРИМИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Голованов Д.А., Вершинин С.А., Хлопотова Е.А., Матушов С.С., Блябляс А.Н.

ООО «Газпромнефть НТЦ»

e-mail: Khlopotova.EA@gazpromneft-ntc.ru

В работе исследована специфика проектов улавливания, транспортировки и захоронения углекислого газа при реализации проекта декарбонизации крупного эмитента страны. Исследованы свойства углекислого газа при участии в технологических процессах, особенности транспортировки и компримирования углекислого газа. С помощью моделирования процессов транспортировки и компримирования в специализированном ПО определены оптимальные условия для транспорта углекислого газа методом трубопроводного транспорта.

Систематические исследования термобарических свойств углекислого газа для применения в нефтегазовой отрасли начались еще в середине 50-х годов прошлого века. Однако несмотря на интерес отрасли к углекислому газу, CO₂ никогда не рассматривался как целевой флюид при реализации проектов. В России не существует крупных реализованных проектов CCUS, а следовательно, отсутствуют методики применения, готовые технические решения и понимание особенностей технологических процессов проектов CCUS. В связи с этим вектор настоящей работы направлен на изучение термобарических свойств углекислого газа при его транспортировке посредством трубопроводного транспорта, а также определение особенностей режимов транспортировки. Теоретические положения данной работы позволят улучшить понимание процессов транспортировки углекислого газа, отметить особенности режимов транспортировки.

При выполнении данной работы был изучен опыт зарубежных компаний, реализующих проекты CCU/CCUS. Изучив транспортные системы зарубежных проектов (Слайнер, Ин-Салах, Сновит и др.) сделан вывод, что наиболее перспективным видом транспорта диоксида углерода на протяженные расстояния является трубопроводный транспорт. Это обусловлено экономическими предпосылками и экологической безопасностью – трубопровод наиболее экономичный вид транспорта в части капитальных и операционных вложений в сравнении с авто- и жд транспортом, а также имеет наименьшие объемы вторичной эмиссии.

Для определения оптимального состояния диоксида углерода для транспортировки по трубопроводу, были изучены физические свойства CO₂. Согласно анализу фазовой диаграммы и зависимости параметров плотности и вязкости CO₂ от его фазового состояния, оптимальным вариантом для транспорта является сверхкритическое состояние или состояние «плотная фаза». «Плотная фаза» - состояние углекислого газа при котором происходит постоянная прогрессия газа в жидкость без явно выраженного изменения фазы. В отличие от сверхкритического состояния «плотная фаза» обладает большей плотностью.

Данный выбор подтвержден мировыми реализованными проектами, обусловлен выбором эффективного диаметра трубопровода и сокращением металлоёмкости системы.

Для регулирования процесса проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных систем под углекислый газ разработана система требований с оптимальной комбинацией отечественных норм и успешных мировых практик. Авторами выделены основные требования к трубной продукции, а также определен набор вспомогательных сооружений для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации системы без вреда для экологии. Некоторые из них:

1. Фазовое состояние CO₂: Оптимальный вариант для трубопроводного транспорта – сверхкритическое состояние или «плотная фаза»;
2. Материалы: Традиционные углеродистые и низколегированные стали при транспорте обезвоженного CO₂;
3. Механические свойства: Повышенные требования к ударной вязкости и пределу текучести стали;
4. Повышенные требования к автоматизации линейной части;
5. Узлы запорной арматуры: один узел на 15 км трубопровода. Количество береговых узлов определяется наличием переходов через водные преграды.

Для системного решения задачи исследования авторами структурировано и описано поведение углекислого газа при осуществлении процесса транспортировки углекислого газа от эмитента до места закачки, особенности и специфика обеспечения технологического процесса реализации проектов CCUS. Данная работа является базой для реализации проектов по декарбонизации, на ее основе разработаны базовые концепции для ряда проектов CCUS в стране в части компримирования и транспорта CO₂.

Список литературы

1. Ильинова, А. А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа / А. А. Ильинова, Н. В. Ромашева, Г. А. Стройков // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – № 4. – С. 493–502. – DOI 10.31897/PMI.2020.4.12. – EDN MOSYUD.
2. CO2 Pipelines Infrastructure // IEAGHG URL: www.ieaghg.org/ (дата обращения: 15.04.2022).
3. Дорохин В.Г. Методика использования углекислого газа в различных агрегатных состояниях на подземных хранилищах газа: дис. канд. техн. наук: 25.00.17. – М., 2017. – 119 с.
4. National Standard of Canada CSA Z662:19 «Oil and gas pipeline systems», June 2019.

МЕТОДИКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Головатюк А.С., Аникин А.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», г. Москва.

e-mail: golovatyuk@kerc.msk.ru

В настоящее время в ракетно-космической технике в качестве теплозащитных покрытий широкое применение находят композиционные материалы ввиду относительно низкой удельной плотности, хороших механических характеристик и способности поглощать тепло за счет физико-химических превращений. Принцип работы подобных материалов характеризуется разложением поверхностного слоя (или разложением отдельного компонента материала) при обеспечении благоприятного теплового режима внутренних слоев. В общем случае, когда материал подвергается воздействию высокотемпературного газового потока, протекают следующие процессы, оказывающие влияние на механизм теплопередачи: аккумуляция тепла веществом при нагреве до температуры разрушения; излучение от нагретой поверхности; поглощение тепла при фазовых или физико-химических превращениях; вдув газообразных продуктов разрушения во внешний поток. Детальное моделирование подобных механизмов разрушения большинства используемых на практике теплозащитных материалов представляют достаточно сложную задачу [1].

Объектом настоящего исследования являются новые перспективные теплозащитные покрытия разных классов. Первая группа материалов представляла из себя напыляемые отверждаемые резиноподобные покрытия. Вторая – композиционные материалы на основе органических и углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим.

Цель работы – расчетно-экспериментальное определение параметров термоэрозионной стойкости рассматриваемых теплозащитных покрытий. Испытываемые образцы материалов выполнены в форме цилиндра различного диаметра и высоты. Для проведения экспериментальных исследований использовался газогенератор, работающий на компонентах керосин + воздух. Условия эксплуатации материала определяются значением теплового потока, которое при проведении испытаний зависит от диаметра цилиндрического образца и расстояния до сопла газогенератора. Для их выбора проведена серия калориметрических испытаний. Тепловые потоки измерялись с помощью метода регулярного теплового режима. После предварительных калориметрических испытаний проведены огневые испытания, в ходе которых образец материала помещался в поток на определенном

расстоянии от сопла таким образом, чтобы осуществлялось лобовое натекание на поверхность образца и обеспечивалось заданное значение теплового потока в диапазоне 0,5–5 МВт/м². Время воздействия потока на образцы варьировалось в диапазоне 0,7–10 секунд в зависимости от типа материала и его толщины. Чтобы корректно оценить величину массового уноса на квазистационарном режиме, необходимо учесть нестационарный период нагрева материала [2]. Для этого часть образцов подвергалась воздействию газового потока только в течение относительно короткого промежутка времени, соответствующего времени выхода на квазистационарный режим. Определение времени установления квазистационарного режима разрушения образца производилось путем контроля температуры поверхности, контактирующей с газовым потоком, с помощью тепловизора. По результатам измерений исходной и конечной массы и длины образца определялся общий унос массы материала и линейный унос.

Для оценки и сравнения эффективности теплозащитных свойств материалов необходим интегральный критерий, учитывающий весь комплекс процессов, происходящих при термическом разложении материала. В качестве такого критерия при обработке экспериментальных данных использованы эффективная энтальпия разрушения $H_{эфф}$ и безразмерная скорость разрушения G [3]. Обнаружено, что для материалов, демонстрирующих наличие двух фронтов уноса массы: поверхностного (определяет внешнюю границу материала) и внутреннего (определяет толщину слоя материала, в котором происходят физико-химические превращения), использование величины $H_{эфф}$ в качестве характеристики их термоэрозионной стойкости некорректно. В этом случае целесообразно применять безразмерную скорость разрушения G .

Список литературы

1. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; Под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Полежаев Ю.В., Фролов Г.А. Тепловое разрушение материалов // Под ред. Скорохода В.В. Киев: Изд-во ИПМ НАНУ, 2005. 288 с.
3. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита // Под ред. Лыкова А.В. М.: Энергия, 1976. 392 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПАРОВОГО ПИРОЛИЗА ОТРАБОТАННЫХ ШИН

Горшков А.С.^{1,2}, Ларионов К.Б.^{1,2}¹ Кузбасский государственный технический университет² Томский политехнический университет

e-mail: asg47@tpu.ru

В настоящее время любая отрасль народного хозяйства зависит от логистического устройства. И часть грузоперевозок приходится на автотранспорт на нужды которого по данным Росстата [1] за 2021 год было произведено 55,9 млн. пневматических шин, что больше аналогичного показателя за 2020 год на 25%. Производство и потребление шин характеризуется стабильным уровнем и небольшим ростом. При этом ежегодное формирование шинных отходов составляет около 1,5–1,7 млн. т [2]. Данные отходы характеризуются высокой пожароопасностью и выделением большого количества токсичных газов при горении, разлагаются шины в течение длительного времени. Кроме того, при контакте шин с водой (дождевой или грунтовой) из них вымываются токсичные соединения: дифениламин, дибутилфталат, фенантрен и др.

При этом, несмотря на законодательный запрет, направленный на сохранение ценного материала, значительная часть данных отходов (63%) расположена на полигонах. В РФ среди методов переработки шин можно выделить пиролиз и измельчение (около 20%), сжигание (около 16%) и восстановление (около 1%) [2]. Реализуемый в США способ утилизации, связанный с использованием измельченных шин при строительстве дорог, широкого распространения в России не получил.

Пиролиз, как способ термической конверсии, отличается более широкими возможностями в плане получения и применения получаемых продуктов [3–5]. Диверсификация продуктов базируется на нескольких условиях, среди которых: температурный режим, стадийность процесса, присутствие катализатора, инертный агент и т.д. Инертная среда, проходя через слой материала, во-первых, может являться теплоносителем, во-вторых, уносит из зоны реакции газофазные продукты разложения. В-третьих, может оказывать влияние на углеродсодержащий остаток (способствовать выходу летучих или получению развинутой поверхности).

В свою очередь паровой пиролиз обеспечивает одновременное протекание процесса активации углеродного остатка, что увеличивает ценность этого продукта. Газофазные соединения, образующиеся в процессе парового пиролиза имеют более высокую энергетическую ценность [6]. Водяной пар также обеспечивает пожаро- и взрывобезопасность.

В данной работе представлено сравнение кинетики процесса термического разложения резинотехнических отходов. В качестве исходного материала использовалась резиновая крошка крупногабаритных отработанных шин (Белаз), измельченная до фракции 2–4 мм. Термогравиметрический анализ проводился в СТА 449 С Jupiter (Netzsch, Germany) в присутствии

аргона или пара. Масса образца в обоих случаях составляла около 10 мг, расход среды 20 мл/мин, диапазон температур 35–1000°C. Скорость нагрева изменялась для расчета энергии активации и составляла 2,5/5/10/20°C/мин.

По результатам термогравиметрического анализа определена энергия активации в среде пара и аргона с помощью методов Friedman, OFW, Ortega и KAS [7].

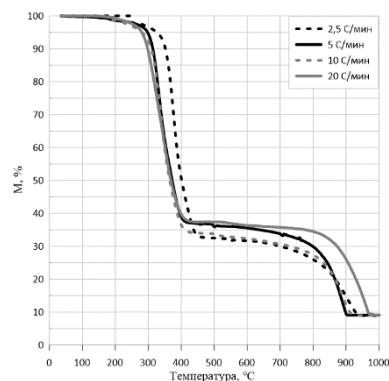


Рис. 1. Зависимость массы образца от температуры при разных скоростях нагрева в паровой среде.

Средняя энергия активации, определенная по методу Friedman для сред пара и аргона составила 173,9 и 98,9 кДж/моль соответственно. Для метода OFW 201,5 и 106,5 кДж/моль. Для метода Ortega 212,8 и 109,4 кДж/моль. Для метода KAS 203,5 и 100,9 кДж/моль.

Список литературы

1. Социально-экономическое положение России. 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-12-2021.pdf> (дата обращения: 01.05.2022).
2. Маркетинговое исследование рынка переработки использованных шин, Techart [Электронный ресурс]. URL: <https://research.techart.ru/report/used-tyres.htm> (дата обращения: 01.05.2022).
3. Rowhani A., Rainey T. J. Scrap tyre management pathways and their use as a fuel—a review //Energies. – 2016. – Т. 9. – №. 11. – С. 888.
4. Labaki M., Jeguirim M. Thermochemical conversion of waste tyres—a review //Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – Т. 24. – №. 11. – С. 9962–9992.
5. Briens C., Piskorz J., Berruti F. Biomass valorization for fuel and chemicals production—A review //International Journal of Chemical Reactor Engineering. – 2008. – Т. 6. – №. 1. – С. 49.
6. Larionov K. B. et al. Liquid Hydrocarbons Production by the Steam Pyrolysis of Used Tires: Energy Characteristics and Environmental Sustainability //Waste and Biomass Valorization. – 2022. – Т. 13. – №. 4. – С. 2233–2251.
7. Zhang X. Applications of kinetic methods in thermal analysis: a review //Engineered Science. – 2020. – Т. 14. – №. 2. – С. 1–13.

Работа выполнена в рамках проекта № FZES-2021-0008

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ АДсорБЕРА-ТЕПЛОобМЕННИКА ДЛЯ АДсорБЦИОННОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Грекова А.Д., Кривошеева И.О., Стрелова С.В., Токарев М.М.

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5

e-mail: grekova.alexandra@gmail.ru

Адсорбционное преобразование тепла – энерго-сберегающая технология, позволяющая использовать энергию низкопотенциальных источников тепла (солнечную, геотермальную, бросовое тепло промышленности и транспорта). В основе технологии лежат обратимые процессы сорбции-десорбции. В результате процесса сорбции паров рабочей жидкости пористым сорбентом адсорбер-теплообменник разогревается, а испаритель охлаждается. Этот тепловой эффект и может быть использован для охлаждения продуктов, получения льда или кондиционирования воздуха. Оптимизация геометрии адсорбера-теплообменника (АТО) нацелена на увеличение эффективности адсорбционного теплотрансформатора (АТП) [1].

В работе проведен анализ девяти промышленных радиаторов с целью поиска среди них оптимального для цикла адсорбционного кондиционирования воздуха. В качестве адсорбента рассматривали композит “LiCl/SiO₂” [2]. Критерием эффективности АТП принята мощность, генерируемая единицей объема АТО. При фиксированном объеме АТО способность отводить тепло от сорбента растет с увеличением количества каналов и ребер. Однако при этом сокращается свободный объем АТО, доступный для сорбента. Для выбора оптимальной геометрии необходимо найти компромисс между описанными тенденциями.

Для оценки теплопередачи АТО было использовано уравнение (1):

$$Q = \Delta T * S_{\text{пер}} * \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2(1+E(k-1))} \right]^{-1} \quad (1)$$

где $S_{\text{пер}}$ – площадь каналов, α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи «среда1-металл» и «металл-среда2», $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность стенки АТО, $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки канала, E – эффективность ребра, k – коэффициент оребрения [3]. Таким образом, Q пропорциональна температурной движущей силе ΔT и коэффициенту теплопередачи UA :

$$UA = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2(1+E(k-1))} \right]^{-1} \quad (2)$$

С другой стороны мощность, генерируемую АТО можно оценить по уравнению 3:

$$M = m_c \gamma_c U_{\text{макс}} = V_c \gamma_c U_{\text{макс}} \quad (3)$$

где m_c – масса сорбента, V_c – объем сорбента, γ_c – насыпная плотность сорбента, $U_{\text{макс}}$ – удельная максимальная мощность сорбента, реализуемая в плоском монослое. M и UA являются функциями геометрии АТО. Варьирование геометрических параметров (числа каналов N_k и финов N_f) при фиксированном объеме АТО позволяет найти компромисс между теплогенерацией и теплосъемом. Это линия пересечения двух 3D поверхностей (рис. 1) – геометрическое место точек соответствующее геометриям

АТО при равенстве теплосъема и теплогенерации (оптимальное устройство АТО).

После теоретической оценки UA (уравнение 2) из 9 промышленных радиаторов были выбран 3 представительных АТО для сорбционных экспериментов. Эксперименты проводили методом большого температурного скачка [4] в условиях цикла кондиционирования воздуха. Результаты сорбционных экспериментов (вертикальные столбцы) коррелируют с результатами теоретических расчетов (3D поверхность теплосъема) (рис 1) для данного цикла. При этом видно, что один из исследованных АТО близок к оптимуму (АТО №7) и превосходит другие теплообменники в 1.5–2 раза.

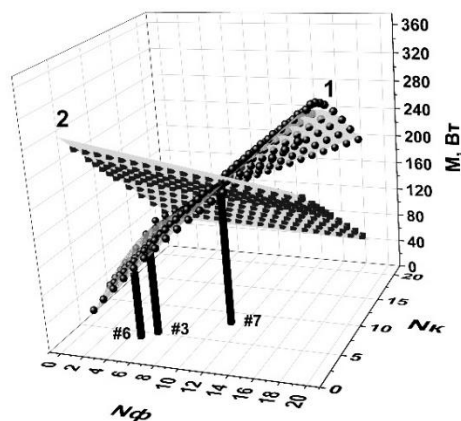


Рис. 1. Поверхности теплосъема (1) и теплогенерации (2). Столбцы – результаты сорбционных экспериментов для АТО, изготовленных из коммерческих теплообменников №6, №3 и №7.

Таким образом, показано, что предложенная процедура оценки оптимальности геометрии АТО может быть использована для повышения эффективности АТП.

Список литературы

1. Gluesenkamp K.R., Frazzica A., et al, Experimentally Measured Thermal Masses of Adsorption Heat Exchangers// Energies. 2020. V.13, P.1150–1171.
2. Gordeeva L.G., Aristov Yu.I., Composite sorbent of methanol “LiCl in mesoporous silica gel” for adsorption cooling: Dynamic optimization// Energy. 2011. V.36, P.1273–1279.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М: Атомиздат, 1979, 416 с.
4. Tokarev M.M., Aristov Yu.I., A new version of the Large Temperature Jump method: The thermal response (T-LTJ)// Energy. 2017. V.140, P.481–487.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-79-10183)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНЕГОЗАДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Дектерев Д.А.^{1,2}, Лобасов А.С.^{1,2}, Литвинцев К.Ю.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

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

e-mail: dekterev_da@mail.ru

Использование снегозадерживающих конструкций является важным аспектом для осуществления бесперебойной логистики автомобильного и железнодорожного транспорта в регионах с высоким уровнем ветроснегпереноса. В связи с этим, исследование эффективности снегозадерживающих конструкций является весьма актуальной задачей.

В ходе предшествующих работ специалистами Сибирского федерального университета был проведен большой цикл расчетных работ по изучению параметров снегозадерживающих заборов. Для верификации результатов численного моделирования требуются данные натурных и/или лабораторных экспериментов.

В данной работе было проведено физическое моделирование, основанное на визуализации течений с подветренной стороны заборов и анализе отложений мелкодисперсных частиц, формирующихся в зоне торможения потока, на начальном этапе накопления, когда отсутствует обратное влияние отложений на поток.

Эксперимент проведен в аэродинамической трубе Сибирского федерального университета. Установка исследуемых моделей производилось в закрытом рабочем участке сечением 0,8×0,8 м и длиной 2,5 м. Стенки рабочего участка выполнены из прозрачного материала для возможности использования оптических методов исследования.

С помощью 3D прототипирования изготовлены варианты заборов с различными геометрическими параметрами. Масштаб моделей выбирался исходя из габаритов аэродинамического стенда и составлял М 1:100, при этом высота моделей Н= 60 мм, длина l=400 мм (6,67 Н), ширина доски a=2,5 мм. К изменяемым параметрам относились: просветность (отношение открытой площади щитовой панели забора, к ее общей площади), высота зазора между щитовой панелью забора и поверхностью земли, ориентация досок на панели забора. Также исследованы варианты с заборами, имеющими 15° наклон по потоку и против него. В качестве базового варианта выбрана модель с вертикальным расположением досок, просветностью 50% и зазором h=1/6Н.

Выбор исследуемых вариантов обусловлен анализом практики применения подобных конструкций в мире и в России в частности [1, 2].

Визуализация течения за различными типами заборов была реализована с использованием непрерывного диодного лазера с оптической насадкой, формирующей лазерный нож. В качестве трассеров в поток были добавлены твердые мелкодисперсные частицы талька. Регистрация частиц трассеров, подсвеченных лазерным излучением, осуществлялась с использованием скоростной камеры PCO 1200 hs.

Исследование отложений, формирующихся за различными типами заборов осуществлялось путём добавления в поток фиксированного количества мелкодисперсных частиц, оседающих в зонах торможения потока. Затем производилась фотосъемка пространственного распределения картин отложений, сформированных из осевших частиц. Засев потока производится таким образом, чтобы по достижению исследуемой модели частицы двигались вдоль поверхности «земли».

Для количественного измерения эффективности работы забора после каждого запуска проводился сбор и взвешивание осевших частиц. Размер области, на которой осуществлялся сбор частиц оставался неизменным для всех типов заборов и равнялся ширине рабочего участка (0,8 м), а в длину составлял 0,9 м (15 высот исследуемых моделей) ниже по течению от забора.

В результате работ показано, что эффективность «снегозадержания» на начальном этапе накопления у забора с просветностью 33% примерно на 10% выше, чем у забора с просветностью 50%. Максимальная эффективность работы достигается для заборов с меньшим нижним зазором, однако необходимо учитывать, что в случае полного перекрытия зазора снежными отложениями аэродинамика значительно перестроится. Заборы с горизонтальным расположением досок в среднем имеют более высокую эффективность работы по сравнению с заборами с вертикальным расположением. Наклон забора по потоку приводит к уменьшению эффективности его работы. Наклон забора против потока даёт увеличение эффективности для забора с вертикальной ориентацией досок примерно на 17% и снижает эффективность работы забора с горизонтальной ориентацией.

В итоге результаты физического моделирования подтвердили основные закономерности, выявленные с помощью численного моделирования, по влиянию на эффективность снегозадерживающих заборов таких параметров как: просветность, величина нижнего зазора и ориентации досок. Показано, что границы зоны и эффективность «снегозадержания» в первую очередь связаны с аэродинамикой взаимодействия двух потоков: огибающего забора сверху и ускоренного в нижнем зазоре. Аналогичный механизм описан в литературе [2].

Список литературы

1. Бялбжеский, Г. В., Дюнин, А. К., Плакса, Л. Н., Рудаков, Л. М., Уткин, Б. В.; Под ред. Лунина А. К. Зимнее содержание автомобильных дорог -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 197 с.
2. Tabler R.D. Controlling blowing and drifting snow fences and road design // FinalReport2003

АБСОРБЦИОННЫЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ РЕЦИКЛИНГА СБРОСНОГО ТЕПЛА НА ТЭС

Елистратов С.Л., Миронова Н.В.

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

e-mail: elistratov.sl@yandex.ru

Для современной энергетики разработка и внедрение технологий, позволяющих повысить эффективность ТЭС и снизить при этом нагрузку на окружающую среду, является важнейшей задачей.

На многих ТЭС существует ряд проблем и технологических ограничений при работе в летний период, когда температура охлажденной воды в чаше градирни превышает нормативные значения на 20°C. Это приводит к снижению эффективности генерирующего и вспомогательного оборудования: мощности турбины до 10% из-за снижения качества вакуума в конденсаторе, выработки электроэнергии до 6% по причине недоохлаждения водорода в газоохладителях электрогенераторов, превышению температуры масла в маслоохладителях свыше допустимого уровня.

С целью экономии энергоресурсов, уменьшения теплового загрязнения и повышения эффективности выработки электрической и тепловой энергии многие страны интегрируют абсорбционные термотрансформаторы (АТТ) в работу ТЭС. Данное решение позволяет полностью снять ограничения, связанные с недостаточным охлаждением и обеспечить надежную работу оборудования с возвратом (рециклингом) в рабочий цикл тепловых стоков станции. Обычно в качестве низкопотенциального источника тепла (основного теплового стока на ТЭС) для работы АТТ используют циркуляционную воду системы охлаждения конденсаторов паровых турбин с температурой 30-55 °С, а нагретый теплоноситель с температурой до 95 °С используют для подогрева подпиточной воды системы горячего водоснабжения, работы городской системы отопления или для собственных нужд станции. Для работы генератора АТТ можно использовать пар из коллекторов промышленных отборов паровой турбины с давлением 0,3–0,7 МПа, выхлопные газы от ГПЭ и ГТУ, а также производить его прямой огневой обогрев с использованием горючих отходов.

Традиционно в качестве рабочего тела в АТТ применяют водный раствор соли LiBr [1], который при наличии очевидных преимуществ обладает также рядом существенных недостатков: высокой покупной стоимостью, коррозионной активностью и термической неустойчивостью при 130°C и выше. Этот продукт в России в настоящее время не производится.

Вместо LiBr в АТТ могут использоваться водно-солевые растворы на основе LiCl. Несмотря на низкую стоимость, эта соль обладает меньшей растворимостью по сравнению с LiBr. АТТ на основе водного раствора LiCl имеют известные ограничения в использовании [2]. Например, если в бромистолитиевом АТТ можно обеспечить охлаждение теплоносителя до 5–7°C, а в современных машинах и до

–5°C, то в хлористо-литиевых – ниже 10–15°C на практике получить нельзя. Однако, для некоторых областей использования АТТ, таких как энергетика, для работы штатных систем охлаждения температура циркуляционной воды ниже 15°C не требуются. Кроме того, смеси солей на основе LiCl: LiCl+LiNO₃, LiCl+CsCl и другие, обладают сравнительно более высокой растворимостью, по стоимости сопоставимы с LiBr и производятся в России.

Исследования термодинамической эффективности АТТ показали, что водный раствор LiCl хотя и уступает по своей эффективности раствору LiBr (см. рис. 1), но при этом обеспечивает более высокую производительность системы благодаря тому, что при равных значениях давления и концентрации растворов имеет более высокую плотность паров. Это позволяет использовать для работы генератора АТТ греющий источник тепла с относительно низкой температурой при одинаковых тепловых нагрузках.

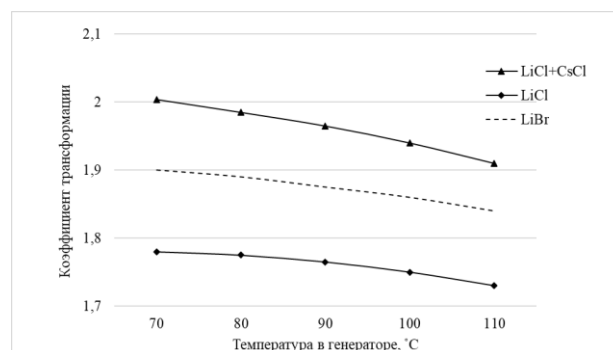


Рис. 1 – График зависимости коэффициента трансформации от температуры греющего источника при работе АТТ на различных рабочих телах.

Сравнительные исследования показали, что интеграция АТТ в тепловую схему крупных ТЭЦ обеспечивает не только оптимальный режим охлаждения оборудования в течении всего года, но и позволяет осуществить рециклинг сбросного тепла на ТЭС.

Список литературы

1. Абсорбционные преобразователи теплоты: монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 338 с.
2. Бараненко А.В. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов: моногр. А.В. Бараненко, С.В. Караван, О.А. Пинчук, Д.В. Караван. – М.: Изд-во «Перо», 2014. – 393 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВИХРЕВОГО ФОТОБИОРЕКТОРА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ

Железнова С.Н.^{1,2}, Геворгиз Р.Г.^{1,2}

¹ ФИЦ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь

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

e-mail: zheleznovasveta@yandex.ru

Альтернативой современным синтетическим лекарством, могут выступать вещества природного происхождения, которые практически не оказывают побочных эффектов на организм человека в отличие от синтетических препаратов [1]. Важная особенность метаболизма бентосных диатомей заключается в способности синтезировать ценные биологически активные вещества с высокой скоростью [2]. Бентосных диатомовых водорослей известно более 100 тыс. видов, но с целью получения активных соединений – фукоксантина (Фк) и полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) в полупромышленных масштабах выращивают только два вида: *Cylindrotheca closterium* и *Amphora coffeaeformis* [3, 4]. Такая ограниченность во многом обусловлена отсутствием в мире высокопродуктивных промышленных систем культивирования с эффективным перемешиванием суспензий при малых затратах энергии. Наиболее совершенной с точки зрения эффективности перемешивания, затрат энергии на перемешивание суспензии, массообмена, масштабирования, простоты конструкции и удобства в эксплуатации является газовихревая система культивирования, которая позволяет культивировать биомассу фотосинтезирующих микроорганизмов, и клеточных культур (см. рис. 1).



Рис. 1. Общий вид промышленного газовихревого фотобиореактора, объём 580 л, разработка ООО «Водорослевые технологии» г. Новосибирск (слева) и схема вихревого движения в нем (справа).

Важным отличием газовихревого фотобиореактора является то, что «мягкое», но эффективное перемешивание осуществляется за счет создания над суспензией и внутри суспензии вихревых потоков (торнадо) посредством трения воздуха о поверхность суспензии. Такой способ перемешивания обладает рядом преимуществ: 1. Во всем объеме суспензии практически отсутствуют «мертвые» зоны; 2. Мощ-

ное придонное течение и восходящий поток в центре фотобиореактора позволяет получить интенсивную культуру любых «тяжелых» неприкрепленных организмов, поскольку клетки характеризуются высоким содержанием кремния (2,8–3% от сухой массы) и при отсутствии перемешивания культура оседает на дно за несколько минут; 3. Вихревой способ перемешивания не является травматичным для любых видов клеток; 4. За счет трения потоков воздуха о поверхность суспензии в значительной степени увеличивается массообмен кислорода и углекислоты между суспензией и атмосферой.

В докладе представлены результаты интенсивного культивирования бентосной морской диатомеи *C. closterium* с использованием газовихревого фотобиореактора. Использование газо-вихревой системы культивирования позволило получить максимальную продуктивность культуры *C. closterium* – 1,2 г/(л×сут) или 95 г/(м²×сут), что в 3–4 раза превышает показатели других систем культивирования. Максимальная плотность культуры за 15 дней эксперимента достигла 7 г/л сухой биомассы, при этом содержание Фк в биомассе составляло 1,2% и ПНЖК 5%. Результаты проведенных экспериментов показали перспективность организации масштабного выращивания *C. closterium* в газовихревой системе культивирования и получения Фк и ПНЖК с низкой себестоимостью в промышленных масштабах.

Список литературы:

1. Martínez Andrade K.A., Lauritano C., Romano G., Ianora A. Marine microalgae with anti-cancer properties // *Marine Drugs*. 2018. V. 16, iss. 5. P. 1–17.
2. Schaub I., Wagner H., Graeve M., Karsten U. Effects of prolonged darkness and temperature on the lipid metabolism in the benthic diatom *Navicula perminuta* from the Arctic Adventfjorden, Svalbard // *Polar Biology*. 2017. V. 40, iss. 7. P. 1425–1439.
3. Wang S., Verma S.K., Said I.H., Thomsen L., Ullrich M.S., Kuhnert N. Changes in the fucoxanthin production and protein profiles in *Cylindrotheca closterium* in response to blue light-emitting diode light // *Microbial Cell Factories*. 2018. V. 17, iss. 1. P. 1–13.
4. Rajaram M.G., Nagaraj S., Manjunath M., Voopathy A.B., Kurinjimalar C., Rengasamy R., Jayakumar T., Sheu J-R., Li J-Y. Biofuel and Biochemical Analysis of *Amphora coffeaeformis* RR03, a Novel Marine Diatom, Cultivated in an Open Raceway Pond // *Energies*. 2018. V. 11. P. 1341–1352.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00083)

БИОТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСЕРНИСТОГО СЫРЬЯ

Ибраева К.Т., Шаненков И.И.

Тюменский государственный университет

e-mail: k.ibraeva@utmn.ru

Добыча, транспортировка и переработка одного из востребованных видов энергоносителей – нефти сопровождается образованием значительного количества нефтешламовых отходов [1], имеющих высокий класс опасности. Как правило, такие отходы производства содержат в своем составе большое количество нежелательных примесей, что существенно усложняет задачу их экологичной и эффективной утилизации. Современным подходом переработки нефтешламовых отходов является их термическое преобразование методами пиролиза или газификации [2] с получением полезных продуктов в виде жидких углеводородов, синтез-газа и углеродистого остатка.

К одному из подобных продуктов можно отнести углеродистый остаток, полученный в результате термической переработки нефтешлама (УОН). Получаемый УОН характеризуется высокой зольностью и повышенным содержанием серы. Данный продукт относят к отходам производства по причине нерациональности его дальнейшей переработки. Однако его сжигание может быть рассмотрено в качестве способа утилизации, частично компенсирующего собственные тепловые издержки термической переработки нефтешлама.

Полученные результаты определения теплотехнических характеристик УОН свидетельствуют о том, что несмотря на высокое значение зольности ($A^d=60\%$), его теплота сгорания ($Q_i^f=14,2$ МДж/кг) превышает аналогичное значение для торфа (6,66–9,99 МДж/кг [3]) и сопоставима с бурными углями (6,38–19,80 МДж/кг [3]). Стоит отметить, что в УОН наблюдается высокое содержание серы в пересчете на горючую массу топлива, равное $S^{daf}=4,3\%$.

Очевидно, что сжигание такого топлива будет сопровождаться высокими эксплуатационными затратами и большим количеством выбросов SO_x , что приводит к поиску варианта сжигания УОН в составе топливной композиции.

Принимая во внимание, что соединения кальция обладают свойством связывания оксидов серы во время сжигания, в настоящем исследовании рассмотрен вариант создания топливных смесей из УОН и торфа Суховского месторождения, в минеральной части которого содержится большое количество карбоната кальция.

При совместном сжигании торфа (25%) и УОН (75%) количество образовавшихся оксидов серы значительно меньше: при сопоставлении интегральных площадей SO_2 от сжигания топливной композиции и исходного УОН, измеренных газоанализатором Тест-1 (Бонэр), видно, что количество образовавшихся оксидов снижается более чем в 5,5 раз (рис. 1). В свою очередь, добавление в идентичном количестве (25%) малозольной биомассы (древесных опилок) с характерным низким содержанием кальция в топливную

композицию на основе УОН, при последующем сжигании смеси данный эффект проявляется значительно меньше. Есть основания утверждать, что существенное снижение выбросов серы при сжигании смеси торфа и УОН происходит за счет взаимодействия газовой фазы с минеральной частью торфа.

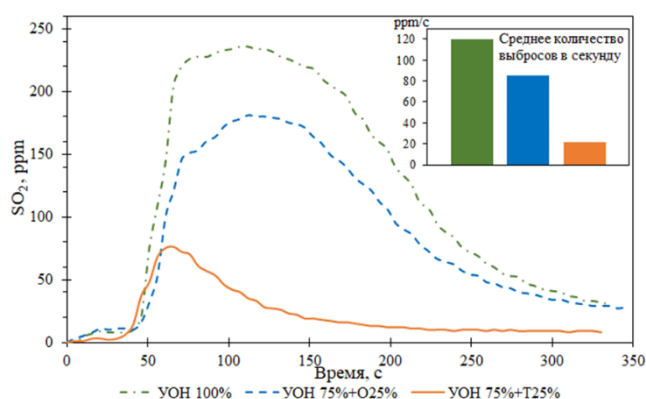


Рис. 1 – Выбросы оксидов серы при сжигании исходного УОН; УОН с добавлением опилок (О) в количестве 25%; УОН с добавлением торфа (Т) в количестве 25%.

Таким образом, как показано на примере опилок и торфа, простое замещение некоторого количества высокосернистых топлив биомассой (опилки) в топливной композиции приводит к незначительному уменьшению оксидов серы, в отличие от добавления биомассы с высокой долей минеральной составляющей (торф), которая содействует к дополнительному снижению выбросов за счет связывания серы в процессе сжигания.

В заключение можно констатировать, что совместное сжигание углеродистого остатка нефтешлама и высокоминерализованного торфа (25 мас.%) позволяет снизить количество образующихся выбросов SO_2 в несколько раз (более чем в 5 раз), что является положительным фактором для добавления биомассы в топливные композиции с высокосернистыми видами сырья, предназначенного для последующего сжигания.

Список литературы:

1. IEA Online Data Services. Renewables Information. // IEA. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity.html> (дата обращения 11.08.2021).
2. Hazardous elements flow during pyrolysis of oily sludge / J. Li, F. Lin, L. Xiang, F. Zheng, L. Che, W. Tian, G. Chen // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – V. 409.124986.
3. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – Санкт-Петербург: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

Работа поддержана Госзаданием (грант № FEWZ-2021-0014)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПОТОКА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р.

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

e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Агрессивное действие льда на техногенных и природных объектах является серьёзной проблемой во всем мире. Задачи борьбы с обледенением приборов и устройств актуальны для многих отраслей промышленности.

Цель исследования получить экспериментальные данные аэродинамики потока в климатической камере с использованием оптических методов измерения. Изучение реальных моделей лопастей ветрогенератора позволит решить одну из основных проблем обледенения, сдерживающих эффективное использование ветрогенераторов для автономного энергоснабжения отдаленных населённых пунктов крайнего севера. Сейчас эта тематика перспективна и очень актуальна для обеспечения динамического развития энергетики в Арктических и отдаленных регионах Сибири.

Задача стенда сводится к созданию условий в климатической аэродинамической трубе (рис. 1), соответствующих обледенению в природных условиях, для проведения количественных и качественных измерений показателей наледи на объекте заданной формы, помещённого в прозрачный канал прямоугольного сечения.

Основные параметры стенда соответствуют стандартам описанных в ГОСТР ИСО 12494 — 2016.

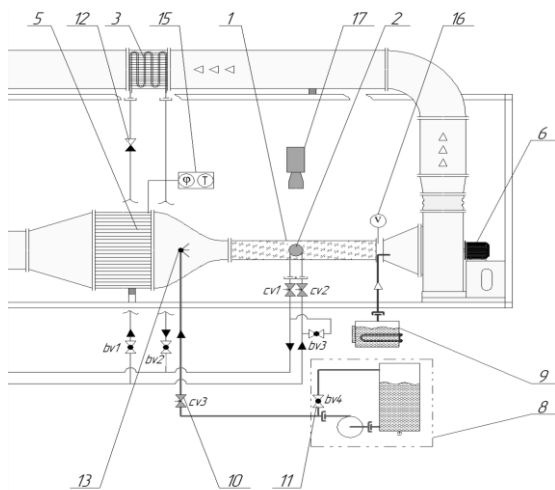


Рис. 1. Схема климатической аэродинамической трубы.

Экспериментальные исследования проводились на установке, которая включает в себя: рабочий канал (1) квадратного сечения (размеры по внутренней части 200x200 мм) выполненный из органического стекла; испытуемый экспериментальный объект (2); охладитель воздуха (3); металлические вентиляционные каналы (4); хонейкомб (5); центробежный вентилятор с электродвигателем (6); криотермостат проточный LOIP FT-600 (7); система подачи воды для формирования капельной влаги в воздушном потоке

(8); парогенератор (9); регулирующие вентили (10); шаровые краны (11); обратный клапан (12); форсунка распылительная (13); термопреобразователь сопротивления (14); датчик относительной влажности и температуры (15);

В качестве тестируемого объекта использовалась лопатка с профилем RG-15. Лопатка изготовлена методом быстрого прототипирования на 3D-принтере WanhaoDuplicator I3 с использованием PLA пластика.

Экспериментальные исследования течения в климатической камере проводились методом лазерной доплеровской анемометрии. Были получены данные о распределении скоростей и проведен анализ структуры газового потока и степени неравномерности газового потока. Измерения проводились в четырех поперечных сечениях. Первые два сечения находятся на расстоянии 50 и 150 мм от передней кромки лопатки, оставшиеся два сечения находятся на расстоянии 50 и 150 мм от задней кромки лопатки соответственно.

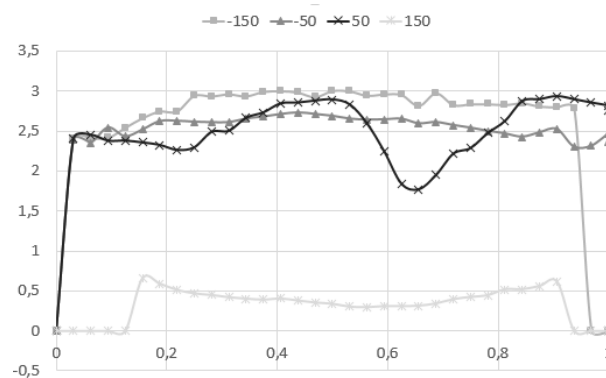


Рис. 2. Результаты экспериментальных измерений.

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, позволяют получить новые научные результаты для описания аэродинамического взаимодействия потока с охлаждаемыми поверхностями. Данные результаты могут быть использованы для верификации численных расчетов.

Список литературы:

1. Kabardin I.K., Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G., Naumov I.V. The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. № 4. P. 504–508.
2. Yibing Wang, Yuanming Xu. An effect assessment and prediction method of ultrasonic de-icing for composite wind turbine blades // Renewable Energy №118. 2018. P. 1015–1023.
3. Sabatier J., Lanusse P. CRONE control based anti-icing/deicing system for wind turbine blades // Control Engineering Practice №56. 2016. P. 200–209.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00205)

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОЗДУХОЗАБОРНОГО И ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Мильман О.О., Шифрин Б.А., Птахин А.В., Крылов В.С., Картусова А.Ю.

ЗАО «НПВП «Турбокон», Калуга, ул. Комсомольская роща, д.43

e-mail: turbocon@kaluga.ru

Современные мощные парогазовые установки благодаря высокой энергоэффективности и хорошим экологическим характеристикам стали основным типом вновь вводимого в эксплуатацию энергетического оборудования на органическом топливе.

Надежность работы ГТУ достигается за счет развитой системы подготовки циклового воздуха, включающей грубую и тонкую очистку от твердых загрязнений, от атмосферной влаги и снега, защиту от обледенения и ряд других функций. Конструкция воздухозаборного тракта (ВЗТ) должна обеспечивать приемлемую неравномерность параметров воздуха, подводимого на вход компрессора ГТУ. Для тракта уходящих газов (УГ) ГТУ необходимо с максимальной эффективностью погасить высокоскоростную струю перед подачей газов в котел – утилизатор (КУ) ПГУ в пределах ограниченной протяженности. На входе в котел необходимо обеспечить максимальную равномерность скоростей, отсутствие которой способно одновременно снизить его тепловую эффективность и повысить аэродинамическое сопротивление.

Сложный характер течения в этих устройствах потребовал комплексного применения для поиска путей их оптимизации методов численного моделирования и экспериментальных продувок макетов.

Предварительный анализ характеристик ВЗТ показал, что участок, создающий повышенное сопротивление, – это канал заууженного сечения перед входом в компрессор, из которого осуществляется сложное перестроение потока в кольцевой канал при одновременном его повороте на 90° .

В качестве основного критерия сравнения вариантов модернизации по эффективности была принята разность в потерях полного давления от входа в ВЗТ до выхода из него – входа в воздухозаборное устройство компрессора. Кроме того, принималась во внимание результирующая неравномерность поля скоростей на выходе из ВЗТ, как по величине, так и по направлению.

Наиболее перспективными, как показали расчеты, оказались два варианта – вариант №1 ВЗТ с увеличенной шириной воздуховода и ее уменьшением в зоне поворота и вариант №2 с воздуховодом исходной ширины и расширением по высоте (рис. 1). Для исходного и обоих вариантов был создан экспериментальный стенд и проведена серия продувок.

По результатам экспериментальных продувок подтверждено снижение потерь полного давления для обоих исследованных вариантов модернизации по сравнению с исходным вариантом.

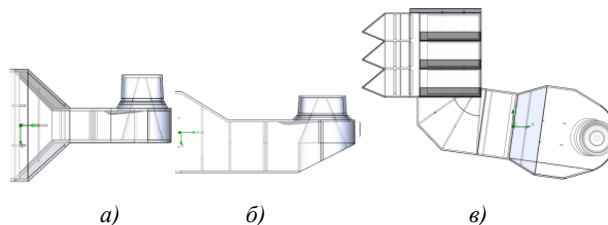


Рис. 1. Расчетные модели ВЗТ вблизи входа в компрессор: исходная (а), вариант №1 (б), вариант №2 (в).

Так для варианта №1 с увеличенной шириной воздуховода и ее уменьшением в зоне поворота по эксперименту оно составило 397 Па. Эффективность варианта №2 ниже, чем по варианту №1, что указывает на перспективность последнего. Снижение средней величины потерь давления в ВЗТ относительно исходной конструкции составляет 235 Па.

Газовоздушный тракт (ГВТ) – это многофункциональное устройство, предназначенное для обеспечения эффективного торможения потока УГ, генерации пара высокого, среднего и низкого давления в установленном в нем КУ за счет его тепла и удаления отработавших УГ в атмосферу.

В качестве критерия эффективности проверяемых мероприятий использовались суммарные потери полного давления от выхода из ГТУ (сечение 2) до входа в КУ (сечение 5). На основании численных расчетов и проведенных экспериментов наиболее перспективной оказалась модернизированная конструкция с изменением диффузорного участка.

Оценка эффективности мероприятий в части снижения потерь давления в ГВТ выполнена по измерению перепада давлений между сечением 2 и сечением 5. Восстановление статического давления $\Delta p_2 - \Delta p_5$ в модернизированном макете ГВТ относительно исходного составило 175 Па. Таким образом, ожидаемый эффект от введенных изменений составит около 150 Па. Как по расчету так и по эксперименту эффект от предлагаемых мероприятий положительный.

Результаты выполненной работы способны дать максимальный эффект при проектировании новых объектов энергетики, так как модернизация существующих в значительной мере ограничена необходимостью освобождения пространства, уже занятого оборудованием станции.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ И ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ

Минаков А.В.^{1,2}, Платонов Д.В.^{1,2}, Сентябов А.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

e-mail: platonov-08@yandex.ru

Вихревые течения широко распространены в технических системах и в природе, в которых проявляется множество интересных явлений. Важным примером является течение за рабочим колесом гидротурбины. В режиме неполной загрузки в турбинах Френсиса и Каплана за рабочим колесом в отводящем диффузорном канале, называемом отсасывающей трубой, образуется сильнозакрученное течение. Неустойчивость закрученного течения в отсасывающей трубе приводит к формированию прецессирующего вихревого ядра [1]. Вращение вихревого жгута в отсасывающей трубе гидротурбины генерирует интенсивные низкочастотные пульсации по всему проточному тракту турбины. Вихревой жгут становится нестабильным и время от времени разрушается.

Ввиду высокой сложности течения в проточном тракте ГЭС для экспериментальных исследований зачастую использовались модельные стенды, частично повторяющие проточный тракт гидротурбины. В работе [2] использовался стенд, который состоял из направляющего аппарата, вращающегося рабочего колеса и расположенного за ним конического диффузора, имитирующего начальный участок отсасывающей трубы. На данном стенде были получены различные режимы закрученного течения, включая прецессирующее вихревое ядро и двойной спиральный вихрь. В ходе экспериментов было также обнаружено явление перезамыкания прецессирующего вихревого ядра.

Для изучения особенностей закрученного течения в данном стенде было проведено численное моделирование турбулентного течения вязкой однофазной несжимаемой жидкости. На основании валидации для детальных исследований были выбраны модель LES и метод скользящих сеток. Результаты выбранной модели показали воспроизведение процесса перезамыкания вихревого ядра и совпадение с экспериментальными данными по средним и пульсационным компонентам скорости. Были проведены расчеты с различной закруткой потока. Как показывают экспериментальные и расчетные данные, перезамыкание ПВЯ (см. рис. 1) происходит на границе формирования зоны рециркуляции, между областью с малой закруткой потока и областью устойчивой прецессии вихревого ядра. В данной области закрутки зона рециркуляции гораздо уже, чем при устойчивом ПВЯ, а скорость возвратного течения мало отличается от нуля.

В ряде работ было показано взаимодействие прецессирующего вихревого ядра с поворотным коленом отсасывающей трубы гидротурбины [3]. В этом случае

теряется симметрия центральной зоны рециркуляции в среднем течении, а прецессирующий вихревой жгут проходит через существенно разные фазы вращения. Это существенно влияет на пульсации давления, расщепляя их на синхронную и асинхронную составляющие. При этом появляющиеся синхронные пульсации давления могут распространяться вдоль проточного тракта и складываться в существенные динамические нагрузки на конструктивные элементы ГЭС. Для исследования влияния геометрии выхода из проточного тракта, планируется проведение численного моделирования течения с добавленным поворотным коленом отсасывающей трубы в аналогичных режимах течения и сравнение поведения ПВЯ в зависимости от данных граничных условий.

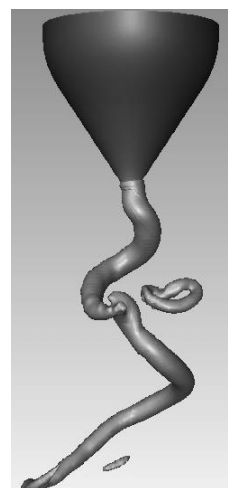


Рис. 1. Перезамыкание вихревого ядра, визуализация изоповерхностью давления.

Список литературы:

1. Nishi, M. Study on swirling flow and surge in an elbow type draft tube / M. Nishi, T. Kubota, S. Matsunaga, Y. Senoo // IAHR Section Hydraulic Machinery, Equipment, and Cavitation, (Tokyo). — 1980, Vol. 1. — pp. 557–568.
2. Skripkin S., Tsoy M., Shtork S., Hanjalić K. Comparative analysis of twin vortex ropes in laboratory models of two hydro-turbine draft-tubes. Journal of Hydraulic Research, Vol. 54, No 4, 2016, pp. 450–460. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2016.1168325>.
3. Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Минаков А.В., Численное исследование прецессии вихревого ядра в модельной гидротурбине с помощью гибридных методов расчёта турбулентных течений / Теплофизика и аэромеханика, 2014, т. 21, №6, с. 739–750.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ 21-19-00769

ВЫНОС ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДНА РЕКИ, НАКОПЛЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ СБРОСА ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПРОДУКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Паршакова Я.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

e-mail: parshakova@icmm.ru

Плотностные стратификационные эффекты, обусловленные неоднородностью распределения полей минерализации, играют существенную роль в формировании гидрологического и гидрохимического режима поверхностных водных объектов [1] и прилегающих к ним территорий [2]. Так при наличии концентрации тяжелого элемента, равной более, чем 1 промилле, в земных условиях характер поведения водного потока обусловлен наличием вертикальных стратификационных эффектов. Данные эффекты также играют важную роль в определении ассимилирующих эффектов в грунте, из которого состоит дно водных объектов [3]. Особенно остро данный вопрос стоит в районах максимально высокого сосредоточения крупнотоннажного промышленного производства солей [4]. Так это очень актуально в верховье реки Камы из-за проблемы утилизации высокоминерализованных рассолов [5]. В данном районе располагается одно из крупнейших в мире месторождений калийных и магниевых руд, при добыче которых производится обогащение в водной фазе (для растворения одной тонны руды требуется около трех кубометров воды). В связи с этим приобретает особую важность исследование поведения высокоминерализованных рассолов в поверхностных водных объектах. Характерной особенностью отводимых избыточных рассолов предприятий калийной промышленности является их значительная минерализация (~300 г/л) и, соответственно, высокая плотность (~1200 г/л). При регулируемом отведении химический состав отводимых стоков считается заданным, а нормируемой величиной является расход отводимых стоков в зависимости от гидрологического и гидрохимического режимов приемника сточных вод [6].

Традиционные подходы, рассматривающие максимальные концентрации загрязняющих веществ, ограничивающие водопользование в реках, только как следствие их распространения в свободном потоке, являются неполными. Необходим анализ аккумулярующих свойств речного дна, т.е. решение задачи о движении свободного потока над водоносным слоем пористой среды. В результате содержания «тяжелых» примесей может возникнуть очень резкое увеличение содержания загрязняющих ингредиентов в грунте речного дна вблизи мест сброса. Такие задачи остро встают при отведении избыточных высокоминерализованных рассолов в водные объекты в промышленных комплексах с «тяжелыми» сточными водами, в которых из-за значительных внутригодовых колебаний уровня воды и ледового режима, предпочтительным считается вариант с придонным отведением сточных вод. С помощью проведенного в настоящей работе численного моделирования получены данные о распределении концентрации загряз-

няющих веществ по глубине и в грунте дна реки в результате сброса «тяжелых» сточных вод. Значительная неоднородность распределения примеси наблюдается не только вблизи дна, но и в водоносном слое пористой среды, причем рассол распространяется в пористой среде вертикально вниз со скоростью, превосходящей скорость прокачки на три порядка. С течением времени ненулевая концентрация примеси наблюдается на большем расстоянии от источника, происходит накопление рассолов на дне реки. Проведенная оценка неоднородности распределения концентрации по глубине показала, что на малых расстояниях (порядка нескольких метров) от источника концентрация примеси на дне и в грунте дна превосходит значение концентрации вблизи поверхности в тысячи раз. Далее по течению реки происходит разбавление, причем значение концентрации на дне остается практически неизменным. Накопленные примеси в водоносном слое дна реки совершенно безопасны при малых и средних расходах, однако при увеличении интенсивности течения реки в период половодья, они становятся интенсивным источником загрязнения, существенно ограничивая режим водопользования. Таким образом, сброс отработанной воды с тяжелой примесью должен быть организован при соответствии объемов сброса сточных вод реальным расходам воды в водоприемнике и аккумуляющей способности речного дна.

Список литературы

1. Arle J., Wagner F. Effect of anthropogenic salinisation on the ecological status of macroinvertebrate assemblages in the Werra River (Thuringia, Germany) // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 701. P. 129–148. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1265-z>
2. Khayrulina E., Bogush A., Novoselova L., Mitrakova N. Properties of alluvial soils of taiga forest under anthropogenic salinization // *Forests*. 2021. Vol. 12. 321. <https://doi.org/10.3390/f12030321>
3. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Циберкин К.Б. Численное моделирование инфильтрации жидких отходов из хранилища в прилегающие грунтовые воды и поверхностные водоёмы // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2015. Т. 8. № 3. С. 310–318/ <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2015.8.3.26>
4. Baure M., Eichinger L., Elsass P., Kloppmann W., Wirsing G. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Rhine Graden // *Int. J. Earth Sci.* 2005. Vol. 94. P. 565–579. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0500-5>
5. Fetisova N.F., Fetisov V.V., Maio M.D., Zekster I.S. Groundwater vulnerability assessment based on calculation of chloride travel time through the unsaturated zone on the area of the Upper Kama potassium salt deposit // *Environ. Earth Sci.* 2016. Vol. 75. 681. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5496-6>
6. Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works // *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48. № 2. 390–397. <https://doi.org/10.1134/S1062739148020220>

*Работа поддержана РФФ
(проект № 20-11-20125).*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-ПИРОЛИЗА БИО-УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОКАЛОРИЙНОГО ГАЗА

Пономарев К.О., Табакаев Р.Б.

Тюменский государственный университет, Тюмень

e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru

Активное изучение биомассы в условиях пиролиза и газификации обусловлено тенденцией снижения негативного воздействия парниковых газов на климат нашей планеты (например, при увеличении доли возобновляемой энергетики). Но рост энергопотребления, вызванный ежегодным увеличением численности населения планеты и развитием технологий, указывает на то, что органические топлива, такие как уголь, еще довольно продолжительное время будут играть значительную роль в мировой энергетике [1]. Поэтому представляет интерес сочетание возобновляемых биоресурсов и угля – био-угольных топливных композиций. В работе представлен анализ продуктов термохимической переработки био-угольных топливных композиций в условиях СВЧ-переработки, являющейся малоизученной по сравнению с традиционной пиролитической переработкой (быстрый и медленный типы пиролиза).

В экспериментальных исследованиях использовались отходы от добычи угля и мукомольного производства (пшеничные отруби). Процесс изготовления пеллет из био-угольных топливных композиций подробно описан в [2].

При изучении свойств продуктов СВЧ-пиролиза использовался экспериментальный стенд, основными элементами которого являлись источник СВЧ-излучения, волновой тракт, беззеховая камера и газоанализатор. Изучаемый образец устанавливался в беззеховой камере. В условиях СВЧ-нагрева выделяющийся пиролизный газ проходил через систему очистки от смолы на вход газоанализатора.

На рисунке 1 представлена концентрация типичного газа (метана), получаемого при переработке исследуемых видов топлива.

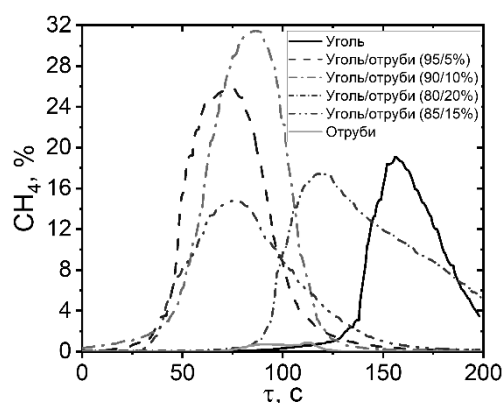


Рис. 1. Концентрация метана в составе газа СВЧ-пиролиза исследуемых топлив.

По результатам анализа состава газов установлено, что с увеличением доли биомассы (пшеничных отрубей) в составе био-угольных топливных композиций увеличивается выход «летучих» продуктов пиролиза.

При СВЧ-пиролизе био-угольных топливных композиций (с содержанием отрубей в смеси 90–95%) концентрация метана в составе газа увеличилась в 1,65–1,92 раза по сравнению с условиями выбора угля без добавок в качестве топлива. Такая же тенденция зарегистрирована по газам CO (увеличение в 1,86–2,36 раза) и H₂ (увеличение в 3,00–2,05 раза).

На рисунке 2 приведена концентрация CO₂ при традиционном (медленном) и СВЧ-пиролизе (на примере отрубей).

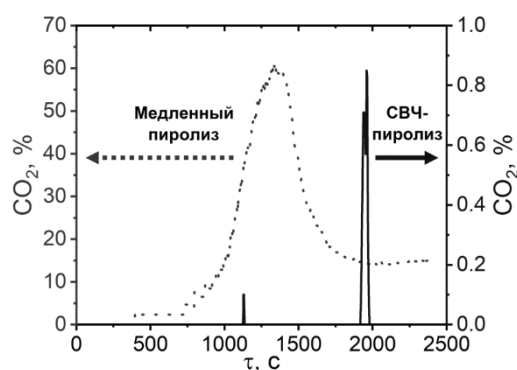


Рис. 2. Концентрация CO₂ при традиционном (медленном) и СВЧ-пиролизе (на примере отрубей).

Показано (рис. 2), что при традиционном пиролизе наблюдается высокая концентрация CO₂ (в определенный момент времени может достигать около 60%). Это указывает на большое количество балласта в газе и его низкой калорийности. При СВЧ-пиролизе концентрация CO₂ менее 1%.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что в процессе СВЧ-пиролиза угля и биомассы (пшеничных отрубей), а также био-угольных композиций на их основе практически не образуется углекислый газ (CO₂). Получаемый пиролизный газ состоит из метана (CH₄), водорода (H₂), монооксида углерода (CO) и практически не содержит балласта. В результате СВЧ-переработки био-угольных топливных композиций получен горючий газ с более высокой концентрацией горючих компонентов, чем при переработке исходных топлив (угля и пшеничных отрубей) по отдельности.

Список литературы:

1. Yankovsky S.A., Kuznetsov G.V., Misyukova A.D. Justification of reducing the yield of sulfur oxides in the pyrolysis of coals with the addition of logging waste // Solid Fuel Chem. 2022. V. 56, No. 1. P. 45–52.
2. Tabakaev R., Kahn V., Dubinin Y., Rudmin M., Yazykov N., Skugarov A., Alekseenko E., Zavorin A., Preis S. High-strength fuel pellets made of flour milling and coal slack wastes // Energy 2022. V. 243. P. 123071.

Исследования поддержаны РНФ (№ 22-19-00410)

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ БУРЫХ УГЛЕЙ И ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Скрипкина Т.С.¹, Бычков А.Л.^{1,2}, Ломовский О.И.¹, Ломовский И.О.¹

¹ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

² Управление научных исследований, Московский государственный университет пищевых производств, Москва

e-mail: skripkinats@solid.nsc.ru

Около 26% добываемого в России угля приходится на бурый уголь, при этом большая его доля не пригодна для использования в энергетике ввиду низкой теплотворной способности и склонности к самовозгоранию, например, при транспортировке на большие расстояния. Буроугольные отходы добычи энергетических углей являются подходящим сырьём для производства десятков продуктов на основе гуминовых веществ (сорбентов органических и неорганических загрязнений, мелиорантов почв, биологически активных добавок в животноводстве и др.), а также имеют потенциал для извлечения редкоземельных элементов. Перечисленные продукты обладают высокой добавленной стоимостью и вносят значительный вклад в экономику месторождения.

Механохимическая обработка угля используется в энергетике [1, 2], углехимии [3], фармацевтике [4] и сельском хозяйстве, включая производства кормовых добавок и стимуляторов роста растений [5]. Механохимические технологии соответствуют концепции зеленой химии благодаря высокой эффективности при уменьшенном количестве стадий, пониженной температуре и частичному или полному отказу от использования растворителей.

Механохимия угля включает реакции, происходящие во время или сразу после ударных, ударно-истирающих или истирающих воздействий, чаще всего реализуемых при помощи механоактиваторов (дезинтеграторов, мельниц, атриторов, экструдеров и др.) [6].

Известно, что интенсивное взаимодействие приводит к активации органического вещества угля, что существенно изменяет его физико-химические свойства. Механоактивированные угли характеризуются повышенной реакционной способностью при последующей обработке реагентов, что приводит к более высоким выходам и содержанию различных извлекаемых веществ, более высокой степени превращения органического вещества угля при термическом и сверхкритическом растворении, а также при гидрогенизации. Помимо измельчения, механоактивация угля сопровождается увеличением площади свободной поверхности, раскрытием пор и интенсивной электризацией, пропорциональной числу парамагнитных центров в угле.

Авторами был проведен цикл работ по механохимической модификации бурых углей и их отдельных компонентов с различными задачами: для получения сорбентов тяжелых металлов [7, 8], для производства мелиорантов почвы, для концентрирования редкоземельных элементов в растворимой фракции угля [9]. Продукты механохимической модификации углей были охарактеризованы при помощи ряда физико-химических методов: CHNO-анализа, обратного по-

тенциметрического титрования, ИК-спектроскопии, ЯМР-спектроскопии, ЭПР-спектроскопии, спектрофотометрии, термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и др. Проведены лабораторные и полевые испытания полученных сорбентов и мелиорантов.

Показано, что механохимическим окислением можно увеличить содержание карбоксильных и фенольных групп, экстрагируемых гуминовых кислот и их солей. Варьирование условий обработки позволяет контролировать пылеобразование и содержание парамагнитных центров при измельчении и механоактивации угля. Установлены основные условия, влияющие на энергоэффективность механохимического окисления угля в лабораторных активаторах планетарного типа и проточных виброцентробежных активаторов.

Показана возможность концентрирования редкоземельных элементов в органической части бурого угля. Для угля Азейского месторождения, характеризующегося суммарным содержанием РЗЭ, равным 970 г/т, по разработанному способу удается перевести 93% РЗЭ в фракцию гуминовых кислот этого же угля при исходном распределении РЗЭ между минеральной и гуминовой фракцией, равном 60/40.

Список литературы

1. Burdukov A. P., Butakov E. B., Kuznetsov A. V., Chernetskiy M.Y. Deactivation of mechanically activated micronized Coal // *Explos. Shock Waves*. 2018. V. 54. No. 1. P. 20–23.
2. Burdukov A. P., Butakov E. B., Chernova G. V. Ignition and Lighting of Coal-Fired Boilers with Mechanically Activated Micronized Coal instead of Fuel Oil // *J. Eng. Thermoph*. 2020. V. 29. No. 3. P. 492–502.
3. Baláz P., Dutková E. Fine milling in applied mechanochemistry // *Minerals Engineering*. 2020. V. 22. No. 7–8. P. 681–694.
4. Turčániová L. et al. Reactivity of mechanical activated coals for special utilization // *J. Materi. Sci*. 2004. V. 39. No. 16. P. 5467–5470.
5. Yudina N. V., Savel'eva A. V., Linkevich E. V. Changes in the Composition of Humic Acids with Mechanochemical Impact on Peat and Coa // *Solid Fuel Chem*. 2019. V. 53. No.1. P. 29–35.
6. Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., Skripkina T. (2020). Mechanochemical and size reduction machines for biorefining // *Molecules*. 2020. V. 25. No. 22. P. 5345.
7. Skripkina T., Bychkov A., Tikhova V., Smolyakov B., Lomovsky, O. Mechanochemically oxidized brown coal and the effect of its application in polluted water // *Env. Tech. Innov*. 2018. V. 11. P. 74–82.
8. Skripkina T. S., Bychkov A. L., Smolyakov B. S., Lomovsky, O.I. Changes in phytoplankton production after the introduction of heavy metals into ecosystem with subsequent cleaning by humic sorbent // *Wat. Res*. 2019. V. 46. No. 2. P. 242–248.
9. Skripkina T., Belokozenko M., Shatskaya S., Tikhova V., Lomovskiy, I. Concentrating rare earth elements in brown coal humic acids by mechanochemical treatment // *RSC Advances*. 2021. V. 11., No. 57. P. 36016–36022.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-73-00192).*

ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА СКОРЛУПЫ КЕДРОВЫХ ОРЕХОВ В ВЫСОКОПРОЧНОЕ БЕЗДЫМНОЕ ТОПЛИВО

Табакеев Р.Б.¹, Димитрюк И.Д.², Шаненков И.И.¹

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень

² Томский политехнический университет, Томск

e-mail: r.b.tabakaev@utmn.ru

Загрязнение окружающей среды является глобальной проблемой, характерной для многих регионов. В 2017 г. мировые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу составили 11,4 млн т SO_x, 25 млн т NO_x, 79 млн т CO, 98 млрд т CO₂ [1, 2]. Негативные последствия от загрязнения воздуха приводят к преждевременной смертности миллионов людей [3]. Одним из основных источников выбросов вредных веществ является энергетика, что ставит перед мировым научно-техническим сообществом задачу по снижению экологической нагрузки при энергообеспечении.

Кроме того, существует проблема накопления твердых биологических отходов, прямо и косвенно воздействующих на почву и атмосферу. Например, таким отходом, характерным для Сибирского региона, является скорлупа кедровых орехов, составляющей до 60% массы всего ореха, которого в среднем ежегодно заготавливается 10–12 млн т [4]. В связи с вышеизложенной целью настоящей работы является экспериментальное исследование получения бездымного топлива из скорлупы кедровых орехов.

В качестве объекта исследования рассмотрена скорлупа орехов кедрового (Pinus sibirica), при изучении характеристик которой установлено, что по величине зольности ($A^d=0,6$ мас. %) она относится к малозольным видам биомассы. Высокое содержание углерода ($C=51,89$ мас. %) и водорода ($H^d=6,15$ мас. %) в совокупности с низким значением зольности определяют достаточно высокую её теплотворную способность ($Q_i^t=18,8$ МДж/кг). Однако, содержащиеся в довольно большом количестве летучие вещества ($V^{daf}=77,2$ мас. %) указывают на термическую нестабильность скорлупы и являются предпосылкой к образованию смога при сжигании.

Анализируя характеристики скорлупы, можно прийти к выводу, что перспективным направлением её переработки является пиролиз с последующим формированием из образующегося углеродного остатка бездымного топлива. Используя дифференциально-термический анализ установлено, что термическую обработку скорлупы кедровых орехов необходимо проводить до температуры 600°C. Материальный баланс при этой температуре, определенный при помощи экспериментальной установки (ГОСТ 3168-93), показал, что выход углеродистого остатка составил 35,6 масс. %, смолы – 11,7 масс. %, пирогенетической воды – 34,7 масс. %, газа – 18,0 масс. %.

Полученный углеродный остаток представлен в виде порошка, поэтому для его эффективного энергетического использования требуется гранулирование в pellets (топливные гранулы), предназначенные для автоматизированных твердотопливных котлов.

Для формирования углеродного остатка в прочные гранулы, способные выдержать механические нагрузки при транспортировке, выгрузке и подаче в котел, рассмотрено органическое связующее – декстрин, растворенный в воде. Для изучения процесса гранулирования изготовлены лабораторная (поиск оптимальных параметров формования) и полупромышленная установки (рис. 1).

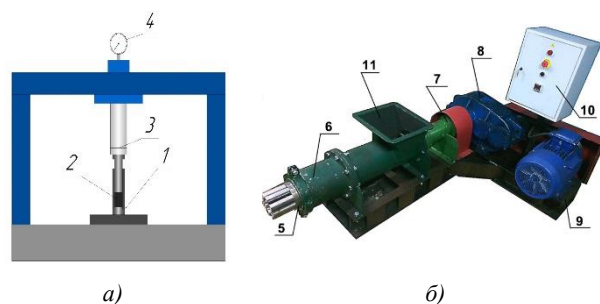


Рис. 1. Лабораторная база для исследования процесса гранулирования бездымного топлива из углеродистого остатка, полученного при пиролизе скорлупы кедровых орехов: а) – лабораторная установка, б) – полупромышленная установка производительностью 1 тонна в час; 1 – прессформа, 2 – углеродистый остаток со связующим, 3 – гидравлический пресс, 4 – манометр, 5 – фильтра, 6 – шнековый пресс, 7 – соединительная муфта, 8 – редуктор, 9 – электродвигатель, 10 – панель управления, 11 – приемный бункер.

При проведении экспериментальных исследований изучено влияние количества добавки связующего, давления прессования и температуры сушки pellets из углеродистого остатка, полученного при пиролизе скорлупы кедровых орехов, на их механическую прочность на истирание и сбрасывание (стандарт ISO 17831-1: 2015). Установлено, что оптимальными параметрами формования pellets являются: доля декстрина в составе связующего – 10–12 мас. %, доля связующего в формовочной смеси 30–40 мас. %, давление прессования 150 МПа, допустимая температура сушки не должна превышать 160°C.

Список литературы

1. IEA (International Energy Agency), 2019. CO2 Emissions from Fuel Combustion 201 – Highlights.
2. OECD Statistics, 2021. Emissions of Air Pollutants.
3. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution, Paris: International Energy Agency; 2016.
4. Оффан К.Б., Петров В.С., Ефремов А.А. Закономерности пиролиза скорлупы кедровых орехов с образованием древесного угля в интервале температур 200-500 °C // Химия растительного сырья. – 1999. – № 2. – С. 61–64.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (№ 22-19-00410)

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО РАСЧЕТНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЭЛОВ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

Усов Э.В., Мосунова Н.А., Бутов А.А., Климонов И.А., Сорокин А.А., Стрижов В.Ф.,
Цаун С.В., Чухно В.И.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Новосибирск

e-mail: usovev@gmail.com

Для расчета тяжелых аварий в реакторе с натриевым теплоносителем в Российской Федерации в рамках частного проекта “Коды нового поколения” проекта “ПРОРЫВ” разрабатывается интегральный код ЕВКЛИД/V2 [1]. Интегральный код позволяет рассчитывать основные процессы, сопровождающие тяжелые аварии в реакторной установке с натриевым теплоносителем: изменение мощности реактора, кипение теплоносителя и кризис кипения, плавление оболочки и топлива (для МОКС), а также диссоциацию топлива (для СНУП), движение и застывание образовавшегося расплава, изменение мощности реактора из-за кипения и плавления, формирование бассейна расплава, выход и перенос продуктов деления в реакторе и за его пределы.

Для моделирования процессов с разрушением твэлов во время тяжелой аварии в реакторе на быстрых нейтронах используется теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM [2], который моделирует процессы в одно- и двухфазном потоке теплоносителя в одномерном и трехмерном приближениях. Наряду с ним для расчетов напряженно-деформированного состояния используется также твэльный модуль БЕРКУТ [3]. Тяжелоаварийный модуль SAFR [4] применяется для моделирования термического разрушения тепловыделяющих элементов и ТВС. Тяжелоаварийный модуль включает в себя и модуль удержания расплава HEFEST-FR. Интегральный код ЕВКЛИД/V2 содержит также модуль AEROSOL-LM [5] для расчета переноса продуктов деления в реакторной установке и в помещениях станции. Основная причина тяжелой аварии в ядерных энергетических установках – нарушение баланса тепла в активной зоне. В следствии нарушения баланса может произойти расплавление оболочки твэла и топлива, что и является основной причиной повреждения активной зоны во время тяжелой аварии.

В современных реакторах на быстрых нейтронах рассматривается 2 типа топлива: оксидное и нитридное. Протекание аварии в реакторе с нитридным топливом отличается от аварии с оксидным топливом. В частности, наряду с плавлением должна учитываться и термическая диссоциация топлива [6], приводящая к выделению газообразного азота и образованию расплава металлического урана. Выделение азота в газообразной форме серьезно ухудшает последствия аварии из-за большого объема выделяющегося газа, переносащего по контуру реакторной установки радиоактивные продукты деления.

Интегральный код позволяет рассчитывать основные процессы, сопровождающие тяжелые аварии в реакторной установке с натриевым теплоносителем: изменение мощности реактора, кипение теплоноси-

теля и кризис кипения, плавление оболочки и топлива (для МОКС), а также диссоциацию топлива (для СНУП), движение и застывание образовавшегося расплава, изменение мощности реактора из-за кипения и плавления, формирование бассейна расплава, выход и перенос продуктов деления в реакторе и за его пределы.

Валидация моделей разрушения активной зоны интегрального кода ЕВКЛИД/V2 выполнена на базе большого числа экспериментов, в которых исследовались отдельные процессы, которые сопровождают подобного рода разрушения [7].

Список литературы

1. Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Жданов В.С., Прибатурин Н.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф. Моделирование плавления твэла быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 3. С. 123–126.
2. Alipchenkov V.M., Zeigarnik Y.A., Mosunova N.A., Strizhov V.F., Usov E.V., Anfimov A.M., Gorbunov V.S., Osipov S.L., Afremov D.A., Kudryavtsev A.V. Fundamentals, Current State of the Development of, and Prospects for Further Improvement of the New Generation Thermal Hydraulic Computational HYDRA-IBRAE/LM Code for Simulation of Fast Reactor Systems // Thermal Engineering, 2016. Vol. 63. #2. P. 130–139.
3. D. P. Veprev, A. V. Boldyrev, S. Y. Chernov, N. A. Mosunova Development and validation of the BERKUT fuel rod module of the EUCLID/V1 integrated computer code // Ann. Nucl. Energy, 2018. Vol. 113. P. 237–245.
4. E. V. Usov, A. A. Butov, V. I. Chukhno, I. A. Klimonov, I. G. Kudashov, V. S. Zhdanov, N. A. Pribaturin, N. A. Mosunova, V. F. Strizhov. Fuel Pin Melting in a Fast Reactor and Melt Solidification: Simulation Using the SAFR/V1 Module of the EVKLIID/V2 Integral Code // Atomic Energy, 2018. Vol.124. #3. P. 147–153.
5. Filippov M.F., Kolobaeva P.V., Sorokin A.A., Mosunova N.A. The modeling of the formation and transport of fission product aerosols in the first circuit of fast reactors in the AEROSOL/LM/Na module // Atomic Energy, 2018. Vol.124. #4. P. 266–271.
6. Usov E.V., Chukhno V.I., Kudashov I.G., Sycheva T.V. Model for the calculation of the dissociation rate of nitride fuel at high temperatures // High Temperature, 2020. Vol. 58. #2. P. 222–226.
7. A.A. Butov, I.A. Klimonov, I.G. Kudashov, V.I. Chukhno, T.V. Sycheva, E.V. Usov, N.A. Mosunov, and V. F. Strizhov Verification of the EUCLID/V2 Integrated Code Thermal-Hydraulic Module Based on Experiments That Take into Account the Parameter Distribution over the Fuel Assembly's Cross Section // Thermal Engineering, 2021, Vol. 68, No. 11, pp. 841–847.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта № Н.40.241.19.21.1068 от 14.04.2021 на выполнение научно-исследовательских работ «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2021-2023 годов.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ЮГЕ СИБИРИ

Хорева В.А., Елистратов С.Л.

Новосибирский государственный технический университет

e-mail: khorevavalentina@yandex.ru

Юг Сибири является перспективным регионом для использования солнечной энергии, так как число часов солнечного сияния здесь составляет 2100–2600 ч/год [1, 2]. Для обоснования эффективности использования солнечной энергии в данном регионе в работе рассчитана максимальная годовая экономия условного и первичного топлива, максимальные значения объема сухих продуктов сгорания, CO₂, SO₂, NO₂ и золы, которые не выбрасываются в год при использовании 1 м² эффективной поверхности солнечного коллектора, а так же, снижение углеродного следа. Расчет произведен для используемых на юге Сибири углей и газа. Юг Сибири находится в зоне холодного климата, что требует значительных затрат на горячее водоснабжение и отопление жилых и производственных помещений. С увеличением роста цен на энергоносители и в условиях холодного климата Западной Сибири проблема энергосбережения является весьма актуальной. Под югом Сибири подразумеваются территории Новосибирской области, республики Алтай и Алтайского края.

В Таблице 1 приведено максимальное количество условного и реального топлива, которое экономит потребитель, например, владелец частного дома за год, если использует солнечные водонагревательные коллекторы. Данные приведены на 1 м² эффективной площади солнечного коллектора.

Таблица 1. Максимальная годовая экономия ресурсов на юге Сибири на 1 м² солнечного водонагревающего коллектора.

Энергетический ресурс	Экономия ресурса
Условное топливо	265 кг
Кузнецкий уголь марки Д	338 кг
Кузнецкий уголь марки Г	297 кг
Кузнецкий уголь марки 1СС	326 кг
Кузнецкий уголь марки 2СС	316 кг
Кузнецкий уголь марки Ж	370 кг
Экибастузский уголь СС	463 кг
Беловский уголь, антрацит	286 кг
Листвянские шахты, антрацит	223 кг
Нерюнгринский газ	175 м ³
Тюменский газ	217 м ³
Уренгойский газ	220 м ³
Ямбургский газ	219 м ³

В Таблице 2 приведена экологическая эффективность использования солнечных коллекторов на юге Сибири. В таблице указано максимально возможное сокращение объема сухих продуктов сгорания (V₀) и золы на 1 м² эффективной поверхности солнечного коллектора.

Таблица 2. Максимально возможное сокращение выбросов на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора.

Тип топлива	V ₀ , м ³ /м ²	Зола, кг/м ²
Кузнецкий уголь марки Д	1997,399	44,84
Кузнецкий уголь марки Г	1987,243	32,64
Кузнецкий уголь марки 1СС	1913,84	42,96
Кузнецкий уголь марки 2СС	1997,435	57,403
Кузнецкий уголь марки Ж	1980,572	113,68
Экибастузский уголь СС	2000,88	176,35
Беловский уголь, антрацит	2480,055	1,71
Листвянские шахты, антрацит	1951,73	1,115
Нерюнгринский газ	1469,07	-
Тюменский газ	1849,69	-
Уренгойский газ	1871,54	-
Ямбургский газ	1867,82	-

В Таблице 3 приведены максимальные значения снижения углеродного следа на юге Сибири на 1 м² эффективной поверхности солнечного водонагревательного коллектора. Данные по углеродному следу от добычи газ и угля шахтным и открытым способом взяты из [3], [4], [5]. Таблица 3 показывает снижение экологических издержек, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой ископаемого топлива.

Таблица 3. Максимальные значения снижения углеродного следа на юге Сибири на 1 м² эффективной поверхности солнечного водонагревательного коллектора.

Энергетический ресурс	Углеродный след, кг
Кузнецкий уголь марки Д	35,33
Кузнецкий уголь марки Г	30,85
Кузнецкий уголь марки 1СС	33,85
Кузнецкий уголь марки 2СС	32,81
Кузнецкий уголь марки Ж	38,51
Экибастузский уголь СС	48,14
Беловский уголь, антрацит	29,69
Листвянские шахты, антрацит	23,19
Нерюнгринский газ	17,93
Тюменский газ	22,52
Уренгойский газ	22,86
Ямбургский газ	22,82

Список литературы

- СП 131.13330.2020. Строительная климатология.
- Книга о солнце. Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Viessmann 2010. 194 с.
- Отчет АО «Институт ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» 2020 год.
- Отчет Black Coal Corp. Comparative Carbon Footprint Met Coke vs. Anthracite 2020 год.
- Экологический отчет «СибАнтрацит» 2021 год.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОАКТИВНЫЙ ГРАФИТ-АЗОТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Шавалеев М.Р., Барбин Н.М., Терентьев Д.И.

Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург

E-mail: marat-shavaleev@mail.ru

В настоящее время на 11 АЭС России эксплуатируются 37 энергоблоков суммарной установленной мощностью свыше 29,5 ГВт, включая: 22 энергоблока с реакторами типа ВВЭР; 11 энергоблоков с канальными реакторами; 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением; 2 реакторные установки типа КЛТ-40С электрической мощностью по 35 МВт в составе плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС).

Доля выработки электроэнергии атомными станциями в России составляет около 20% от всего производимого электричества. При этом в Европейской части страны доля атомной энергетики достигает 30%, а на Северо-Западе – 37% [1].

Одной из ключевых экологических и экономических проблем, которая снижает рентабельность АЭС, является обращение с образующимися радиоактивными отходами.

Графит используемый в реакторах в качестве конструктивного элемента является одним из видов твердых радиоактивных отходов, который за время эксплуатации накапливает в себе радионуклиды. Окончательного решения проблемы по обращению с радиоактивным графитом на сегодняшний день нет. Осложняется это наличием в составе графитовых элементов различных долгоживущих радионуклидов, в том числе и изотопа ^{14}C , который проблематично отделить от ^{12}C [2].

Авторами [3], на основе полученных результатов компьютерного термодинамического моделирования, был предложен способ переработки реакторного графита в атмосфере азота, который основан на создании условий, при которых радионуклиды, переходят в газообразное состояние и отделяются от графита.

С целью повышения эффективности переработки реакторного графита данным способом были проведены и дополнены термодинамические расчеты при вакуумметрическом давлении 0,1 атм.

На рис. 1 представлено изменение удельной энтропии системы реакторный графит-азот при различных давлениях.

График показывает, что при вакуумметрическом давлении до достижения температуры 2973 К наблюдается равномерный рост с 0,178 до 0,247 кДж/К×моль. В интервале температур от 2973 до

3273 К сопровождается скачкообразным возрастанием удельной энтропии до 0,302 кДж/К×моль, что обусловлено переходом углерода в газообразную фазу. При температурах от 3273 до 4273 К удельная энтропия продолжает, практически линейно, возрастать.

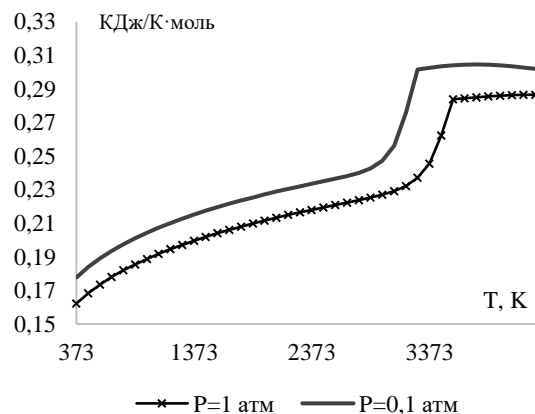


Рис. 1. Изменение удельной энтропии системы реакторный графит-азот при различных давлениях.

Кривая линии для атмосферного давления имеет схожее поведение. При нагреве от 373 до 3073 К происходит увеличение удельной энтропии системы с 0,17 до 0,26 кДж/К×моль. При достижении температуры 3073 и до 3473 К наблюдается резкое увеличение (до 0,292 кДж/К×моль), вызванное переходом углерода в газообразную фазу.

Таким образом, вакуумметрическое давление позволяет перевести часть радионуклидов при более низких температурах, что позволяет осуществлять переработку радиоактивного графита при более низких температурных интервалах.

Список литературы

1. Росатом // [Электронный ресурс]. – <https://www.rosatom.ru/production/generation/> (дата обращения 01.03.2022).
2. Скачек М.А. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС / М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 448 с.
3. Способ переработки беспламенным горением отходов реакторного графита/ Н. М. Барбин, М. П. Дальков, М. Р. Шавалеев; пат. РФ №2644589; заявл. 25.10.2015 : опубл. 13.02.2018, Бюл. № 16. 7 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР СОПЛОВЫХ ВВОДОВ ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОГО ПРЕДТОПКА

Штым К.А., Соловьёва Т.А.

ДВФУ, 690091, Россия, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Усовершенствованием конструкции циклонно-вихревого предтопка (ЦВП) для организации предварительного смесеобразования топлива и воздуха занимаются сотрудники Департамента энергетических систем ДВФУ с середины 70-х годов XX века [1]. На Дальнем Востоке более 60 единиц котельных агрегатов модернизированы на циклонно-вихревую технологию сжигания мазута и газа.

Для исследований параметров закрученного в ЦВП потока подготовлен водогрейный котёл КВГМ 116,3-150 МЦ Владивостокской ТЭЦ 1, оснащенный двумя газо-мазутными ЦВП встречной компоновки мощностью 65 МВт каждый, конструкция которого показана на рис. 1. Исследования аэродинамических [2, 3], экологических [4] и температурных [5, 6] характеристик потока дополнились исследованиями изменения температур в сопловых вводах.

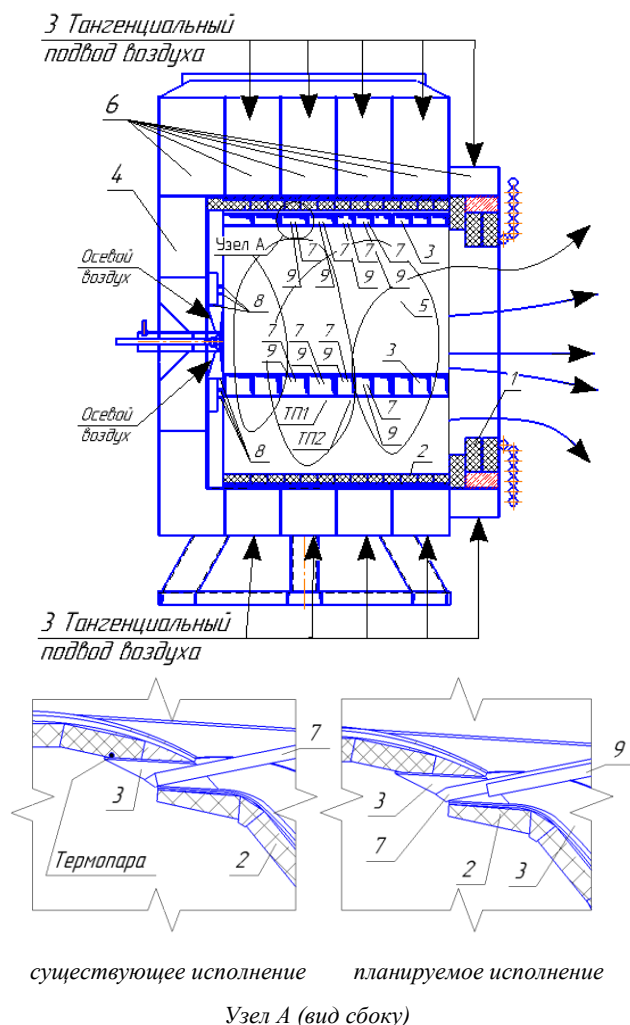


Рис. 1. Конструкция газо-мазутного ЦВП мощностью 65 МВт: 1 – пережим; 2 – обмуровка; 3 – тангенциальный подвод воздуха; 4 – торцевая вихревая камера; 5 – камера сгорания; 6 – воздушные обечайки; 7 – тангенциальные газовые сопла; 8 – аксиальные, торцевые газовые сопла; 9 – второй ряд тангенциальных газовых сопел.

Детальные исследования изменения температур выполнялись на расстоянии 10 мм от металла сопловых вводов воздуха и газа ЦВП для чего в обмуровку возле сопла вмонтированы термопары, расположение которых показано на рис. 1. Исследования проводились в диапазоне нагрузок на котле от 68 до 92 Гкал/ч, результаты представлены в табл.

Таблица 1.

Нагрузка, Гкал/ч	Температура, °С		Длительность нагрузки, ч
	Термопара ТП1	Термопара ТП2	
92	314	171	12
82	338	185	14
75	380	209	2

По результатам исследований отмечается повышение температуры в футеровке сопловых вводов с понижением нагрузки на котле, что согласуется с изменением температуры ядра факела в предтопке [2]. С повышением нагрузки заполненность факелом камеры сгорания (КС) ЦВП уменьшается и температура на сопловых вводах снижается. Ввод газа через второй ряд тангенциальных газовых сопел (поз. 9, см. рис. 1) позволит заполнить объём КС ЦВП до 80%. Работа дополнительных газовых сопел рекомендуется при нагрузках котла более 70% от номинальной (100 Гкал/ч). Стенка обмуровки ЦВП, на нагрузках более 70% от номинальной не превышает 650°С, а при нагрузке котла менее 70% от номинальной температуры стенки обмуровки повышается до 670°С [7], что подтверждает надежность работы ЦВП.

Список литературы

- Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками // Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та, 2012. – 421 с.
- Соловьёва Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками: дис. канд. техн. наук: Красноярск, 2017. – 149 с.
- Штым К.А., Соловьёва Т. А., Лесных А. В., Гончаренко Ю. Б. Особенности формирования приосевой области в циклонно-вихревом предтопке с комбинированной генерацией закрученного потока // III Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых. Ялта, Россия, 2018.
- Лесных А. В., Штым К. А., Соловьёва Т. А. Методы снижения эмиссии оксидов азота NO_x при циклонно-вихревом сжигании топлив // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов «Экология энергетики — 2017». Москва, Россия, 2017.
- Штым К.А., Соловьёва Т. А., Кулик А.В. Исследование распределения температурных полей в циклонном предтопке // IV Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых. Ялта, Россия, 2019.
- Штым К.А., Дорогов Е. Ю., Соловьёва Т. А., Кулик А.В. Исследование теплообмена в циклонном предтопке // VII Всероссийская конференция с международным участием "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". Рыбинск, Россия, 2019.
- Kulik A.V., Dorogov E. Y., Solovyova T. A., Shtym K. A. Experimental study of temperature distribution in a cyclone-vortex furnace // Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies. 2021. Vol.14 (1) P. 140–145.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛА И ЗАЖИГАНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ В СМЕСИ С КАМЕННЫМ УГЛЕМ

Янковский С.А.^{1,2}, Кузнецов Г.В.¹, Янковская Н.С.¹, Мисюкова А.Д.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

e-mail: jankovsky@tpu.ru

Несмотря на многочисленные попытки Европейских государств полностью перейти на возобновляемые источники энергии, в последние несколько десятков лет не привели к желаемой цели. Погодные аномалии, происходящие по всей Европе, показали, что уголь был, есть и будет самым доступным и дешевым энергетическим топливом для ТЭС. В последние два года потребность в использовании угля как основного вида топлива на ТЭС снова увеличивается в мировом энергетическом балансе [1]. Однако, при сжигании любой марки углей возникают существенные проблемы с выбросами антропогенных газов и летучей золы. Снижение уровня загрязнения окружающей среды угольными ТЭС является одной из главных задач ученых и энергетиков по всему миру.

Одним из решений проблемы с антропогенными выбросами может стать применение продуктов переработки деловой древесины в смеси с углем [2]. Применение био-угольных смесевых топлив позволит решить две экологические проблемы – утилизация отходов и снижение загрязнения окружающей среды угольными ТЭС, так как продукты лесопиления (древесина) являются углерод-нейтральной добавкой к углю, с точки зрения выбросов снижения углеродного следа. В мировой практике совместное сжигание смесевых топлив в пылевидном состоянии не распространено, существует ряд нерешенных задач по процессам топливоприготовления и распыления таких топлив в топках энергетических котлов.

Доля котлоагрегатов с пылевидным сжиганием топлива на ТЭС России составляет 26% от всех существующих угольных электростанций. Вопросы практического применения данных исследований не вызывает сомнений.

Целью работы являются экспериментальные исследования влияния доли древесной компоненты в смеси с углем на характеристики процесса распыла таких топлив.

Подготовка топливных смесей проводилась следующим образом. Уголь на первой стадии подготовки размалывался до порошкообразного состояния. Угольная пыль после размола просеивалась через сито с размером ячеек менее 80 мкм. Отходы лесопиления предварительно были очищены от древесной коры и веток, далее просеивались через сито с размером ячеек менее 200 мкм. После измельчения уголь и древесная биомасса смешивались в соотношении компонент уголь/древесина 90/10%; 75/25%.

Для проведения исследований был использован стенд, позволяющий моделировать топку котлоагрегата с системой распыла сухих смесевых топлив в широком диапазоне давлений. В настоящей работе исследования проводились при давлении воздуха 1 бар. Размеры исследуемого участка составили:

0,1 м в продольном направлении струи и 0,05 м перпендикулярно оси струи. Время эксперимента для каждой смеси составляло 100–110 секунд. На рис.1 приведены типичные изображения угла раскрытия распыла однородного угля и смесевых топлив с увеличением доли древесины до 25 % в топливной смеси.

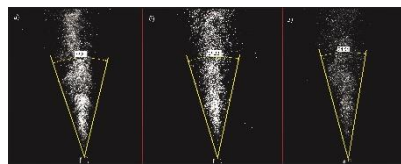


Рис.1. Изменение угла раскрытия факела диспергированных топлив на основе угля и древесины с увеличением доли последней в смеси до 25% при постоянном давлении: а) 100% уголь, б) 90% уголь/10% древесина, в) 75% уголь/25% древесина.

Результаты экспериментов показали, что при постоянном давлении и увеличении доли древесной компоненты в угле изменяется угол раскрытия факела. Угол раскрытия струи факела при соотношении компонент уголь/древесина 90/10% уменьшается менее чем на 10,5% по сравнению с углом распыла однородного угля, а при соотношении компонент 75/25% уменьшается менее чем на 25% соответственно.

Известно, что при распылении пылевидных однородных топлив уменьшение угла раскрытия струи факела приводит к неравномерному распределению топлива по топке, а значит образованию зон местного недостатка кислорода и, следовательно, наименее эффективному сжиганию. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования с целью определения эффективного давления подачи потока воздуха в топливную смесь, при котором угол раскрытия струи факела с увеличением доли древесной компоненты в смеси до 50% увеличится, либо будет соответствовать углу раскрытия факела при распылении однородного угля.

Список литературы

1. Oil | ExxonMobil [Electronic resource]. URL: <https://corporate.exxonmobil.com/Operations/Oil> (accessed: 11.05.2021).
2. Kuznetsov G.V. et al. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood // Energy. 2020. Vol. 194.
3. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // Energy. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 230.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках дополнительного соглашения № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания и оказания государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3)

Содержание

Пленарные лекции

Исаев С.А. Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-технических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами	5
Кудияров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Пушилина Н.С. Оптимизация металлгидридных систем хранения водорода с применением методов цифрового моделирования и 3D прототипирования	6
Кузнецов В.В. Теплофизические и физико-химические основы получения водорода для компактных энергетических систем низкоуглеродной экономики	7
Мильман О.О. Теплофизические и термодинамические аспекты использования метано-водородного и водородного топлива на тепловых электростанциях	8
Рига В.Ю., Турунтаев С.Б. Сейсмичность при воздействии на пласт	9
Фомин П.А., Николаев Ю.А. Природа тунгусского взрыва	10

Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И. Влияние числа Рейнольдса и глубины сот на турбулентный теплообмен в плоском канале с сотовой поверхностью	13
Белавина Е.А., Пятницкая Н.Ю. Теплофизические особенности имитаторов расплава солей в условиях, приближенных к реакторным установкам IV поколения	14
Вертгейм И.И., Сагитов Р.В., Шарифуллин А.Н., Закс М.А. Бифуркации, нелинейные режимы и лагранжева динамика двумерных двоякопериодических течений	15
Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Параметрическая резонансная конвекция во вращающемся цилиндрическом слое жидкости	16
Горбачев М.В., Карасев Д.П., Наумкин В.С. Моделирование тепловой нагрузки керамического зеркала оптической аппаратуры источника синхротронного излучения	17
Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Шакиров Р.Р. Теплоотдача и структура потока в плоском безотрывном диффузоре	18
Дееб Равад (Сирия), Сиденков Д.В. Повышение эффективности пучков каплевидных труб за счет управления углом атаки	19
Добросельский К.Г. Влияние числа Рейнольдса на ближний след гидрофобного круглого цилиндра в критической области обтекания	20
Евграфова А.В., Сухановский А.Н. Влияние внешнего обдува на процесс остывания модели города	21
Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С. Экспериментальное исследование энергоразделения при поперечном обтекании пары круговых цилиндров воздушным потоком	22
Иващенко В.А., Токарев М.П., Мулладжанов Р.И. Прямой численный расчет модельных сборок ТВЭЛов	23
Киреев В.Н., Низамова А.Д., Урманчиев С.Ф. Устойчивость течения жидкости с температурной зависимостью вязкости в кольцевом канале	24
Козлов В.Г., Вяткин А.А., Рысин К.Ю. Вибрационная тепловая конвекция во вращающихся системах	25
Кундашкин А.Д., Палкин Е.В., Хребтов М.Ю., Мулладжанов Р.И. Моделирование турбулентного газового кольцевого горения методом крупных вихрей и флеймлетов	26
Лаптева Е.А., Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Массообменные характеристики насадочной колонны с интенсификаторами	27
Локтионов В.Д., Мухтаров Э.С. Определение обобщенных характеристик теплообмена на граничных поверхностях металлического слоя расплава, подогреваемого снизу, применительно к проблеме удержания расплава материалов активной зоны ядерного реактора при тяжелой аварии в ЯЭУ	28
Лукьянов А.А., Зарипов Д.И. Исследование явления локального мгновенного отрыва потока в дозвуковом конфузоре при малом числе Рейнольдса	29
Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Дектерев Д.А., Лобасов А.С., Дектерев Ар.А. Расчетно-экспериментальное исследование обтекания двух моделей, имитирующих здания разной высоты	30
Михеев А.Н. Влияние динамического воздействия на характеристики турбулентного потока	31
Молочников В.М., Михеев Н.И., Михеев А.Н., Мазо А.Б., Калинин Е.И., Клюев М.А. Течение в области разветвления каналов, моделирующей проксимальный конец анастомоза	32
Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Скрипкин С.Г. Экспериментальное исследование формирования вихревой структуры в газо-вихревом биореакторе	33
Немировский С.К. Хаотические квантовые вихри в сверхтекучем гелии. Статистическая сумма	34
Палкин Е.В., Хребтов М.Ю., Мулладжанов Р.И. Исследование когерентных структур в закрученном потоке за модельной гидротурбиной Фрэнсиса	35
Сахнов А.Ю. Локальная ламинаризация в ускоренном пристенном течении	36
Скрипкин С.Г., Шторк С.И. Об особенностях двухспирального распада вихря в тангенциальной вихревой камере	37

Сорокин М.И., Лебедев А.С., Токарев М.П., Дулин В.М. Управление потоком за цилиндром с использованием пульсирующей струи.....	38
Строева П.С., Ничик М.Ю., Токарев М.П., Дулин В.М. Теплообмен в импактной затопленной струе в условиях внешнего возмущения двух гармоник.....	39
Субботин С.В., Шамакова Н.Д., Ерманик Е.В., Козлов В.Г. Сдвиговая неустойчивость и триадные резонансы во вращающейся сферической полости с колеблющимся ядром.....	40
Суслов Д.А., Литвинов И. В., Цой М. А., Гореликов Е. Ю. Активное управление вихревыми структурами в аэродинамической модели гидротурбины Френсиса.....	41
Федюшкин А.И. Гидродинамика и теплоперенос при росте кристаллов методом зонной плавки.....	42
Филиппов М.В., Назаров Н.А., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И. Исследование аэродинамики и теплообмена кольцевой закрученной импактной струи.....	43
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И., Ян Лун Н. Экспериментальное исследование влияния геометрических характеристик на режимы течения и теплообмен в кольцевой импактной струе.....	44
Хазов Д.Е. Численное исследование влияния закона расходного воздействия на характеристики процесса энергоразделения при течении газа в канале с проницаемыми стенками.....	45
Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорных и конфузорных каналах.....	46
Шестаков М.В., Маркович Д.М. Трехмерная вихревая структура сдвиговых течений в щелевых каналах.....	47
Шестаков М.В., Маркович Д.М. Экспериментальное исследование динамики вихревых структур, генерируемых струйным осциллятором в щелевом канале.....	48
Ширяева М.А., Субботин С.В. Экспериментальное исследование линейных и нелинейных режимов аттракторов инерционных волн во вращающемся неосесимметричном цилиндре.....	49
Ян Лун Н., Чохар И.А., Терехов В.И. Экспериментальное исследование структуры течения в плоском канале с одиночной овально-траншейной лункой.....	50
Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах	
Абдуллин Р.Ф., Мельник О.Э., Головин С.В., Льготина Е.В. Модель динамики роста магматической дайки.....	53
Адамова Т.П., Левин А.А., Чернов А.А. Исследование роста и последующего коллапса парового пузырька, образованного в результате воздействия на недогретую жидкость лазерного излучения.....	54
Антонов А.Н., Шелухин В.В. Течение суспензий в каналах с разветвлениями.....	55
Апостол Ю.С. Численное исследование течения турбулентного газового потока над волнистой пленкой жидкости.....	56
Архипов В.А., Матвиенко О.В., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Математическое моделирование динамики орошения поверхности при гравитационном осаждении жидко-капельного аэрозоля.....	57
Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Экспериментальное исследование динамики осаждения жидко-капельного аэрозольного облака.....	58
Бирюков Д.А., Перетягко В.В. Экспериментальное определение скорости в кавитирующей струе.....	59
Валиуллина В.И., Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р., Ковалева Л.А. Исследование динамики расслоения микроэмульсии в условиях тепловой конвекции.....	60
Владыко И.В., Сердюков В.С., Суртаев А.С. Использование прозрачной импактной поверхности для исследования гидродинамических и тепловых характеристик спреинового орошения.....	61
Власова О.А. Подъемная сила, действующая на сферу вблизи осциллирующей стенки.....	62
Вожаков И.С., Пешенюк Ю.А. Двухфазный тепломассообмен в капиллярной трубке.....	63
Воробьев М.А., Кашинский О.Н. Визуализация межфазного массообмена при всплытии одиночного пузырька.....	64
Воробьев М.А., Кашинский О.Н. Особенности движения опускающего пузырькового течения при малых скоростях жидкой фазы.....	65
Гогонин И.И. Достоинства тонкопленочных парогенераторов бинарных геотермальных электростанций.....	66
Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Регулярное отражение ударной волны от стенки в газокapпельном потоке с учетом фазовых переходов.....	67
Горбачев М.В., Макаров М.С., Терехов В.И., Сюзаев А.И. Экспериментальное исследование процесса испарения водо-спиртовых смесей на модифицированных и капиллярно-пористых поверхностях.....	68
Гореликова А.Е., Рандин В.В., Чинак А.В. Влияние угла наклона на скорость и диаметр газовых пузырей от одиночного капилляра в наклонной трубке.....	69
Гурин А.М., Скопинцев А.М. Особенности метода фазового поля, связанные с шириной межфазной границы.....	70
Дьякова В.В., Полежаев Д.А. Экспериментальное изучение устойчивости межфазной границы в горизонтальном вращающемся цилиндре с жидкостью и сыпучей средой.....	71
Евграфова А.В., Марышев Б.С. Транспорт примеси в пористой среде при пульсационном внешнем воздействии.....	72

Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С. Исследование распыла перегретой воды через расширяющееся сопло	73
Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С. Сравнение моделей гетерогенной нуклеации при вскипании перегретой воды в конфузorno-диффузornoм сопле.....	74
Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Виноградов Ю.А., Попович С.С. Влияние конденсации паров воды при расширении потока влажного воздуха в сверхзвуковом сопле на адиабатную температуру стенки.....	75
Иващенко Е.И., Иващенко В.А., Плохих И.А., Мулляджанов Р.И. Оптимизация геометрии гидравлического оборудования при помощи машинного обучения с целью подавления кавитации	76
Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б., Губин В.Е. Распыл водоугольных суспензий на основе угольных отходов и негорючих жидкофазных продуктов пиролиза.....	78
Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. Внутренняя конвекция в мультислойной тепловыделяющей пористой среде с тонкими прослойками воздуха	79
Лукьянов Ан.А., Роньшин Ф.В., Вожаков И.С. Исследование пузырей Тейлора в квадратном миниканале	80
Марышев Б.С., Клименко Л.С. Устойчивость однородного горизонтального выноса примеси пульсационным потоком из замкнутой области пористой среды с учетом влияния гравитации	81
Огородников И.А. Неупругое столкновение резонансных солитонов в пузырьковой среде	82
Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Гришаев Д.А., Кулагин В.А. Определение режимов работы и производительности кавитационного конденсатора	83
Роменский Е.И., Решетова Г.В., Пешков И.М. Гиперболическая термодинамически согласованная модель волновых процессов в деформируемой пористой среде насыщенной многофазной жидкостью	84
Рютин С.Б., Игольников А.А., Мелких А.В. Экспериментальное исследование высокоинтенсивного теплообмена в жидких средах, находящихся в неустойчивых состояниях	85
Сагитов Р.В., Колчанова Е.А. Конвекция в двухслойной воздушно-пористой системе с проницаемыми границами и внутренним источником тепла, зависящим от объемной доли твердой фазы	86
Сидоров А.С., Колчанов Н.В. Объемная мощность внутреннего тепловыделения искусственной волокнистой пористой среды	87
Субботин С.В., Карпунин И.Э., Козлов В.Г. Экспериментальное исследование устойчивости осциллирующей границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в конической ячейке хеле-шоу.....	88
Сургаев А.С., Сердюков В.С., Малахов И.П., Старинский С.В., Сафонов А.И., Kosar A. Управление характеристиками смачивания поверхности для интенсификации теплообмена и повышения КПД при кипении жидкости.....	89
Егоров Р.И., Зайцев А.С. Конвекция в тонком слое жидкости при точечном нагреве	90
Федосеев А.В., Сальников М.В., Остапченко А.Е. Моделирование динамики всплытия одиночного пузыря методом решеточных уравнений Больцмана.....	91
Федюшкин А.И., Рожков А.Н., Руденко А.О., Гневушев А.А. Течение капли через отверстие	92
Хабин М.Р., Марышев Б.С. Возникновение концентрационной конвекции в длинной прямоугольной области пористой среды	93
Чиннов Е.А. Витание и взаимодействие струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости.....	94
Чупров П.А. Численное исследование процесса прохождения ударной волны над плотным слоем частиц в рамках двухжидкостной модели	95
Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Ковалева Л.А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин.....	96
Фазовые переходы	
Белослудов В.Р., Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю. Теоретическое исследование ранних этапов образования гидрата метана	99
Блябляс А.Н., Вершинин С.А., Голованов Д.А. Особенности фазовых переходов углекислого газа при реализации проектов по декарбонизации крупнейших эмитентов Российской Федерации	100
Божко Ю.Ю., Жданов Р.К., Гец К.В., Субботин О.С., Белослудов В.Р. Роль наночастиц SiO ₂ в формировании гидратных фаз в присутствии CH ₄ /CO ₂	101
Божко Ю.Ю., Жданов Р.К., Гец К.В., Белослудов В.Р. Влияние молекул фреона/ГНФ на процессы образования смешанных клатратных гидратов в присутствии NaCl	102
Брюханов В.М., Байдаков В.Г., Проценко С.П. Зародышеобразование в растянутых Леннард-Джонсовских смесях.....	103
Виноградов Д.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Тепляков И.О., Юдин С.М. Исследование некоторых особенностей безтигельного индукционного плавления металлических тел	104
Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р. Теоретическое исследование влияния гидратной затравки на процесс образования гидрата при опреснении морской воды.....	105
Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р. Расчёт кривой плавления гидрата CO ₂ методом решёточной динамики с различными моделями молекул H ₂ O и CO ₂	106
Губанова Т.А., Забиров А.Р., Ягов В.В. Влияние расстояния от сопла до поверхности на теплообмен при кипении в условиях вынужденного течения жидкости.....	107

Давыдов М.Н., Чернов А.А., Пильник А.А. Механизм роста газового пузырька в магматическом расплаве при его декомпрессии с конечной скоростью	108
Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р. Исследование кинетики образования гидратов метан + пропан методами молекулярной динамики	109
Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р. Теоретическое исследование образования гидратов из неравновесного раствора углекислого газа в воде	110
Зайцев Д.В., Белослудцев В.В. Кипение в плоских мини- и микроканалах с неоднородным нагревом	111
Конобеева Н.Н., Трофимов Р.Р., Белоненко М.Б. Влияние накачки на предельно короткие импульсы в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками и скалярным параметром порядка	112
Левин А.А., Сафаров А.С., Чернов А.А. Моделирование эволюции паровой фазы в результате нагрева жидкости лазерным излучением	113
Мацкевич Н.И., Чернов А.А. Твердотельные калориметры, моделированные в форме шара: тепловой эквивалент, повышение прецизионности	114
Мацкевич Н.И., Чернов А.А., Трифонов В.А., Семерикова А.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В., Шлегель В.Н., Лукьянова С.А., Кузнецов В.А. Теплоемкость и энергетические характеристики кристаллов на основе молибдатов цезия и лития	115
Молотова И.А., Забиров А.Р., Ягов В.В., Виноградов М.М., Молотов И.М. Исследование закономерностей охлаждения высокотемпературных металлических образцов, моделирующих толерантное топливо АЭС	116
Морской Д.Н., Кукшинов Н.В., Хлопов А.Д., Французов М.С., Чирков А.Ю. Влияние угла наклона поверхности теплообмена на теплоотдачу при конденсации	117
Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Терехов В.В., Старинский С.В. Динамика испарения капли наножидкости с бифильной поверхности	118
Стерлягов А.Н., Низовцев М.И. Исследование испарения капель наножидкости на поверхностях материалов с разной теплопроводностью	119
Чеверда В.В., Сомванши П.М. Теплообмен при слиянии двух капель жидкости на нагреваемой фольге	120
Чернов А.А., Пильник А.А. Аналитическое решение задачи о неизотермическом десорбционном росте газового пузырька в пересыщенном растворе	121
Шамирзаев А.С., Мордовской А.С., Кузнецов В.В. Экспериментальное исследование охлаждения теплонапряженной мишени системой затопленных микроструй диэлектрической жидкости	122
Юнусов И.О., Поликарпов А.Ф. Исследование влияния толщины слоя жидкости на процесс испарения методом молекулярной динамики	123
Научные основы нефтегазовых технологий	
Авдонин А.С. Моделирование закачки нефти в цифровую модель ядра с помощью морфологического подхода	127
Базыров И.Ш., Калинин С.А. Подходы к моделированию «АВТОГРП» и направления их развития	128
Байкин А.Н., Абдуллин Р.Ф., Головин С.В. Моделирование трещины АВТОГРП на нагнетательной скважине в пороупругой среде	129
Бондарь М.Ю., Осипов А.В., Косихин А.С. Влияние охлаждения нефтяных пластов при многолетней закачке ненагретой воды при заводнении на примере Холмогорского месторождения	130
Валеев А.А., Душин Н.С., Душина О.А. Эффективность пластинчатых кондиционеров потока в трубопроводах с источником акустического шума	131
Габитов С.И. Модель эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) в процессе бурения на основе методов машинного обучения (виртуальный датчик ЭЦП)	132
Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А., Мухаметова З.С. Математическое моделирование притока высоковязкой жидкости в скважину с трещиной гидроразрыва пласта при высокочастотном электромагнитном воздействии	133
Давлетбаев А.Я., Губайдуллин М.Р. Гидродинамические исследования в нагнетательной скважине при давлении закачки превышающем минимальное горизонтальное напряжение	134
Жигарев В.А., Минаков А.В., Гузей Д.В., Пряжников М.И. Экспериментальное исследование вытеснения нефти из образцов ядра при помощи наносуспензии	135
Жигульский С.В., Канин Е.А., Гарагаш И.А., Боронин С.А., Гарагаш Д.И., Афанасьев А.А., Осипцов А.А., Пенигин А.В. Моделирование активации тектонического разлома при размещении углекислого газа в подземном пласте	136
Калинин О.Ю., Григорьев Г.С., Зайцев С.В., Ельцов Т.И. Геологоразведка геотермальных месторождений	137
Кармушин С.Р. Нестационарные течения Пуазейля в вязкоупругой жидкости Максвелла с двумя временами релаксации	138
Колосовская К.А., Горбунов В.И., Салимов Т.А., Мамяшев Т.В. Применение алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения с целью извлечения информации из фотоизображений ядра в дневном и ультрафиолетовом свете	139
Кравченко М.Н., Аминев Д.А. Закон фильтрации с кажущейся вязкостью при неустановившемся движении флюидов в пористых средах	140

Лисица В.В., Хачкова Т.С., Прохоров Д.И., Базайкин Я.В. Численное моделирование химического взаимодействия флюида с породой	141
Мальцев А.А., Щербаков Г.Ю. Оптимизация дизайна обработки призабойной зоны пласта на основе реализации геохимического подхода к моделированию	142
Мелешкин А.В., Морозова М.А. Влияние гидратообразования на устойчивость коллоидного раствора воды с наночастицами SiO ₂ и растворенным SDS	143
Мизёв А.И., Шмыров А.В., Мошева Е.А. Разделение водо-масляных эмульсий в высокочастотном неоднородном электрическом поле	144
Ниценко В.А., Мирзаянов А.А., Казина Л.З., Питюк Ю.А., Ломухин А.Ю. Численное исследование фильтрации газа и воды в микромоделях пористой среды	145
Осипов А.В., Бондарь М.Ю., Громан А.А., Чебышева О.В. Моделирование теста на единичных скважинах с разделяющимися химическими трассерами для целей оценки эффективности ПАВ-полимерного заводнения на примере Холмогорского месторождения	146
Павлова П.Л., Гузей Д.В., Михиенкова Е.И. Исследование параметров закачки диоксида углерода в нагнетательную скважину	147
Пенигин А.В., Афанасьев А.А., Беловус П.Н., Дымочкина М.Г., Веденеева Е.А., Гречко С.С., Павлов В.А. Моделирование влияния вариации геолого-физических характеристик объектов и обстановок осадконакопления на основные параметры процесса размещения углекислого газа	148
Питюк Ю.А., Саметов С.П., Фазлетдинов С.У., Батыршин Э.С. Численное и экспериментальное исследование влияния смачиваемости и капиллярного числа на эффективность вытеснения нефти в модели порового дублета	149
Самоловов Д.А. Интегрированная модель оптимизации длины горизонтального ствола газовых скважин	150
Скопинцев А.М., Гурин А.М. Конечноэлементная модель газожидкостного вытеснения в приложении к цифровой модели миникерна	151
Солнышкина О.А., Фаткуллина Н.Б., Булатова А.З. Численное моделирование однофазных и многофазных течений в микромоделях пористой среды	152
Фазлетдинов С.У., Питюк Ю.А., Муллаянов А.И. Численное исследование эффективности вытеснения нефти в насыпных моделях пористой среды	153
Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы	
Асильбеков А.К., Слюсарский К.В. Исследование закономерностей зажигания и горения низкорекреационных углей с добавками жидких продуктов пиролиза биомассы и отходов	157
Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Численный анализ процессов горения в фронтном устройстве камеры сгорания при использовании различных типов топлива	158
Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н. Оценка применимости системы охлаждения чешуйчатого типа для камер сгорания авиационных ГТД	159
Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Шторк С.И. Влияние акустического возмущения на сильно закрученное пламя	160
Горячев В.Д., Рыбакин Б.П., Михальченко Е.В. Выделение особенностей высокоскоростных газодинамических полей в задачах вычислительной гидродинамики	161
Гуськов О.В., Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л. Численное многопараметрическое исследование горения водорода в модельном канале	162
Декстерев А.А., Тэпфер Е.С., Кузнецов В.А. Расчетное исследование аэродинамики и теплообмена в перспективной конструкции пылеугольной топки	163
Козлов А.Н., Пензик М.В., Сосновский И.К., Баденко В.В. Исследование закономерностей сжигания угля совместно с алюмосиликатными катализаторами	164
Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Влияние состава угольной пыли на скорость распространения пламени в цилиндрическом канале	165
Мелихов В.И., Мелихов О.И., Салех Башар Структура стационарной волны детонации в системе «жидкий свинец – вода»	166
Мисюра С.Я., Бильский А.В., Гобызов О.А., Рябов М.Н., Морозов В.С. Смачиваемость поверхности меди после высокотемпературного отжига	167
Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Закономерности распространения пламени пропано-воздушной смеси в закрытом цилиндрическом канале	168
Пензик М.В., Козлов А.Н., Баденко В.В., Сосновский И.К. Термохимическая конверсия биомассы с помощью высокочастотного индукционного нагрева	169
Серебряков Д.И. Численное исследование влияния акустико-вихревых колебаний, генерируемых в инжекторе, на интенсификацию смешения и горения водорода при спутной подаче	170
Сидоров Р.С. Численное определение характеристик акустических волноводов для периодического ударно-волнового сигнала	171
Слюсарский К.В., Асильбеков А.К. Кинетические параметры конверсии смесей антрацита с пиролизной жидкостью различного происхождения	172
Соколова Е.И. Численное исследование горения водорода в сверхзвуковом потоке окислительной среды в модельной камере сгорания с уступом	173

Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике

Антонов Д.В., Стрижак П.А. Математическое моделирование соударений капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде	177
Антонов Д.В., Castanet G., Сажин С.С., Стрижак П.А. Численное моделирование тепломассопереноса в двухжидкостных каплях с учетом эксцентриситета внутреннего водяного ядра и оболочки топлива	178
Булатова А.З., Солнышкина О.А., Чугунов С.С., Киреев В.Н., Билялов А.Р. Численный подход к моделированию спекания керамики на основе метода граничных элементов	179
Гудько А.С., Гелаш А.А, Мулляджанов Р.И. Численный метод обратной задачи рассеяния для большого волнового пакета уравнения КдФ	180
Денисенко В.В., Фортова С.В. Численное моделирование эластической турбулентности в ограниченной двумерной ячейке	181
Долуденко А.Н., Фортова С.В. Численное исследование течения вязкой двумерной жидкости в замкнутом пространстве	182
Иванов К.А., Золотарев А.А., Федюшкин А.И., Пунтус А.А. Эффективный многосеточный метод решения уравнений Навье-Стокса для задач с высокочастотными вибрациями	183
Кусюмов А.Н., Кусюмов С.А., Михайлов С.А., Романова Е.В. Спектральный анализ пульсаций при 3D обтекании цилиндра	184
Маслеников Г.Е., Симанов Н.А., Никитина Г.И., Никитин А.Д., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. Численное моделирование тепломассообмена в печи ТГА	185
Перов Е.А., Долуденко А.Н., Жаховский В.В., Шепелев В.В. Молекулярно-динамическое моделирование распространения и затухания ударной волны в различных фазовых состояниях кристалла алюминия	186
Проценко К.Р., Байдаков В.Г. Молекулярно-динамическое исследование кинетики зарождения и свойств кавитационных полостей в растянутой жидкости	187
Рудяк В.Я. Прямое численное молекулярное моделирование в физической механике. Проблемы, перспективы и новые подходы	188
Рыбакин Б.П. Моделирование динамики соударения молекулярных облаков на гетерогенных системах	189
Сластная Д.А., Пономарев А.А., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И. Прямое численное моделирование ламинарного осесимметричного пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси	190
Тимкин Л.С., Щеляев А.Ю., Горелик Р.С., Александрова Н.А., Курдомов А.С., Жлуктов С.В., Сазонова М.Л. Моделирование опускающего турбулентного газожидкостного течения в модели биореактора программным комплексом FLOW VISION	191
Токталиев П.Д., Мартыненко С.И. Численное моделирование высокоскоростного соударения двух твердых тел бессеточным методом сглаженных частиц с коррекцией градиента ядра	192
Фаткуллина Н.Б., Солнышкина О.А., Чугунов С.С., Киреев В.Н., Билялов А.Р. Численное исследование изменения геометрии при спекании керамики с применением метода конечных элементов	193
Фомин В.Е., Тукмакова А.С., Тхоржевский И.Л., Новотельнова А.В. Исследование процесса тепломассопереноса и диффузии в ходе высокотемпературного синтеза на примере железа и олова	194
Шепелев В.В. Двумерное осесимметричное гидродинамическое моделирование индуцированных лазером ударных волн в алюминии	195
Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента	
Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В. Алгоритм расшифровки фазовых изображений для измерения трехмерной геометрии динамичных объектов	199
Двойнишников С.В., Бакакин Г.В., Зуев В.О., Меледин В.Г. Адаптивный алгоритм обработки данных в условиях аддитивных помех фотоприемника в задачах измерения трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции	200
Демин Е.В., Змиенко Д.С., Кушников И.В. Технологии использования петротермальной энергии на удаленных активах пао «газпромнефть»	201
Золотарев А.В. Методика теплоэрозионных испытаний композиционных материалов на трехфазном электродуговом подогревателе	202
Зуев В.О., Двойнишников С.В., Главный В.Г., Меледин В.Г. Адаптация метода фазовой триангуляции для измерений трехмерной геометрии объектов на аэродинамическом стенде	203
Зуев В.О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов	204
Кабардин И.К., Окулов В.Л., Гордиенко М.Р., Двойнишников С.В., Какаулин С.В., Касьянов Д.В., Зуев В.О., Мухин Д.Г., Степанов К.И., Ледовский В.Е. Диагностика кинематики потока методом лазерной доплеровской анемометрии при обтекании лопатки в условиях обледенения	205
Кабардин И.К., Окулов В.Л., Гордиенко М.Р., Двойнишников С.В., Какаулин С.В., Касьянов Д.В., Зуев В.О., Мухин Д.Г., Степанов К.И., Ледовский В.Е. Разработка микроволнового датчика для диагностики обледенения	206

Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Воробьев М.А. Пульсационные характеристики напряжения трения на стенке в турбулентном течении в трубах различных диаметров.....	207
Кирчанова Е.Е., Дулин В.М. Разработка алгоритма автоматической подстройки пространственной калибровки камер для 3D-PTV метода	208
Коробейщиков Н.Г. Способ диагностики газоструйных кластерных потоков по поперечному профилю интенсивности молекулярного пучка	209
Куликов Д.В., Павлов В.А., Бакакин Г.В., Двойнишников С.В. Стенд для контроля внешнего вида эталонных калибровочных имитаторов топливных таблеток реакторов водо-водяного типа	210
Куликов Д.В., Павлов В.А., Рахманов В.В., Двойнишников С.В. Применение узкополосной оптической фильтрации в 3D лазерных доплеровских анемометрах	211
Молотов И.М., Ямщикова Л.В., Счастливец А.И., Проталинский О.М. Моделирование технологического процесса водородного аккумулирования солнечной энергии	212
Смовж Д.В., Сорокин Д.В., Шатилов Д.А. Сенсор на основе графена для измерения скорости потока воды	213
Токарев М.П., Ничик М.Ю., Гобызов О.А., Дулин В.М. Применение активного управления с обратной связью для оптимизации локального теплообмена и гидродинамики в импактной струе	214
Тхоржевский И.Л., Тукмакова А.С., Демченко П.С., Новоселов М.Г., Новотельнова А.В., Ходзицкий М.К. Исследование метода стационарного термоотражения	215
Цой М. А., Шарифуллин Б. Р., Наумов И.В. Применение методики адаптивной трековой визуализации для исследования вихревых течений	216
Теплофизические свойства веществ и новые материалы	
Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А. Плотность и тепловое расширение жидких солей LiF и LiF-NaF	219
Агажанов А.Ш., Самошкин Д.А., Козловский Ю.М. Коэффициенты переноса тепла сплава Inconel 617	220
Богатищева Н.С., Никитин Е.Д., Попов А.П., Файзуллин М.З. Теплофизические свойства некоторых фурановых соединений – компонентов биотоплива второго поколения	221
Богатищева Н.С., Галкин Д.А. Коэффициенты температуропроводности и теплопроводности бинарных систем с замкнутой областью несовместимости компонентов	222
Боярских К.А., Хищенко К.В. Уравнения состояния тугоплавких металлов около критической точки фазового перехода жидкость–пар	223
Дутова О.С., Мешалкин А.Б. Уравнение для расчета коэффициента вязкости жидкости, газа и флюида инертных газов. Криптон	224
Козловский Ю.М., Станкус С.В. Особенности теплового расширения никеля марки НП2	225
Маевский К.К. Моделирование поведения периклаза при высокоэнергетическом воздействии	226
Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Моржухина А.В., Дельфини А., Альбано М., Марчетти М. Определение теплофизических характеристик углерод-углеродных пластин с керамическим покрытием	227
Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. Инновационные конструкционные материалы для энергонасыщенного и энергогенерирующего оборудования	228
Петраков В.Д., Тыра А.В., Ушаков К.Ю. Определение влияния параметров термообработки резинотехнических отходов на сорбционные свойства твёрдого остатка	229
Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Теплопроводность смеси R-32/R-125 (15/85) в паровой фазе.....	230
Самошкин Д.А. Удельная теплоемкость галлиевых гранатов ГСГГ и КНГГ	231
Сахапов С.З., Скирда М.С. Формирование полых наночастиц оксида алюминия при катодном и анодном распылении в графитовой дуге.....	232
Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Расчет ударных адиабат сплавов карбида вольфрама с кобальтом.....	233
Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Расчет ударных адиабат сплавов золота с германием.....	234
Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А., Рыков С.В. Термодинамические свойства на бинадали SF_6 в окрестности критической точки.....	235
Хайрулин А.Р. Энтальпия и теплоемкость жидкого сплава натрия–свинец эквимолярного состава	236
Хищенко К.В. Уравнение состояния и фазовые превращения тантала при высоких давлениях и температурах	237
Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах	
Бойко Е.В., Пильник А.А., Смовж Д.В. Теоретическая модель термоакустического излучения в графеновых материалах	241
Брацун Д.А., Костарев К.Г., Мошева Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И. Использование эффекта марангони для перемешивания растворов в х-образном микрореакторе проточного типа.....	242
Брацун Д.А., Сираев Р.Р., Мошева Е.А., Шмыров А.В., Мизев А.И. Об эффективности конвективного перемешивания в Y-образном проточном микроканале	243
Васильев М.М., Шухов Ю.Г., Терехов В.В., Старинский С.В., Самохвалов Ф.А. Экспериментальное и численное исследование взаимодействия падающей капли с модифицированной лазером медной поверхностью с бифильными свойствами смачивания	244

Вострецов С.О., Ягодницына А.А., Ковалев А.В., Бильский А.В. Исследование массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с помощью метода micro-LIF	245
Замула Ю.С., Батыршин Э.С., Афанасьев М.О., Питюк Ю.А. Изучение структуры микроэмульсий методом атомно-силовой микроскопии	246
Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Разработка фундаментальных основ построения устройств для 3D-печати объектов с гетерогенными свойствами с использованием микрофлюидных систем	247
Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Влияние синусоидальных пульсаций расхода дисперсной фазы на характеристики течений жидкость-жидкость в микроканалах	248
Кочкин Д.Ю. Эволюция пленочного течения жидкости с трехфазными линиями контакта под действием нагрева	249
Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Иванов Н.С., Лавриков А.В. Гидробофизация поверхности с помощью наночастиц	250
Мунгалов А.С., Кочкин Д.Ю. Численное моделирование деформаций свободной поверхности в тонком неизотермическом слое жидкости	251
Петрова А.В., Богословцева А.Л., Старинский С.В., Сафонов А.И. Структурирование поверхности кремния плазмой тлеющего разряда.....	252
Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А. Исследование кипения в щелевом микроканале	253
Серёдкин А.В., Ягодницына А.А. Создание системы онлайн-мониторинга двухфазных потоков в микроканалах на основе нейронных сетей	254
Старинский С.В. Лазерная обработка поверхностей для локального изменения свойств смачивания поверхности в теплофизических приложениях.....	255
Феокистов Д.В., Глушков Д.О., Вершинина К.Ю. Влияние текстуры поверхностей стали, модифицированных абразивными материалами и лазерным излучением, на процессы зажигания, горения и интенсивность осаждения продуктов выгорания капель топлив.....	258
Электрофизические явления в газовых и жидких средах	
Андрющенко В.А., Смовж Д.В. Экспериментальное и теоретическое исследование струи, формирующейся при распылении электродов в дуговом разряде	259
Ганченко Г.С., Попов В.А., Пономарев Р.Р., Шелистов В.С. Электрофорез ионоселективных частиц в вязких и вязкоупругих электролитах	260
Гашков М.А., Зубарев Н.М., Кочурин Е.А. Влияние внешнего тангенциального электрического поля на развитие капиллярной турбулентности свободной поверхности непроводящей жидкости	261
Куперштох А.Л., Медведев Д.А. Перфорация тонких жидких пленок неоднородным электрическим полем	262
Мухаметова З.С., Давлетбаев А.Я., Ковалева Л.А. Численное исследование нелинейной фильтрации жидкости при высокочастотном электромагнитном воздействии.....	263
Мухаметова З.С., Мусин А.А., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А. Определение концентрации выделившихся углеводородов при электромагнитном воздействии на нефтематеринские породы	264
Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды	
Астафьев А.В., Ибраева К.Т., Табакаев Р.Б. Влияние скорости нагрева на величину теплового эффекта слоевого пиролиза биомассы.....	267
Афремов Д.А., Бондар Ф.Д., Сапожников И.С., Сергеенко К.М., Тутукин А.В., Волков С.М., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Чинак А.В. Исследование распределения скорости потока теплоносителя в объеме регулярной ячейки при обтекании крестообразного тепловыделяющего элемента.....	268
Борисов Б.В., Вяткин А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А. Математическое моделирование теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем, системой воздухообмена и локальным ограждением.....	269
Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Калтаев А.Ж. Характеристики распыления и зажигания водоугольных топлив на основе бурого угля и жидких продуктов пиролиза древесных отходов	270
Геворгиз Р.Г., Железнова С.Н., Наумов И.В. Теория и практика использования вихревых потоков для интенсивного культивирования микроводорослей в промышленных масштабах	271
Голованов Д.А., Вершинин С.А., Хлопотова Е.А., Матушов С.С., Блябляс А.Н. Особенности реализации проектов CCUS при декарбонизации промышленных предприятий, специфика транспорта и компримирования углекислого газа	272
Головатюк А.С., Аникин А.В. Методика расчетно-экспериментального определения параметров термоэрозионной стойкости теплозащитных материалов.....	273
Горшков А.С., Ларионов К.Б. Исследование кинетики процесса парового пиролиза отработанных шин.....	274
Грекова А.Д., Кривошеева И.О., Стрелова С.В., Токарев М.М. Оптимизация геометрии адсорбера-теплообменника для адсорбционного кондиционирования воздуха.....	275
Дектерев Д.А., Лобасов А.С., Литвинцев К.Ю. Анализ эффективности снегозадерживающих конструкций	276

Елистратов С.Л., Миронова Н.В. Абсорбционные термотрансформаторы для рециклинга сбросного тепла на ТЭС.....	277
Железнова С.Н., Геворгиз Р.Г. Применение газовихревого фотобиореактора для культивирования диатомовых водорослей в промышленных масштабах.....	278
Ибраева К.Т., Шаненков И.И. Биотопливные композиции на основе высокосернистого сырья	279
Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р. Исследование аэродинамики потока в климатической камере с применением оптических методов измерений.....	280
Мильман О.О., Шифрин Б.А., Птахин А.В., Крылов В.С., Каргусова А.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование и совершенствование воздухозаборного и газозводного тракта парогазовой установки.....	281
Минаков А.В., Платонов Д.В., Сентябов А.В. Численное моделирование режимов закрученного течения в модели гидравлической турбины и отсасывающей трубы	282
Паршакова Я.Н. Вынос загрязняющих веществ из дна реки, накопленных в процессе сброса воды, содержащей продукты переработки промышленного производства.....	283
Пономарев К.О., Табакаев Р.Б. Экспериментальное исследование Свч-пиролиза био-угольных топливных композиций для генерации высококалорийного газа.....	284
Скрипкина Т.С., Бычков А.Л., Ломовский О.И., Ломовский И.О. Механохимические методы модификации бурых углей и переработки отходов угольной энергетики	285
Табакаев Р.Б., Димитрюк И.Д., Шаненков И.И. Термическая переработка скорлупы кедровых орехов в высокопрочное бездымное топливо	286
Усов Э.В., Мосунова Н.А., Бутов А.А., Климонов И.А., Сорокин А.А., Стрижов В.Ф., Цаун С.В., Чухно В.И. Развитие моделей интегрального расчетного кода Евклид/V2 для анализа термического разрушения твэлов быстрого реактора.....	287
Хорева В.А., Елистратов С.Л. Экологический аспект применения солнечной энергетики на юге Сибири	288
Шавалеев М.Р., Барбин Н.М., Терентьев Д.И. Теплофизические свойства высокотемпературной системы радиоактивный графит-азот при различных давлениях.....	289
Штым К.А., Соловьёва Т.А. Исследование температур сопловых вводов циклонно-вихревого предтопка.....	290
Янковский С.А., Кузнецов Г.В., Янковская Н.С., Мисюкова А.Д. Исследование процессов распыла и зажигания диспергированных частиц отходов лесопиления в смеси с каменным углем.....	291

Авторский указатель

- Castanet G. 178
 Kosar A. 89
 Абдуллаев Р.Н. 219
 Абдуллин Р.Ф. 53, 129
 Авдонин А.С. 127
 Агажанов А.Ш. 220
 Адамова Т.П. 54
 Александрова Н.А. 191
 Алифанов О.М. 227
 Альбано М. 227
 Аминев Д.А. 140
 Андриющенко В.А. 259
 Аникин А.В. 273
 Антонов А.Н. 55
 Антонов Д.В. 177, 178
 Апостол Ю.С. 56
 Архипов В.А. 57, 58
 Асильбеков А.К. 157, 172
 Астафьев А.В. 267
 Афанасьев А.А. 136, 148
 Афанасьев М.О. 246
 Афремов Д.А. 268
 Баденко В.В. 164, 169
 Базайкин Я.В. 141
 Базыров И.Ш. 128
 Байдаков В.Г. 103, 187
 Байкин А.Н. 129
 Бакакин Г.В. 200, 210
 Барбин Н.М. 289
 Барсуков А.В. 13
 Басалаев С.А. 57, 58
 Батыршин Э.С. 149, 246
 Белавина Е.А. 14
 Беловус П.Н. 148
 Белоненко М.Б. 112
 Белослудов В.Р. 99, 101, 102, 105,
 106, 109, 110
 Белослудцев В.В. 111
 Бильский А.В. 167, 245, 247, 248
 Билялов А.Р. 179, 193
 Бирюков Д.А. 59
 Блябляс А.Н. 100, 272
 Богатищева Н.С. 221, 222
 Богословцева А.Л. 252
 Божко Ю.Ю. 99, 101, 102, 105,
 106, 109, 110
 Бойко Е.В. 241
 Бондар Ф.Д. 268
 Бондарь М.Ю. 130, 146
 Борисов Б.В. 269
 Боронин С.А. 136
 Боярских К.А. 223
 Брацун Д.А. 242, 243
 Брюханов В.М. 103
 Будник С.А. 227
 Булатова А.З. 152, 179
 Бутов А.А. 287
 Бычков А.Л. 285
 Валеев А.А. 131
 Валиуллина В.И. 60, 96
 Васильев А.Ю. 158, 159
 Васильев М.М. 244
 Веденева Е.А. 148
 Вертгейм И.И. 15
 Вершинин С.А. 100, 272
 Вершинина К.Ю. 258
 Виноградов Д.А. 104
 Виноградов М.М. 116
 Виноградов Ю.А. 22, 75
 Владыко И.В. 61
 Власова О.А. 62
 Вожаков И.С. 63, 80
 Волков С.М. 268
 Воробьев М.А. 64, 65, 207
 Вострецов С.О. 245
 Вяткин А.А. 16, 25
 Вяткина А.В. 269
 Габитов С.И. 132
 Галкин Д.А. 222
 Ганченко Г.С. 260
 Гарагаш Д.И. 136
 Гарагаш И.А. 136
 Гашков М.А. 261
 Гвоздяков Д.В. 270
 Геворгиз Р.Г. 271, 278
 Гелаш А.А. 180
 Гец К.В. 99, 101, 102, 105,
 106, 109, 110
 Главный В.Г. 203
 Глушков Д.О. 258
 Гневущев А.А. 92
 Гобызов О.А. 167, 214
 Гогонин И.И. 66
 Голованов Д.А. 100, 272
 Головатюк А.С. 273
 Головин С.В. 53, 129
 Голубкина И.В. 67
 Горбачев М.В. 17, 68
 Горбунов В.И. 139
 Гордиенко М.Р. 205, 206, 280
 Горелик Р.С. 191
 Гореликов Е.Ю. 41, 160
 Гореликова А.Е. 69
 Горшков А.С. 274
 Горячев В.Д. 161
 Грекова А.Д. 275
 Гречко С.С. 148
 Григорьев Г.С. 137
 Гришаев Д.А. 83
 Громан А.А. 146
 Губайдуллин М.Р. 134
 Губанова Т.А. 107
 Губин В.Е. 78
 Гудько А.С. 180
 Гузей Д.В. 135, 147
 Гурин А.М. 70, 151
 Гуськов О.В. 162
 Давлетбаев А.Я. 133, 134, 263
 Давлетшин И.А. 18, 46
 Давыдов М.Н. 108
 Двойнишников С.В. 199, 200, 203,
 204, 205, 206, 210, 211
 Десб Равад 19
 Дектерев А.А. 30, 163
 Дектерев Ар.А. 30
 Дектерев Д.А. 30, 276
 Дельфини А. 227
 Дементьев Ю.А. 253
 Демин Е.В. 201
 Демченко П.С. 215
 Денисенко В.В. 181
 Димитрюк И.Д. 286
 Добросельский К.Г. 20
 Долуденко А.Н. 182, 186
 Дулин В.М. 38, 39, 208, 214
 Дутова О.С. 224
 Душин Н.С. 131
 Душина О.А. 131
 Дымочкина М.Г. 148
 Дьякова В.В. 71
 Евграфова А.В. 21, 72
 Егоров Р.И. 90
 Елистратов С.Л. 277, 288
 Ельцов Т.И. 137
 Ерманюк Е.В. 40
 Жаховский В.В. 186
 Жданов Р.К. 99, 101, 102, 105,
 106, 109, 110
 Железнова С.Н. 271, 278
 Жигарев В.А. 135
 Жигульский С.В. 136
 Жлуктов С.В. 191
 Забириев А.Р. 107, 116
 Зайцев А.С. 90
 Зайцев Д.В. 111
 Зайцев С.В. 137
 Закс М.А. 15
 Залкинд В.И. 73, 74
 Замула Ю.С. 246
 Зарипов Д.И. 29
 Здитовец А.Г. 22, 75
 Зейгарник Ю.А. 73, 74
 Зенков А.В. 270
 Зиннатуллин Р.Р. 264
 Змиенко Д.С. 201
 Золотарев А.А. 183
 Золотарев А.В. 202
 Золоторев Н.Н. 57, 58
 Зубарев Н.М. 261
 Зуев В.О. 200, 203, 204, 205, 206
 Ибраева К.Т. 267, 279
 Иванов К.А. 183
 Иванов Н.С. 250
 Иващенко В.А. 23, 76
 Иващенко Е.И. 76
 Ивочкин Ю.П. 104
 Игольников А.А. 85
 Исаев С.А. 5
 Истягина Е.Б. 83
 Кабардин И.К. 205, 206, 280
 Казина Л.З. 145
 Какаулин С.В. 205, 206, 280
 Калинин Е.И. 32
 Калинин О.Ю. 137
 Калинин С.А. 128
 Калтаев А.Ж. 78, 270

- Канин Е.А. 136
 Карасев Д.П. 17
 Кармушин С.Р. 138
 Карпунин И.Э. 88
 Картусова А.Ю. 281
 Касьянов Д.В. 205, 206
 Кашинский О.Н. 64, 65, 207
 Киреев В.Н. 24, 179, 193
 Кирчанова Е.Е. 208
 Киселёв Н.А. 22, 75
 Клименко Л.С. 81
 Климонов И.А. 287
 Клюев М.А. 32
 Ковалев А.В. 245, 247, 248
 Ковалева Л.А. 60, 96, 133, 263, 264
 Козлов А.Н. 164, 169
 Козлов В.Г. 16, 25, 40, 88
 Козловский Ю.М. 220, 225
 Колосовская К.А. 139
 Колчанов Н.В. 79, 87
 Колчанова Е.А. 79, 86
 Конобеева Н.Н. 112
 Коробейщиков Н.Г. 209
 Косихин А.С. 130
 Костарев К.Г. 242
 Кочкин Д.Ю. 249
 Кочкин Д.Ю. 251
 Кочурин Е.А. 261
 Кравченко М.Н. 140
 Крайнов А.Ю. 165, 168
 Кривошеева И.О. 275
 Крылов В.С. 281
 Кубриков К.Г. 104
 Кудияров В.Н. 6
 Кузма-Кичта Ю.А. 250
 Кузнецов В.А. 115, 163
 Кузнецов В.В. 7, 122
 Кузнецов Г.В. 269, 292
 Кукшинов Н.В. 117, 162
 Кулагин В.А. 83
 Куликов Д.В. 199, 210, 211
 Кундашкин А.Д. 26
 Куперштох А.Л. 262
 Курдюмов А.С. 191, 207, 268
 Курдюмов Н.Е. 6
 Кусюмов А.Н. 184
 Кусюмов С.А. 184
 Кушников И.В. 201
 Лавриков А.В. 250
 Лаптев А.Г. 27
 Лаптева Е.А. 27
 Ларионов К.Б. 78, 274
 Лебедев А.С. 38
 Левин А.А. 54, 113
 Ледовский В.Е. 205, 206
 Лисица В.В. 141
 Литвинов И.В. 41, 160
 Литвинцев К.Ю. 276
 Лобанов П.Д. 268
 Лобасов А.С. 30, 276
 Локтионов В.Д. 28
 Ломовский И.О. 285
 Ломовский О.И. 285
 Ломухин А.Ю. 145
 Лукьянов А.А. 29
 Лукьянов Ан.А. 80
 Лукьянова С.А. 115
 Льготина Е.В. 53
 Маевский К.К. 226
 Мазо А.Б. 32
 Макаров М.С. 68
 Максимов В.И. 269
 Малахов И.П. 89
 Мальцев А.А. 142
 Мамышев Д.Л. 162
 Мамяшев Т.В. 139
 Маркович Д.М. 47, 48
 Мартыненко С.И. 192
 Марчетти М. 227
 Марышев Б.С. 72, 81, 93
 Масленников Г.Е. 185
 Матвиенко О.В. 57
 Матушов С.С. 272
 Мацкевич Н.И. 114, 115
 Медведев Д.А. 262
 Меледин В.Г. 199, 200, 203
 Мелешкин А.В. 143
 Мелихов В.И. 166
 Мелихов О.И. 166
 Мелких А.В. 85
 Мельник О.Э. 53
 Мешалкин А.Б. 224
 Мешкова В.Д. 30
 Мизев А.И. 144, 242, 243
 Мильман О.О. 8, 281
 Минаков А.В. 135, 282
 Мирзаянов А.А. 145
 Миронова Н.В. 277
 Миськив Н.Б. 118
 Мисюкова А.Д. 292
 Мисюра С.Я. 167
 Михайлов С.А. 184
 Михальченко Е.В. 161
 Михеев А.Н. 31, 32
 Михеев Н.И. 18, 32, 46
 Михиенкова Е.И. 147
 Моисеева К.М. 165, 168
 Молотов И.М. 116, 212
 Молотова И.А. 116
 Молочников В.М. 32
 Мордовской А.С. 122
 Моржухина А.В. 227
 Морозов В.С. 167
 Морозова М.А. 143
 Морской Д.Н. 117
 Мосунова Н.А. 287
 Мошева Е.А. 144, 242, 243
 Муллаянов А.И. 153
 Мулладжанов Р.И. 23, 26, 35, 76, 180, 190
 Мунгалов А.С. 251
 Мусин А.А. 60, 96, 264
 Мухаметова З.С. 133, 263, 264
 Мухин Д.Г. 205, 206
 Мухтаров Э.С. 28
 Нагорнова Т.А. 269
 Назаров Н.А. 43
 Наумкин В.С. 17
 Наумов И.В. 33, 216, 271
 Немировский С.К. 34
 Ненарокомов А.В. 227
 Низамова А.Д. 24
 Низовский В.Л. 73, 74
 Низовский Л.В. 73, 74
 Низовцев М.И. 119
 Никитин А.Д. 185
 Никитин Е.Д. 221
 Никитина Г.И. 185
 Николаев Ю.А. 10
 Ниценко В.А. 145
 Ничик М.Ю. 39, 214
 Новоселов М.Г. 215
 Новотельнова А.В. 194, 215
 Огородников И.А. 82
 Окулов В.Л. 205, 206
 Орлова Е.Г. 228
 Осипов А.В. 130, 146
 Осипов П.В. 185
 Осипцов А.А. 136
 Осипцов А.Н. 67
 Остапченко А.Е. 91
 Очков В.Ф. 235
 Павлов В.А. 148, 210, 211
 Павлова П.Л. 147
 Палкин Е.В. 26, 35
 Паршакова Я.Н. 283
 Пензик М.В. 164, 169
 Пенигин А.В. 136, 148
 Перетятко В.В. 59
 Перов Е.А. 186
 Перфильева К.Г. 57, 58
 Петраков В.Д. 229
 Петрова А.В. 252
 Пешков И.М. 84
 Пещенюк Ю.А. 63
 Пильник А.А. 108, 121, 241
 Питюк Ю.А. 145, 149, 153, 246
 Платонов Д.В. 282
 Плохих И.А. 76
 Полежаев Д.А. 71
 Поликарпов А.Ф. 123
 Пономарев А.А. 190
 Пономарев К.О. 284
 Пономарев Р.Р. 260
 Попов А.П. 221
 Попов В.А. 260
 Попович С.С. 22, 75
 Прибатурин Н.А. 268
 Проталинский О.М. 212
 Прохоров Д.И. 141
 Проценко К.Р. 187
 Проценко С.П. 103
 Пряжников М.И. 135
 Птахин А.В. 281
 Пунтус А.А. 183
 Пушилина Н.С. 6
 Пятницкая Н.Ю. 14
 Радзюк А.Ю. 83
 Рандин В.В. 69
 Расчектаева Е.П. 230
 Рахманов В.В. 199, 204, 211

- Решетова Г.В. 84
Рига В.Ю. 9
Рожков А.Н. 92
Романова Е.В. 184
Роменский Е.И. 84
Роньшин Ф.В. 80, 253
Руденко А.О. 92
Рудяк В.Я. 188
Рыбакин Б.П. 161, 189
Рыжков А.Ф. 185
Рыков В.А. 235
Рыков С.В. 235
Рысин К.Ю. 25
Рютин С.Б. 85
Рябов М.Н. 167
Сабилов Р.Р. 16
Сагитов Р.В. 15, 86
Садбаков О.Ю. 204
Сажин С.С. 178
Сазонова М.Л. 191
Салимов Т.А. 139
Сальников М.В. 91
Саметов С.П. 149
Самоловов Д.А. 150
Самохвалов Ф.А. 244
Самошкин Д.А. 115, 220
Самошкин Д.А. 231
Сапожников И.С. 268
Сафаров А.С. 113
Сафонов А.И. 89, 252
Сахапов С.З. 232
Сахнов А.Ю. 36
Семерикова А.Н. 115
Сентябов А.В. 282
Сергеенко К.М. 268
Сердюков В.С. 61, 89
Серебряков Д.И. 170
Середкин А.В. 254
Середкин Н.Н. 233, 234
Сиденков Д.В. 19
Сидоров А.С. 87
Сидоров Р.С. 171
Силуянова М.В. 158
Симанов Н.А. 185
Сираев Р.Р. 243
Скирда М.С. 232
Скопинцев А.М. 70, 151
Скрипкин С.Г. 33, 37
Скрипкина Т.С. 285
Сластная Д.А. 190
Слюсарский К.В. 157, 172
Смовж Д.В. 213, 241, 259
Соколова Е.И. 173
Солнышкина О.А. 152, 179, 193
Соловьёва Т.А. 290
Сомванши П.М. 120
Сорокин А.А. 287
Сорокин Д.В. 213
Сорокин М.И. 38
Сосновский И.К. 164, 169
Станкус С.В. 115, 225, 230
Старинская Е.М. 118
Старинский С.В. 89, 118, 244, 252, 255
- Степанов К.И. 205, 206
Стерлягов А.Н. 119
Стрелова С.В. 275
Стрижак П.А. 177, 178
Стрижов В.Ф. 287
Строева П.С. 39
Субботин О.С. 101
Субботин С.В. 40, 49, 88
Суртаев А.С. 61, 89
Суслов Д.А. 41
Сухановский А.Н. 21
Счастливец А.И. 212
Сюзаев А.И. 68
Табакаев Р.Б. 267, 284, 286
Тарасенко А.Н. 158, 159
Тепляков И.О. 104
Терентьев Д.И. 289
Терехов В.В. 13, 43, 44, 118, 244
Терехов В.И. 13, 43, 44, 50, 68
Тимкин Л.С. 191
Титов Д.М. 227
Токарев М.М. 275
Токарев М.П. 23, 38, 39, 214
Токталиев П.Д. 192
Трифонов В.А. 115
Трофимов Р.Р. 112
Тукмакова А.С. 194, 215
Турунтаев С.Б. 9
Тутукин А.В. 268
Тхоржевский И.Л. 194, 215
Тыра А.В. 229
Тэпфер Е.С. 163
Урманчиев С.Ф. 24
Усанина А.С. 57, 58
Усов Э.В. 287
Устюжанин Е.Е. 235
Ушаков К.Ю. 229
Фазлетдинов С.У. 149, 153
Файзуллин М.З. 221
Фарахов М.И. 27
Фаткуллина Н.Б. 152, 193
Федосеев А.В. 91
Федюшкин А.И. 42, 92, 183
Феокистов Д.В. 228, 258
Филиппов М.В. 43, 44
Фомин В.Е. 194
Фомин П.А. 10
Фортова С.В. 181, 182
Французов М.С. 117
Хабин М.Р. 93
Хазов Д.Е. 45
Хайрулин А.Р. 236
Хайрулин Р.А. 219
Хачкова Т.С. 141
Хищенко К.В. 223, 233, 234, 237
Хлопов А.Д. 117
Хлопотова Е.А. 272
Ходзицкий М.К. 215
Хорева В.А. 288
Хребтов М.Ю. 26, 35, 190
Цаун С.В. 287
Цой М.А. 41, 216
Чебышева О.В. 146
Чеверда В.В. 120
- Чернов А.А. 54, 108, 113, 114, 115, 121
Чинак А.В. 69, 268
Чиннов Е.А. 94, 253
Чирков А.Ю. 117
Чохар И.А. 43, 44, 50
Чугунков Д.В. 250
Чугунов С.С. 179, 193
Чупров П.А. 95
Чухно В.И. 287
Шавалеев М.Р. 289
Шакиров Р.Р. 18, 46
Шамирзаев А.С. 122
Шаненков И.И. 279, 286
Шарифуллин А.Н. 15
Шарифуллин Б.Р. 33, 216
Шатилов Д.А. 213
Шелистов В.С. 260
Шелухин В.В. 55
Шепелев В.В. 186, 195
Шестаков М.В. 47, 48
Ширяева М.А. 49
Шифрин Б.А. 281
Шлегель В.Н. 115
Шмакова Н.Д. 40
Шмыров А.В. 144, 242, 243
Шторк С.И. 37, 160
Штым К.А. 290
Шухов Ю.Г. 244
Щеляев А.Ю. 191
Щербаков Г.Ю. 142
Щигель С.С. 73, 74
Эльман Р.Р. 6
Юдин С.М. 104
Юлмухаметова Р.Р. 60, 96
Юнусов И.О. 123
Ягов В.В. 107, 116
Ягодницына А.А. 245, 247, 248, 254
Ямщикова Л.В. 212
Ян Лун Н. 44, 50
Янковская Н.С. 292
Янковский С.А. 292

Ответственный за выпуск
к.ф.-м.н. В.С. Наумкин

Вёрстка
А.В. Мартынец

Подписано в печать 08.08.2022. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 64×90 1/8. Усл. печ. л. 38,5.
Тираж 240 экз. Заказ № 529

Отпечатано в типографии
ООО «Дигит Про»
г. Новосибирск, ул. Журина 78 оф 208



*ждем встречи
с Вами!*

