СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФОРУМ

Енисейская Теплофизика

XIV СЕМИНАР ВУЗОВ
ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

14-19 апреля
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Енисейская теплофизика

Тезисы докладов
Всероссийского форума

XIV Семинар вузов
по теплофизике и энергетике

Школа молодых ученых
«Физические основы современных
нефтегазовых технологий»

Красноярск, 14–19 апреля 2025 г.

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2025

УДК 536.2(03)
ББК 22.317.1
Е632

Ответственный за выпуск – Дмитрий Викторович Платонов

Е632 **Енисейская теплофизика** : тез. докл. Всерос. форума. Красноярск, 14–19 апреля 2025 г. [Электронный ресурс] / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Электрон. дан. (20 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2025. – 619 с. – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb RAM ; Windows 98/XP/7/8/10 ; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-7638-5142-7

Представлены тезисы докладов Всероссийского форума «Енисейская теплофизика», состоявшегося в г. Красноярске в апреле 2025 г. В рамках форума прошли также XIV Семинар вузов по теплофизике и энергетике и Школа молодых ученых «Физические основы современных нефтегазовых технологий» (в рамках проекта РНФ-23-79-30022).

Тематика тезисов охватывает вопросы тепловой энергетики, теплофизики и гидродинамики, в частности, в нефтегазовой индустрии, атомной промышленности, радиоэлектронике, строительной отрасли. Обсуждаются проблемы возобновляемой и альтернативной энергетики, экологии и безопасности. Описаны современные методы теплофизического эксперимента, математическое моделирование и микро-, нанотехнологии в теплофизике и энергетике. Рассматриваются проблемы подготовки кадров теплофизического профиля.

Предназначены для научных сотрудников, аспирантов, преподавателей и студентов, интересующихся проблемами теплофизики и энергетики.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

УДК 536.2(03)
ББК 22.317.1

ISBN 978-5-7638-5142-7

© Сибирский федеральный университет, 2025
© Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2025

Электронное научное издание

Корректор З. В. Малькова
Компьютерная вёрстка И. В. Гревцовой

Подписано в свет 25.10.2025. Заказ № 24651
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; http://bik.sfu-kras.ru. E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Алексеенко Сергей Владимирович – академик РАН (Новосибирск)

Зам. председателя:

Дектерев Александр Анатольевич – канд. техн. наук (Красноярск)

Члены программного комитета:

Волокитин Г. Г., д-р техн. наук (Томск)
Галеев Р. Г., д-р техн. наук (Красноярск)
Дедов А. В., чл.-корр. РАН (Москва)
Исаев С. А., д-р физ.-мат. наук (Санкт-Петербург)
Исламов С. Р., д-р техн. наук (Красноярск)
Кузнецов Г. В., д-р физ.-мат. наук (Томск)
Кулагин В. А., д-р техн. наук (Красноярск)
Куперштох А. Л., д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)
Майданик Ю. Ф., д-р техн. наук (Екатеринбург)
Маркович Д. М., академик РАН (Новосибирск)
Минаков А. В., д-р физ.-мат. наук (Красноярск)
Москвичев В. В., д-р техн. наук (Красноярск)
Назиров Р. А., д-р техн. наук (Красноярск)
Нигматулин Б. И., д-р техн. наук (Москва)
Поляков П. В., д-р хим. наук (Красноярск)
Прошкин А. В., д-р техн. наук (Красноярск)
Рудяк В. Я., д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)
Рыжков А. Ф., д-р техн. наук (Екатеринбург)
Рыжков С. В., д-р физ.-мат. наук (Москва)
Смирнов Е. М., д-р физ.-мат. наук (Санкт-Петербург)
Стрижак П. А., д-р физ.-мат. наук (Томск)
Терехов В. И., д-р техн. наук (Новосибирск)
Тестоедов Н. А., академик РАН (Красноярск)
Тугов А. Н., д-р техн. наук (Москва)
Фрик П. Г., д-р физ.-мат. наук (Пермь)
Шабанов В. Ф., академик РАН (Красноярск)
Шайдуров В. В., чл.-корр. РАН (Красноярск)
Штым К. А., д-р техн. наук (Владивосток)
Мессерле В. Е., д-р техн. наук (Казахстан)
Батмунх С., академик АН (Монголия)
Пенязьков О. Г., д-р физ.-мат. наук, академик НАН (Беларусь)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Сопредседатели:

Маркович Дмитрий Маркович – директор ИТ СО РАН, академик РАН (Новосибирск)
Минаков Андрей Викторович – директор ИИФиРЭ СФУ, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

Ученый секретарь конференции:

Платонов Д. В.

Технический комитет:

Шебелева А. А.
Лобасов А. С.
Божеева Д. М.
Шебелев А. В.
Мешкова В. Д.
Шульженко П. Д.
Дектерев Д. А.
Жигарев В. А.
Гузей Д. В.

БЛАГОДАРИМ ЗА ИНФОРМАЦИОННУЮ И ФИНАНСОВУЮ ПОДДЕРЖКУ:

Сибирский федеральный университет

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Министерство науки и высшего образования РФ

Российский научный фонд (грант РНФ № 23-79-30022)

ООО «ЗК-ЭКСПЕРТ»

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 5

СЕКЦИЯ 1 «Тепловая энергетика» 28

СЕКЦИЯ 2 «Теплофизика и гидродинамика в многофазных средах» 135

СЕКЦИЯ 3 «Экология и безопасность» 177

СЕКЦИЯ 4 «Теплофизика и гидродинамика в однофазных средах» 259

СЕКЦИЯ 5 «Гидродинамика и теплофизика в задачах нефтегазовой индустрии» 326

СЕКЦИЯ 6 «Математическое моделирование в теплофизике и энергетике» 380

СЕКЦИЯ 7 «Задачи теплообмена в радиоэлектронике и космических аппаратах» 447

СЕКЦИЯ 8 «Возобновляемая и альтернативная энергетика» 466

СЕКЦИЯ 9 «Гидродинамика и тепломассообмен
в задачах атомной промышленности» 511

СЕКЦИЯ 10 «Микро- и нанотехнологии в теплофизике и энергетике» 535

СЕКЦИЯ 11 «Современные методы теплофизического эксперимента» 561

СЕКЦИЯ 12 «Строительная теплофизика и задачи энергосбережения» 583

КРУГЛЫЙ СТОЛ «Проблемы подготовки кадров
теплофизического профиля» 616

Пленарные доклады

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ: ПЕРЕХОД ОТ ЛАБОРАТОРНОГО ОПЫТА К ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

А. В. Дедов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

dedovav@mpei.ru

Рассмотрены основные методы и сравнительные результаты интенсификации теплообмена и изменения критических тепловых потоков при кипении и спрейном охлаждении нагретых поверхностей. Представлены результаты собственных исследований о влиянии модификации поверхности теплообмена лазерным и электронным пучком за счет создания модулированной теплопроводности на теплоотдачу. Выделены методы модификации, потенциально востребованные в инженерной практике.

В современной технике необходимы простые и надежные решения, обеспечивающие стационарный теплоотвод и термостабилизацию устройств при плотности теплового потока, кратно превышающей критическую плотность теплового потока (КТП) при кипении в большом объеме для выбранной жидкости [1; 2]. Обеспечить термостабилизацию возможно с использованием фазовых переходов охлаждающей жидкости и дополнительной интенсификации теплообмена.

Известны лабораторные опыты по кипению в большом объеме, в которых достигнуты необходимые плотности тепловых потоков на поверхностях размером 1 см^2 при различной модификации теплообменной поверхности. В настоящий момент большинство исследователей сосредоточено на поиске и применении новых технологий структурирования поверхности и управления процессом, основной задачей является демонстрация эффекта, без детального исследования процесса для разных теплоносителей и условий проведения опытов.

В докладе представлен обзор основных полученных результатов в области интенсификации теплообмена и изменения критических тепловых потоков при кипении и спрейном охлаждении нагретых поверхностей, выполнен критический анализ возможности реализации предложенных методов в инженерной практике.

Представлены результаты собственных экспериментальных исследований. На кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ» выполнены работы по интенсификации теплообмена при фазовых переходах с использованием охлаждения диспергированным потоком вертикальных плоских мишеней и каналов, интенсификации теплообмена при кипении и КТП в большом объеме на структурированных поверхностях и в потоке хладонов в миниканале с модифицированной поверхностью.

Исследование поддержано Российским научным фондом, грант 24-19-00403.

Список источников

1. Дедов А. В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18–54.

2. Павленко А. Н., Жуков В. И., Швецов Д. А. Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости (обзор). Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81–97.

© Дедов А. В., 2025

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ АЭРОТЕПЛОФИЗИКА

С. А. Исаев[1, 2*], Д. В. Никущенко[1], А. А. Дектерев[3, 4]

[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3
[2]Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова
196210, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38
[3]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[4]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** isaev3612@yandex.ru*

Проведено структурирование нового научного направления, связанного с аэротермофизикой строительных сооружений. Обычно в нем преобладают прикладные задачи, но в данном случае акцент делается на фундаментальных проблемах: формирование мезомасштабных моделей окружающей среды с наземной шероховатостью, анализ ветровых нагрузок на типовые высотные сооружения, конструирование энергоэффективных зданий с использованием дросселирующего эффекта, оценка влияния рельефа местности на аэродинамические нагрузки и теплофизические характеристики сооружений, в частности, в прибрежной зоне.

Представляется ретроспективный анализ двадцатилетнего развития вычислительной архитектурно-строительной аэродинамики и теплофизики. Рассматриваются циклы численных исследований по моделированию ветровых порывов, управлению обтеканием с помощью вихрегенераторов и дросселирующего эффекта, по влиянию орографической шероховатости, по нестационарной аэродинамике затупленных тел и составленных из них ансамблей [1–22]. Особое внимание уделяется разработке многоблочных вычислительных технологий решения URANS на основе структурированных разномасштабных сеток с их пересечением и верификации пакета VP2/3 на многомерных нестационарных тестовых задачах, имеющих экспериментальные аналоги. В их числе куб на плоскости и на стенке узкого канала, цилиндр и прямоугольная стойка на плоскости, канал с круговой каверной, полукруговой цилиндр и др. Обосновывается применение SST-модели с учетом коррекции на кривизну линий тока в рамках подхода Роди – Лещцинера – Исаева. Анализируются эффекты снижения ветровых нагрузок. Особое внимание уделяется обтеканию полукругового цилиндра, оценке влияния рельефа на аэродинамические характеристики тел, вихревой нестационарной аэродинамике.

Также обобщаются результаты расчетных исследований обтекания и теплообмена отдельных строений и элементов городской застройки, полученные с использованием CFD-кода SigmaFlow с применением URANS- и LES-модели турбулентности.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 22-61-00098.

Список источников

1. Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое и моделирование / под ред. С. А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.

2. Вихревые технологии для энергетики / А. И. Леонтьев, С. В. Алексеенко, Э. П. Волчков и др.; под общ. ред. акад. А. И. Леонтьева. М. : ИД МЭИ, 2017. 350 с.

© Исаев С. А., Никущенко Д. В., Дектерев А. А., 2025

3. Исаев С. А., Баранов П. А., Усачов А. Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316 с.

4. Исаев С. А., Белоусова Л. Ю., Баранов П. А. Численный анализ ветрового режима в окрестности аэропорта Пулково // ИФЖ. 1999. Т. 72 (4). С. 672–678.

5. Isaev S. A., Zhdanov V. L., Niemann H.-J. Numerical study of the bleeding effect on the aerodynamic characteristics of a circular cylinder // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 90 (11), pp. 1217–1226, 2002.

6. Исаев С. А., Лысенко Д. А. Расчет нестационарного обтекания кубика на стенке узкого канала с помощью URANS и модели турбулентности Спаларта – Аллмареса // ИФЖ. 2009. № 82 (3). С. 492–499.

7. Усачов А. Е., Исаев С. А., Баранов П. А. Численное моделирование течения воздуха при вентиляции отдельных участков автодорожных тоннелей // Труды ЦАГИ. Промышленная аэродинамика. 2009. Вып. 2684. С. 26–35.

8. Гувернюк С. В., Егорычев О. О., Исаев С. А., Корнев Н. В., Поддаева О. И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. № 1 (3). С. 185–191.

9. Гувернюк С. В., Исаев С. А., Егорычев О. О., Поддаева О. И., Корнев Н. В., Усачов А. Е. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. № 2 (2). С. 113–119.

10. Исаев С. А., Ватин Н. И., Баранов П. А., Судаков А. Г., Усачов А. Е., Егоров В. В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 1. С. 103–109.

11. Isaev S. A., Vatin N. I., Lebiga V. A., Zinoviev V. N., Keh-Chin Chang, Jiun-Jih Miau. Problems and methods of numerical and experimental investigation of aerodynamics for high rise constructions in the coastal region "sea-land" // Magazine of Civil Engineering, (2), pp. 54-61, 2013.

12. Vatin N., Isaev S., Guvernyik S., Gagarin V., Basok B., Zhukova J. Architectural building aerodynamics of tall structures with the bleeding effect and wind energy selection // Proceeding of Int. Conf. “Innovative Materials, Structures and Technologies”. Riga, RTU Press. Riga, pp. 193-197, 2014.

13. Исаев С. А., Баранов П. А., Жукова Ю. В., Усачов А. Е., Терешкин А. А. Моделирование ветрового воздействия на ансамбль высотных зданий с использованием многоблочных вычислительных технологий // ИФЖ. 2014. № 87 (1). С. 107–118.

14. Исаев С. А., Судаков А. Г., Жукова Ю. В., Усачов А. Е. Моделирование снижения лобового сопротивления и снятия знакопеременной нагрузки на круговой цилиндр за счет дросселирующего эффекта // ИФЖ. 2014. № 87 (4). С. 904–907.

15. Исаев С. А., Ватин Н. И., Гувернюк С. В., Гагарин В. Г., Басок Б. И., Жукова Ю. В. Снижение лобового сопротивления энергоэффективного высотного сооружения с помощью дросселирующего эффекта с отбором ветровой энергии // ТВТ. 2015. № 53 (6). С. 918–922.

16. Isaev S. A., V.A. Lebiga, J.J. Miau, V.N. Zinovyev. Modeling vortex structures control at streamlining of high-rise buildings in the coastal area “sea – land” // AIP Conf. Proc., (2027), pp. 030167 1-5, 2018.

17. Исаев С. А., Мяу Дж. Дж., Никущенко Д. В., Судаков А. Г., Усачов А. Е. Моделирование влияния сдвига ветра на снижение лобового сопротивления энергоэффективного высотного сооружения с использованием дросселирующего эффекта // Математическое моделирование. 2021. № 33 (7). С. 5–17.

18. Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D. Ensuring safe descend of reusable rocket stages – numerical simulation and experiments on subsonic turbulent air flow around a semi-circular cylinder at zero angle of attack and moderate Reynolds number // Acta Astronautica. 2018. N 150. P. 117–136.

19. Meshkova V. D., Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Litvintsev K. Y. SigmaFlow CFD code as a tool for predicting the wind environment around a group of buildings // Journal of Physics: Conference Series, Yalta, Crimea, 13–20 сентября 2020 года. Bristol: IOP Publishing Ltd, P. 012119, 2020.

20. Мешкова В. Д., Дектерев А. А., Литвинцев К. Ю., Филимонов С. А., Гаврилов А. А. Роль городской застройки в формировании «острова тепла» // Вычислительные технологии. 2021. № 26 (5). С. 4–14.

21. Дектерев Д. А., Лобасов А. С., Мешкова В. Д., Литвинцев К. Ю., Дектерев А. А. Анализ влияния масштабного фактора на результаты моделирования обтекания зданий // Теплофизика и аэромеханика. 2023. № 30 (6). С. 1197–1204.

22. Литвинцев К. Ю., Дектерев А. А., Мешкова В. Д., Филимонов С. А. Влияние излучения на формирование ветрового и температурного режимов в городской среде // Теплофизика и аэромеханика. 2023. № 30 (4). С. 723–735.

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ

Н. Н. Новицкий

Институт систем энергетики СО РАН
664033, Российская Федерация, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130
pipenet@isem.irk.ru

Доклад посвящен обсуждению ключевых задач и перспективных методов цифровизации систем централизованного теплоснабжения на пути их трансформации в киберфизические системы.

В настоящее время в России, как и большинстве экономически развитых стран, разворачиваются масштабные процессы цифровизации экономики и ее отраслей, включая теплоэнергетику. Их конечная цель – переход на полностью автоматизированное производство с интеллектуальным управлением в реальном времени во взаимодействии со смежными системами и внешней средой. На основе анализа программных документов разных стран, научной литературы и практического опыта интеллектуализации систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) [1; 2] формулируются основные цели и задачи цифровизации процессов проектирования, эксплуатации и оперативного управления СЦТ.

Дается краткая характеристика современного этапа развития теории гидравлических цепей как управляемых кибернетических систем. На этой основе рассматриваются новые задачи и методы реализации цифровых двойников СЦТ как динамических и стохастических объектов, предлагаются вероятностные методы имитационного моделирования режимов работы СЦТ. Приводятся новые методы обеспечения адекватности моделей СЦТ их фактическому состоянию, в т. ч. методы активной параметрической идентификации, основанные на сочетании методов оптимального планирования режимов, расстановки измерительных приборов и обработки результатов испытаний СЦТ на гидравлические и тепловые потери. Обсуждается подход к решению новой задачи мониторинга температурных режимов СЦТ в реальном времени.

Самостоятельное внимание уделяется задачам оптимизации установившихся гидравлических режимов работы СЦТ, в т. ч. обсуждаются новые результаты в области постановки и решения задач: 1) структурно-параметрической оптимизации режимов СЦТ произвольной структуры и конфигурации; 2) оптимизации режимов радиальных тепловых сетей с одним источником тепловой энергии, когда может быть предложен более быстродействующий метод; 3) иерархической оптимизации режимов больших СЦТ.

Предложенные методы обеспечивают гарантию получения оптимальных решений, позволяют учитывать смешанный дискретно-непрерывный характер задач, учитывать их многокритериальность и высокую размерность.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FWEU-2021-0002 (рег. № АААА-А21-121012090012-1) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 годы.

Список источников

1. Novitsky N. N., Shalaginova Z. I., Alekseev A. A. et al. Smarter Smart District Heating // Proceedings of the IEEE. 2020. V. 109. № 9. P. 1596–1611.

2. Новицкий Н. Н., Шалагинова З. И., Алексеев А. В. и др. Современное состояние, тенденции и задачи интеллектуализации систем теплоснабжения (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 65–83.

© Новицкий Н. Н., 2025

NEW APPROACHES TO MODELLING PUFFING AND MICRO-EXPLOSION IN COMPOSITE FUEL/WATER DROPLETS

S. S. Sazhin

Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
630090, Russian Federation, Novosibirsk, Ak. Lavrentyev, 1
Advanced Engineering Centre, School of Architecture,
Technology and Engineering, University of Brighton
Brighton, BN2 4GJ, UK
S.Sazhin@brighton.ac.uk

Recent developments in the modelling of puffing and micro-explosions in composite multi-component fuel/water droplets are summarised.

Recent developments in the modelling of puffing and micro-explosions in composite multi-component droplets are summarised, following [1-4]. The focus is on simple models, compared with Direct Numerical Simulations (DNS), which, despite their simplicity, can capture the most important features of the phenomena. These models are based on the analytical solutions to the one-dimensional heat transfer and component diffusion equations in a composite droplet, assuming that a spherical water sub-droplet is placed in the centre of a spherical fuel droplet. The analytical solution to these equations were obtained, implemented into the numerical code, and used at each time step of the calculations. The effects of thermal swelling and evaporation, using the Abramzon and Sirignano model [5], are considered. The radiative heating of the droplet is considered assuming that the droplet is semi-transparent. The effect of a supporting wire is taken into account assuming that heat supplied from the wire is distributed instantaneously and homogeneously throughout the whole droplet volume. The start of puffing/micro-explosion is linked with the time instant when the temperature at the water/rapeseed oil interface reaches the water nucleation temperature [2; 4]. The verification of the model was performed by comparing its predictions with those of the COMSOL based numerical code. The coincidence of the results supports both approaches to the problem. It is pointed out that shifts of the water sub-droplet relative to the fuel (kerosene surrogates) shell by less than 20 % lead to a reduction in the time to puffing/micro-explosion of less than 5 % [3].

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant No. 075-15-2024-620).

Работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-620.

References

1. Sazhin S. S. Droplets and Sprays: Simple Models of Complex Processes. Springer (Series ‘Mathematical Engineering') 600 p., 2022.

2. Bar-Kohany T., Antonov D. V., Strizhak P. A., Sazhin S. S. Nucleation and bubble growth during puffing and micro-explosions in composite droplets // Fuel, Vol. 340, 126991, 2023.

3. Castanet G., Antonov D. V., Zubrilin I. A., Strizhak P. A., Sazhin S. S. Effects of water subdroplet location on the start of puffing/micro-explosion in composite multi-component fuel/water droplets// Fuel, Vol. 341, 127609, 2023.

© Sazhin S. S., 2025

4. Skripov P., Bar-Kohany T., Antonov D. V., Strizhak P. A., Sazhin S. S. Approximations for the nucleation temperature of water// Int. J of Heat and Mass Transfer, Vol. 207, 123970, 2023.

5. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations// Int. J of Heat Mass Transfer, Vol. 32, 1605-1618, 1989.

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ДОСТИЖЕНИЯ

С. В. Алексеенко[1], Е. Н. Шлегель[2*], П. А. Стрижак[2]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
**nes6@tpu.ru*

Проанализированы основные достижения науки, техники и технологий в газогидратной области. Рассмотрены этапы всего жизненного цикла гидратов от получения до практического применения. Определены современные представления об энергетических особенностях синтеза, транспорта, хранения, регазификации, применения гидратов для термической конверсии топлив и отходов, разделения газов и жидкостей, очистки и обезвреживания различных веществ, секвестирования антропогенных выбросов, захоронения углекислого газа, в нефтехимических процессах и для повышения пожаровзрывобезопасности. Приведены концепции комплексного использования газовых гидратов в замкнутых энергетических циклах. Определены основные технико-экономические сложности развития газогидратных технологий и потенциальные решения выделенных задач.

Газогидратные технологии сегодня привлекают внимание ученых и инженеров со всего мира благодаря своему огромному потенциалу в решении актуальных задач современной энергетики. Они отличаются высокой экономической эффективностью и минимальным воздействием на окружающую среду, что особенно важно в условиях глобального изменения климата. Уникальные свойства газовых гидратов, например, способность аккумулировать значительные объемы газа в сравнительно небольших объемах, позволяют использовать их в самых разнообразных областях промышленности: при добыче метана из гидратных месторождений, разделении и очистке газа, транспортировке газа, опреснении морской воды, безопасности трубопроводов и т. д. [1].

В настоящее время установлено, что использование газогидратов для термической конверсии топлив и отходов энергетического сектора при производстве тепловой и электрической энергии является оптимальным [2]. Такая технология считается экономически выгодной и экологически чистой, поскольку помогает утилизировать отходы и одновременно производить энергию. Также способность гидратов позволяет разделять газовые смеси и жидкости, что находит свое место в химической и нефтехимической индустриях [3]. Для добычи газа оптимальна закачка CO_2 в гидратный пласт, что способствует снижению выбросов парникового газа в атмосферу, обеспечивая его длительное хранение. За счет применения газогидратов в качестве пожаротушащего состава, вместо огнетушащих агентов с перфтороктановым сульфонатом, минимизируется ущерб окружающей среде.

Предлагается концепция комплексного использования газовых гидратов в замкнутых энергетических циклах, предполагающих максимально эффективное применение всех продуктов и побочных результатов технологических операций, сокращение количества отходов и увеличение производительности энергоустановок. На этапе получения газогидраты синтезируются в условиях низкой температуры и высокого давления. Затем гидраты транспортируются в специальных контейнерах, обеспечивающих поддержание необходимых термобарических параметров, чтобы предотвратить

© Алексеенко С. В., Шлегель Е. Н., Стрижак П. А., 2025

их преждевременную диссоциацию. После доставки гидраты хранятся в специализированных хранилищах, где поддерживаются стабильные температура и давление. Регазификация – ключевой этап процесса, на котором гидраты диссоциируют обратно на воду и газ. Это достигается нагреванием либо снижением давления. Важно отметить, что каждый из этих этапов требует строгого контроля и соблюдения определенных условий, чтобы обеспечить безопасность и эффективность технологического процесса.

Произведены расчеты необходимых расходов гидратного газа и нефтешлама для котлов различной мощности, которые предназначены для отопления удаленных станций и населенных пунктов (табл. 1). В расчетах учитывались различные типы потребителей, включая поселки с численностью населения 150, 700 и 2 500 чел. Для примера рассмотрен поселок с населением 700 чел., для отопления которого требуется тепловая мощность около 3 МВт. Эту потребность удовлетворяет газовый котельный агрегат мощностью 4 МВт. Расход гидратного газа для работы данного агрегата составляет около 211 м³/ч. После модернизации котельного агрегата для использования нефтешлама в качестве основного топлива, расход гидратного газа снижается практически в три раза, в то время как расход самого нефтешлама составит около 0,486 м³/ч. Такая модернизация позволяет значительно уменьшить потребление газа, делая систему более экономичной. Совместное сжигание гидратного газа и нефтешлама позволит эффективно утилизировать отходы нефтедобычи и обеспечить отдаленные населенные пункты электричеством и отоплением.

Таблица 1

Результаты расчета мощности котельного оборудования и расхода топлив при его использовании

Размер объекта	Требуемая тепловая мощность, МВт	Мощность котла, МВт	Расход гидратного газа при его моносжигании, м³/ч	Расход гидратного газа, м³/ч	Расход нефтешлама, м³/ч
Поселок с населением 150 чел.	0,62	1	59	18	0,1327
Поселок с населением 700 чел.	3,12	4	211	72	0,4856
Поселок с населением 2500 чел.	11,25	14	1600	483	3,2576

Проведенные расчеты основаны на тяжелых климатических условиях, характерных для северных регионов, где температура окружающей среды может опускаться до –30 °С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная система способна стабильно работать в суровых условиях, обеспечивая надежное теплоснабжение удаленных объектов. Несмотря на наличие технических и экономических трудностей, таких как разработка эффективных методов синтеза и регазификации гидратов, обеспечение устойчивости их хранения и транспортировки, а также высокие финансовые затраты на некоторые технологии, текущие научные и технологические достижения создают предпосылки для дальнейшего прогресса в этой области и массового внедрения газогидратных технологий в промышленность.

Исследование выполнено при поддержке гранта Национального исследовательского Томского политехнического университета, соглашение № 075-15-2024-543.

Список источников

1. Zhang Z., Xu T., Li S., Li X., Briceño Montilla M. J., Lu C. Comprehensive effects of heat and flow on the methane hydrate dissociation in porous media // Energy, Vol. 265, article number 126425, 2023.

2. Vinogrodskiy K., Nagibin P. S., Misyura S. Y., Morozov V. S., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Methane hydrate regasification to intensify the combustion of low-rank coal fuels // Fuel, Vol. 381, article number 133432, 2025.

3. Stepanova E. A., Atlaskin A. A., Kudryavtseva M. S., Shablykin D. N., Markin Z. A., Dokin E. S., Zarubin D. M., Prokhorov I. O., Vshivtsev M. A., Kazarina O. V., Logunov A. A., Atlaskina M. E., Vorotyntsev A. V., Vorotynstev I. V., Petukhov A. N. Combining gas hydrate crystallization and membrane technology: A synergistic approach to natural gas separation // Chem. Eng. Process. Process Intensif., Vol. 208, article number 110130, 2025.

МНОГОМАСШТАБНОЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И МИКРОУРОВНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ЭНЕРГЕТИКИ

В. В. Стегайлов

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/2
stegailov@jiht.ru

Дан обзор исследований, направленных на вооружение энергетики суперкомпьютерными методами расчетов для создания моделей вещества, способных объяснять его свойства, исходя из микроскопических атомистических представлений, предсказывать поведение материалов в экстремальных состояниях и создавать новые материалы с заданными характеристиками. Расчеты атомистических моделей являются одним из наиболее ярких примеров использования параллельных суперкомпьютерных технологий. Их развитие особенно актуально в связи с предстоящим преодолением экзафлопсного барьера суперкомпьютерной производительности.

Несмотря на значительные имеющиеся сегодня вычислительные возможности, рекордные пространственно-временные масштабы, доступные для прямого микроскопического моделирования, не превышают микрометров и микросекунд. Они недостаточны для замещения кинетических и континуальных моделей вещества. Различие атомистических масштабов и масштабов многих прикладных задач не исчезнет в обозримой перспективе. Совершенствование атомистических моделей должно сопровождаться развитием многомасштабных подходов, позволяющих связывать физико-математические модели на различных пространственно-временных масштабах.

В докладе приведены примеры решения задач по описанию кинетики плазменного фазового перехода в плотных молекулярных флюидах водорода и азота [1; 2], по созданию многомасштабной модели коррозии [3–6], необходимой для теплофизического моделирования течения жидкометаллического свинцового теплоносителя в контакте со сталью, и по многомасштабному моделированию выхода продуктов деления из материала ядерных топлив [7; 8]. В качестве примера суперкомпьютерного решения сверхбольшой задачи описана молекулярно-динамическая модель вихревого течения жидкости [9], позволяющая получить результаты, представляющие интерес для описания диффузии газов и примесей в условиях турбулентного перемешивания.

Список источников

1. Fedorov I. D., Stegailov V. V. First-principles molecular dynamics of exciton-driven initial stage of plasma phase transition in warm dense molecular nitrogen // Journal of Chemical Physics. 2024. Т. 161. № 15.

2. Fedorov I. D., Stegailov V. V. Exciton nature of plasma phase transition in warm dense fluid hydrogen: ROKS simulation // ChemPhysChem. 2023. Т. 24. № 6. С. e202200730.

3. Kolotinskii D. A., Nikolaev V. S., Stegailov V. V., Timofeev A. V. Point Defect Model for the kinetics of oxide film growth on the surface of T91 steel in contact with lead–bismuth eutectic // Corrosion Science. 2023. Т. 211. С. 110829.

4. Чичеватов Г. Д., Стегайлов В. В. Точечные дефекты в шпинелях FeMe2O4 (Me=Fe, Cr): исследование в рамках DFT+U // ЖЭТФ. 2024. Т. 166. № 3. С. 347–373.

© Стегайлов В. В., 2025

5. Khnkoian G. V., Nikolaev V. S., Stegailov V. V. Towards atomistic modelling of solid Pb-O formation and dissolution in liquid lead coolant: Interatomic potential development // Journal of Nuclear Materials. 2024. T. 594. C. 155016.

6. Voronov I. V., Nikolaev V. S., Timofeev A. V., Stegailov V. V. Atomistic mechanism of activation controlled liquid metal corrosion at the Fe-Pb interface // Journal of Nuclear Materials. 2025. T. 604. C. 155483.

7. Antropov A., Stegailov V. Ultrafast diffusion of overpressurized gas filled nanobubbles in UO2 // Journal of Nuclear Materials. 2021. T. 551. C. 152942.

8. Antropov A., Stegailov V. Helium bubbles diffusion in aluminum: influence of gas pressure // Journal of Nuclear Materials. 2023. T. 573. C. 154123.

9. Pavlov D., Galigerov V., Kolotinskii D., Nikolskiy V., Stegailov V. GPU-based molecular dynamics of fluid flows: Reaching for turbulence // International Journal of High Performance Computing Applications. 2024. T. 38. № 1. C. 34-49.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И ГРАФЕН ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Д. В. Смовж

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** smovzh@itp.nsc.ru*

Доклад посвящен описанию методологических особенностей экспериментальной работы с одномерными и двухмерными углеродными материалами. Рассмотрены способы создания дисперсий и композитов на основе углеродных материалов. Представлены результаты исследований термоакустических, сенсорных, электромагнитных и защитных свойств графеновых материалов.

Углеродные наноматериалы в настоящее время нашли применение в большинстве сфер жизнедеятельности человека. Фуллерены, углеродные нанотрубки, луковичные структуры, нановолокна и графен применяются в качестве добавок, модифицирующих фрикционные, оптические, электрические, химические, теплофизические свойства жидких и твердых материалов. Несмотря на огромную популярность углеродных наноматериалов, вопросы их стандартизации остаются открытыми.

В случае однослойных углеродных нанотрубок, можно их классифицировать по хиральности и диаметру, для многослойных кроме длины и диаметра используют степень дефектности (отношение G и D линий КР-спектра), что, как показывает экспериментальная практика, не дает полного представления о свойствах данных материалов.

В случае с графеном ситуация еще более неопределенная, исторически сложилось так, что CVD-графен и восстановленный оксид графена считают близкими структурами, хотя данные материалы отличаются по составу, структуре и требуют существенно различных экспериментальных подходов для получения, обработки и создания композитов. Благодаря сказанному выше, теоретическая предсказательная способность свойств наноуглеродных композитов невелика, активно развиваются экспериментальные подходы их получения.

В работе используются графеновые материалы, полученные методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) и электродугового синтеза. Перенос CVD-графена реализуется через жидкость. Дуговой графен диспергируется в жидкостях и осаждается/наносится на различные поверхности. В полученных композитных материалах исследуются лиофильные свойства, электропроводность, сенсорные свойства, химические свойства, электромагнитные свойства.

В результате проведенных исследований показано:

– прозрачность графена для смачиваемости изменяется с изменением плотности прилегания графенового покрытия к подложке;

– плотность прилегания при переносе через воду зависит от гидрофильности поверхности;

– испарение жидкости для гидрофобной поверхности происходит через дефекты в графеновом покрытии.

Проведены оценки сил поверхностного натяжения при высыхании жидкости, заключенной между графеном и подложкой, показано, что давление Лапласа достаточно для деформации графенового покрытия.

Исследованы электромагнитные характеристики однослойного CVD-графена, показано, что для эффективного использования графена в устройствах для электромаг-

© Смовж Д. В., 2025

нитной защиты требуется корректное расположение графена в максимуме электрического поля, что позволит добиться поглощения от 50 % до 75 % на слой.

Исследованы термоакустические свойства графеновой пленки и ее влияние на конвективный и лучистый теплообмен. Экспериментально показано, что генерация звука в CVD-графене происходит за счет термоакустического преобразования, а не колебания пленки.

Исследованы сенсорные свойства CVD и электродугового графена, показано, что оптимальными свойствами обладают композиты на основе их смесей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00357 (https://rscf.ru/project/24-19-00357).

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВЫХ МАТРИЦАХ. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. И. Терехов*, В. В. Терехов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** terekhov@itp.nsc.ru*

Представлена история развития исследований аэродинамики и теплопереноса в вихревых матрицах – одного из наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена. Прирост теплоотдачи в подобных устройствах может достигать порядка величины. Рассмотрены основные механизмы процессов переноса в сложных трехмерных течениях внутри вихревых матриц. Обсуждаются последние достижения в этой области, касающиеся экспериментальных и численных исследований локальной структуры течения и теплообмена внутри матриц.

Проблема интенсификации конвективного теплообмена в энергетических установках на протяжении длительного периода времени остается актуальной и продолжает привлекать внимание многочисленных исследователей. Известно, что среди большого числа существующих методов наиболее высокими показателями по степени интенсификации теплообмена обладают каналы с установленными в них вихревыми матрицами [1; 2].

Вихревые матрицы (другие названия – решетчатые матрицы, компланарные каналы со скрещивающимися ребрами, в англоязычной литературе – *latticework matrix*) представляют собой плоский или кольцевой канал, на противоположных стенках которого с определенным шагом установлены ребра под различным углом к оси канала. В промежутке между пластинами теплоноситель движется по сложной системе каналов, образованных взаимно пересекающимися ребрами [3]. Фото матрицы и схема направлений компонент скорости в ее каналах показаны на рис. 1.

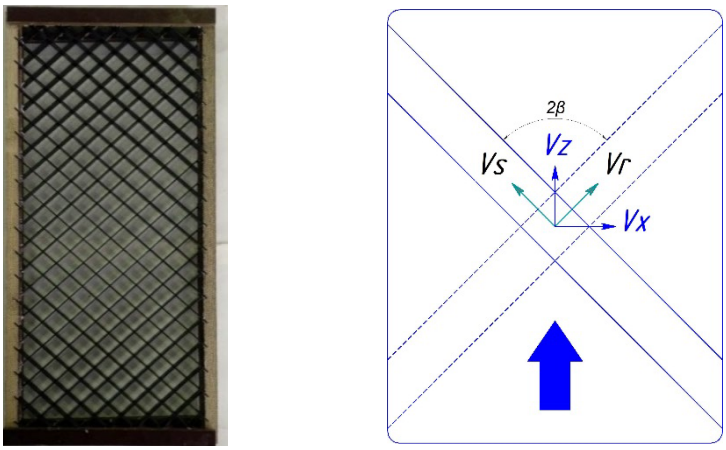


Рис. 1. Внешний вид вихревой матрицы и направление компонент скорости

Экспериментальному и численному исследованиям течения и теплообмена в вихревых матрицах посвящено большое число работ. Одна из первых работ в этой области [4] относится к середине прошлого столетия. В ней для усиления теплоотдачи две гофрированные стенки (поверхности Френкеля) были установлены под некоторым

© Терехов В. И., Терехов В. В., 2025

углом друг к другу. Стенки были изготовлены из керамики, что позволяло проводить эксперименты в высокотемпературных условиях. Высокие показатели по интенсивности теплообмена, достигнутые в этой работе, послужили мотивацией для бурного развития данного направления науки и технологий.

Основными областями применение вихревых матриц являются системы охлаждения лопаток турбин, камер сгорания ракетных и авиационных двигателей, а также лазерных зеркал. Выполненные в нашей стране работы [1–3] можно назвать пионерскими, а их результаты были положены в основу новых эффективных систем охлаждения [5; 6]. При этом следует сказать, что подавляющее число работ посвящено изучению средних по всей матрице характеристик теплообмена и гидравлического сопротивления. Это объясняется чрезвычайно сложной вихревой структурой течения в ячейках матрицы, которое формируется в подканалах между ребрами на противоположных стенках (рис. 1). Малые масштабы ячеек (как правило, единицы миллиметров), а также 3D-характер течения затрудняют использование традиционных контактных методов диагностики для получения достоверных результатов.

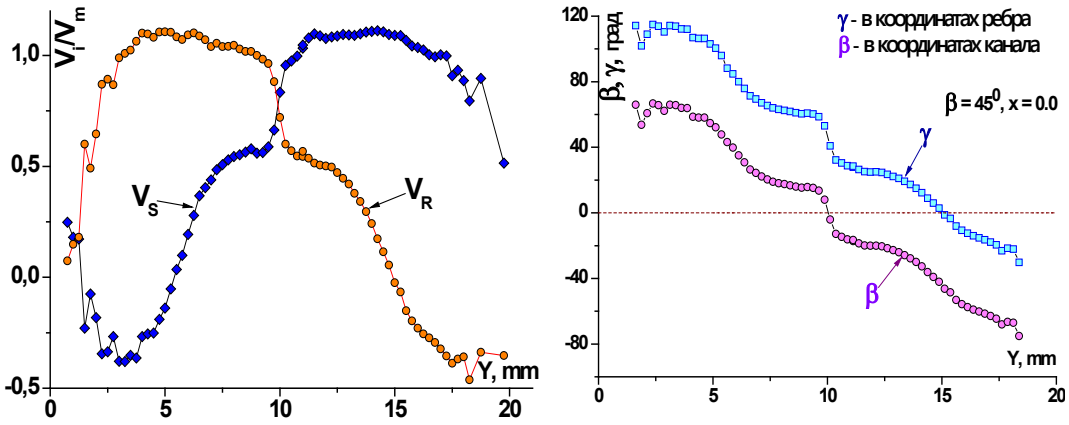


Рис. 2. Распределение скорости и угла скоса потока вдоль подканалов матрицы

Только в последние годы использование оптических методов позволило детально рассмотреть структуру течения в матрице [7] (рис. 2). Течение в подканалах оказалось антисимметричным относительно оси, а направление потока меняется по высоте всей матрицы. Активно начали развиваться и численные методы исследования [8; 9], хотя для их валидации необходимы экспериментальные данные по локальным параметрам.

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 24-19-00358.

Список источников

1. Нагога Г. П., Копылов И. С., Рукин М. В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов // Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей. Казань, 1989. С. 35–41.

2. Копылов И. С., Нагога Г. П. Теплообмен, гидросопротивление и макроструктура потока в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов // Тепломассообмен – ММФ. Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР,1991. С. 47–52.

3. Соколов Н. П., Полищук В. Г., Андреев К. Д., Забелин Н. А., Рассохин В. А. Гидравлика и теплообмен в компланарных каналах. СПб., 2013. 210 с.

4. Howard C. P. Heat-transfer and flow-friction characteristics of skewed-passage and glass-ceramic heat-transfer surfaces // J. Eng. Power. 1965. 87 (1). Pp. 72–86.

5. Александренков В. П. Теплогидравлическая эффективность применения компланарных трактов охлаждения камер ЖРД // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 101 (2). С. 44–56.

6. Харитонов В. В. Теплофизика лазерных зеркал. М. : Изд-во МИФИ, 1993. 152 с.

7. Золотухин А. В., Чохар И. А., Терехов В. И. Экспериментальное исследование турбулентной структуры течения в ячейке решетчатой матрицы // Теплофизика и аэромеханика. 2022. № 29 (6). С. 1071–1078.

8. Barsukov A. V., Terekhov V. V. & Terekhov V. I. Numerical study of heat transfer in a lattice matrix with varying the crossing angle. J. Eng. Thermophys. 33, 220–229. 2024.

9. Du W., Luo L., Wang S., Liu J., Sunden B. Heat transfer and flow structure in a latticework duct with different sidewalls. J. Heat Transfer. 141 (12). 124502. 2019.

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А. Н. Тугов

АО «Всероссийский теплотехнический институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводской проезд, д. 4/1
EANTugov@vti.ru

Дано понятие энергетической утилизации отходов. Отмечается, что за последние тридцать лет произошел качественный скачок в развитии установок по термической переработке твердых коммунальных отходов: от мусоросжигательных заводов до современных предприятий для энергетической утилизации отходов – ТЭС на ТКО. Поскольку все проблемы экологически безопасной эксплуатации таких ТЭС в настоящее время полностью решены, основные исследования сейчас направлены на повышение их энергоэффективности и возможности отпуска потребителю теплоты и электроэнергии в переменном режиме. На примере недавно построенной ТЭС на ТКО в Московской области показан современный мировой уровень технологии энергетической утилизации ТКО.

Под энергетической утилизацией отходов, в т. ч. твердых коммунальных отходов (ТКО), обычно понимают их термическую переработку, в результате которой энергопотенциал отходов преобразуется в тепловую и/или электроэнергию с последующим отпуском этой энергии потребителю. При этом должны соблюдаться определенные условия. Например, в ЕС термическую переработку ТКО приравнивают к утилизации только в том случае, если энергоэффективность предприятия, рассчитанная по методике европейской Директивы 2008/98/ЕС, составляет не менее 0,65 [1]. В России критерии, определяющие термический способ переработки отходов как энергетическую утилизацию, установлены Справочником ИТС 9–2020 [2]. Фактически современное предприятие, на котором реализована технология энергетической утилизации ТКО, – это тепловая электростанция, а основным топливом являются отходы (ТЭС на ТКО). За рубежом такие ТЭС называют WtE (Waste-to-Energy Plant).

По состоянию на начало 2024 г. в мире насчитывалось более 2 800 установок WtE, на которых ежегодно сжигается около 576 млн т ТКО. По оценкам [3], к 2033 г. их количество увеличится до 3 100, а суммарная производительность превысит 700 млн т в год. Общая электрическая мощность всех WtE сейчас составляет примерно 24 ГВт.

Рассматривая современный уровень технологий термической переработки ТКО, следует отметить колоссальный скачок в их развитии: от завода для огневого обезвреживания отходов с очисткой дымовых газов только с использованием электрофильтра в начале 1990-х гг. до современных WtE, не представляющих фактически никакой опасности для окружающей среды и здоровья человека.

В [4] отмечается, что поскольку все проблемы экологически безопасной эксплуатации ТЭС на ТКО в настоящее время полностью решены, основные исследования сейчас направлены на создание системы газоочистки с низкими капитальными и эксплуатационными затратами и минимальным количеством образующихся остатков.

Рассматривая WtE как энергетический объект, отметим, что важным вопросом является возможность отпуска теплоты и электроэнергии в определенном регулируемом диапазоне изменения нагрузки, задаваемой потребителем. Сейчас это условие является определяющим фактором успешного функционирования ТЭС на ТКО. Большое внимание специалисты уделяют также вопросу повышения коэффициента

© Тугов А. Н., 2025

использования тепла топлива (преобразования энергопотенциала ТКО в тепло и электроэнергию) [5].

Практически все последние достижения в области энергетической утилизации реализованы на недавно построенной ТЭС на ТКО в Воскресенском районе Московской области (производительность 700 тыс. т ТКО/год, установленная электрическая мощность 70 МВт). Краткое описание этой ТЭС приводится в [5].

На ТЭС реализована технология слоевого сжигания на механической наклонно-переталкивающей колосниковой решетке, которая, по сравнению с другими способами термической переработки отходов (сжигание в кипящем слое, газификация, пиролиз), имеет максимальную энергоэффективность при сопоставимом воздействии на окружающую среду. Выбранная конструкция решетки (фирмы Von Roll) позволяет осуществлять качественное сжигание в автоматическом режиме без участия оператора в широком диапазоне изменения характеристик отходов. На ТЭС применен низкозатратный полусухой метод очистки дымовых газов, основу которого составляет процесс ввода в дымовые газы увлажненного рециркулята – сорбента, который на сегодняшний момент является оптимальным как по обеспечению требуемых значений выбросов загрязняющих веществ, так и по показателям энергоэффективности ТЭС в целом. Приняты достаточно высокие (для таких ТЭС) параметры пара: 430 °С и 7 МПа. Только за счет перечисленных технических решений данная ТЭС полностью соответствует критериям отнесения ее к предприятиям для энергетической утилизации в соответствии с [1; 2].

В зависимости от теплоты сгорания отходов и требуемой электрической мощности турбинной установки, на ТЭС имеется возможность регулировать тепловую мощность (N) каждой технологической линии (всего их три) в диапазоне от 45 до 76 МВт. Производительность по сжигаемым отходам ($B_{ТКО}$) также можно изменять от 21 до 33 т/ч (рис. 1).

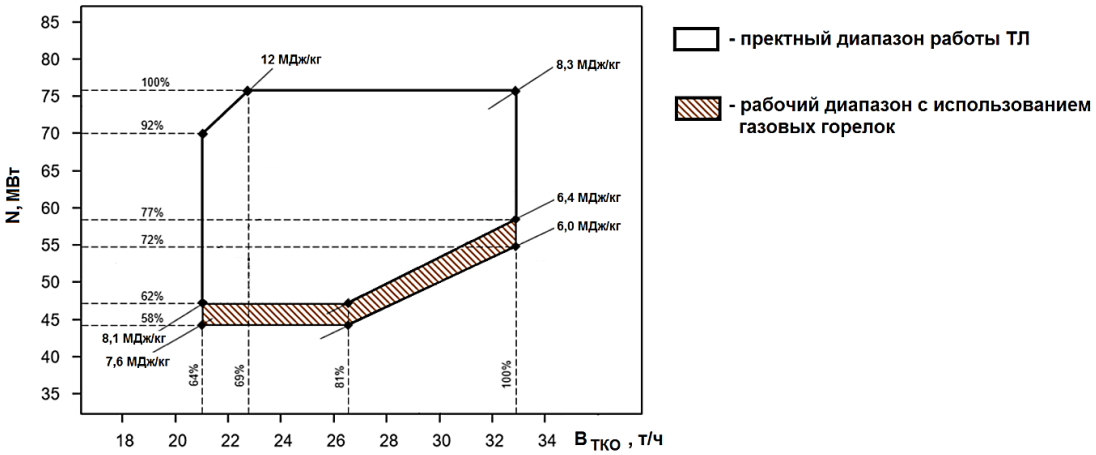


Рис. 1. Диаграмма мощности одной технологической линии (ТЛ) ТЭС на ТКО в Московской области

В феврале завершилось комплексное опробование данной ТЭС на ТКО с выходом на проектную электрическую мощность. Приемочные (гарантийные испытания) намечены на лето. В 2026–2027 гг. запланирован ввод в эксплуатацию еще трех аналогичных ТЭС в Наро-Фоминском, Ногинском и Солнечногорском районах Московской области.

Список источников

1. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives [Text with EEA relevance] // Official J. European Union, 2008.

2. Справочник НДТ ИТС 9-2020. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами : утв. приказом Росстандарта от 23.12.2020 № 2181 // Фед. агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Бюро НДТ, 2020.

3. Waste to Energy 2024/2025. URL: https://ecoprog.com/publications/data-wte.

4. Тугов А. Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. 2021. № 1. С. 3–20.

5. Тугов А. Н. Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт: обзор // Теплоэнергетика. 2022. № 12. С. 5–22.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В АТМОСФЕРЕ АЗИМУТАЛЬНО ОДНОРОДНОЙ ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОГО ТИПА

П. Г. Фрик[1], А. Н. Сухановский[1], Р. А. Степанов[1], А. В. Быков[1, 2], А. Л. Ветров[2], Н. А. Калинин[1, 2]

[1] Институт механике сплошных сред УО РАН
614018, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
[2]Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15
** frick@icmm.ru*

Представлены результаты численного моделирования атмосферы идеализированных планет, которые, с одной стороны, точно воспроизводят реальные характеристики Земли, а с другой – предельно упрощают конфигурацию континентов и океанов, полностью игнорируя топологию реальной планеты. Рассмотрены примеры пустынной планеты, аквапланеты и планеты, на которой океан занимает экваториальную область (во всех случаях планета азимутально однородна). Показано, что сохранение относительно небольшого экваториального океана на фоне плоской пустынной планеты достаточно для воспроизведения общей циркуляции атмосферы и динамики среднеширотных волновых и вихревых структур, планетарного и синоптического масштабов, реалистичных для Земли.

Рассматривается модель земной атмосферы, которая точно воспроизводит реальные характеристики Земли, но предельно упрощает конфигурацию континентов и океанов, полностью игнорируя топологию реальной планеты [1]. Целью исследования в данной постановке является анализ формирования крупномасштабных среднеширотных вихрей и волн на зонально однородной плоской планете с энергетическим балансом и свойствами атмосферы, аналогичными земным. Показано, что сохранение относительно небольшого экваториального океана на фоне плоской пустынной планеты достаточно для воспроизведения общей циркуляции атмосферы и динамики среднеширотных волновых и вихревых структур, планетарного и синоптического масштабов, реалистичных для Земли [2].

Система хорошо воспроизводит не только пространственную структуру бароклинных волн, но и их сезонную динамику, включая изменчивость спектрального состава наблюдаемых волн. Моды с волновыми числами 3–8 содержат основную часть энергии пульсаций. Спектры для высших мод характеризуются степенным законом с наклоном «–3,5» для зимнего сезона и «–3» для летнего сезона. В течение бароклинного сезона происходит уменьшение доминирующего волнового числа от $m = 7$ до $m = 4$.

Выявлена значительная временная вариация фазовой скорости с двумя отчетливыми стадиями монотонного увеличения и уменьшения. Между началом постепенного увеличения фазовой скорости для разных мод существует временной разрыв. Высшие моды начинают ускоряться раньше, в результате чего низшие моды движутся медленнее высших.

Выполнен анализ процессов тепломассопереноса в атмосфере пустынной планеты, полностью обводненной (аквапланеты) и планеты с экваториальным океаном. Результаты численного моделирования атмосферы каждой планеты в течение четырех лет, проведенного на основе пакета WRF, сравнивались с результатами расчетов, проведенных этим же пакетом для реальной Земли и результатами реанализа атмосферы Земли для такого же периода времени.

© Фрик П. Г., Сухановский А. Н., Степанов Р. А., Быков А. В., Ветров А. Л., Калинин Н. А., 2025

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Список источников

1. Быков А. В., Ветров А. Л., Фрик П. Г., Сухановский А. Н., Калинин Н. А., Степанов Р. А. Численное моделирование предельных состояний планетарной атмосферы // Географический вестник. 2023. № 4 (67). С. 85–98.

2. Sukhanovskii A., Stepanov R., Bykov A., Vetrov A., Kalinin N., Frick P. Mid-latitude baroclinic waves in a zonally homogeneous Earth-like planet // Climate Dynamics. 2025. V. 63. N. 1.74.

Секция 1
Тепловая энергетика

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАСТОПОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ

А. Г. Батухтин*, С. Г. Батухтин, М. Г. Барановская

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
**batuhtina_ir@mail.ru*

На основе результата расчетов процессов безмазутной растопки котла из любого теплового состояния и стабилизации горения пылеугольного факела в топке, а также опыта эксплуатации аналогичных горелок на теплоэлектростанциях предложен проект растопочной горелки для плазменно-топливной системы. За основу конструкции принят вариант с футеровкой проточной части из огнеупорных колец. Сегмент проточной части горелки в месте установки патрубка плазмотрона имеет водяное охлаждение и выполнен из стали.

Растопочные горелки предназначены для работы в нескольких режимах: для безмазутной растопки котла из любого теплового состояния; для стабилизации горения пылеугольного факела в топке в случае использования топлива ухудшенного качества и при работе котла на низких нагрузках; в качестве основных горелок. Поскольку растопочные горелки будут длительное время работать в основном режиме (для подачи угольной пыли в топку котла), форма их проточной части, расположение и ориентация должны быть идентичны аналогичным характеристикам штатных сопел аэросмеси. Кроме того, растопочные горелки должны соответствовать специфическим требованиям, определяемым технологией плазменного воспламенения угля [1; 2].

Как свидетельствует опыт эксплуатации плазменной системы безмазутной растопки с использованием Тугнуйского угля, растопка котла может быть осуществлена при помощи четырех растопочных горелок с плазмотронами мощностью 70 кВт, взрывобезопасность такого режима растопки подтверждена результатами исследований [3], но скорость набора параметров котла при этом недостаточно высока. При разработке и создании плазмотрона «Циклон-800» и системы его электроснабжения мощность может быть понижена до 120 кВт, что соответственно повысит производительность и тепловую мощность растопочных горелок.

Для установки растопочных горелок на место штатных сопел аэросмеси необходимо, чтобы их наружный диаметр не превышал 430 мм, а общая длина – 2 500 мм. Проточная часть горелок должна быть выполнена из материала с рабочей температурой применения не менее 1 400°С и устойчивого к абразивному износу.

Проектирование растопочной горелки производилось на основе расчетов процесса и опыта эксплуатации аналогичных горелок на теплоэлектростанциях. Диаметр канала аэросмеси сохранен таким же, как в штатных соплах. За основу конструкции растопочных горелок принят вариант с футеровкой проточной части из огнеупорных колец. Кольца устанавливаются в трубу Ø426 × 6 мм из стали 20, толщина стенки – 25 мм. Кольца изготавливаются из огнеупорного шамота (класс «А» ГОСТ 390–54); допускается применение других огнеупорных материалов (на основе Al_2O_3, MgO, ZrO_2) с рабочей температурой не менее 1 500 °С и плотностью не менее 1,8 кг/м^3. Сегмент проточной части горелки в месте установки патрубка плазмотрона имеет водяное охлаждение и выполнен из стали 12Х18Н10Т. В такой конструкции исключаются керамические изделия сложной формы (кольцо с боковым отверстием).

Перед установкой горелок на котел необходимо произвести опрессовку водяной камеры при давлении 6–8 атм с осмотром всех сварных швов. Растопочные горелки

© Батухтин А. Г., Батухтин С. Г., Барановская М. Г., 2025

устанавливаются в средние сопла горелок нижнего яруса (по 4 шт.) и соединяются с пылепроводами мельницы (рис. 1).

В процессе растопки котла, при переходе на основные горелки первыми должны включаться пылесистемы, имеющие сопла, примыкающие к растопочным горелкам.

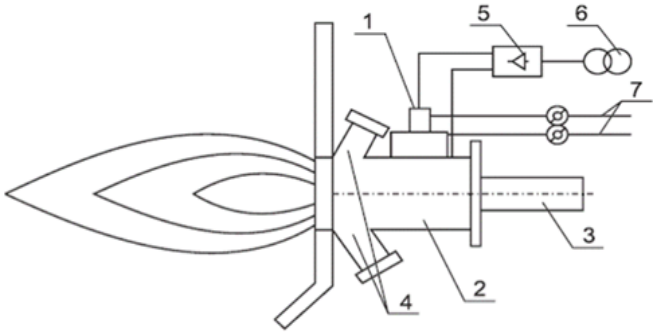


Рис. 1. Схема устройства плазмотрона с муфелизированным участком пылепровода горелки:
1 – плазмотрон; *2* – муфель; *3* – пылепровод к горелке; *4* – сопло пылеугольной горелки;
5 – источник электропитания; *6* – трансформатор; *7* – системы водовоздухоснабжения [4]

При установке горелок в амбразуры патрубки плазмотронов наклоняются на угол 15–40° в направлении от мельницы. Это связано со смещением области максимальной концентрации пыли в сечении пылепровода в эту сторону, вследствие его поворотов. Поскольку длина горелок (2 485 мм) превышает длину штатных сопел аэросмеси, при их установке ближний к топке шарнир пылепровода смещается в направлении поворота пылепровода, т. е. от топки.

Таким образом, получены данные для проектирования растопочной горелки плазменно-топливной системы безмазутного розжига угольного топлива, что можно использовать для создания натурного стенда и подготовки технической документации для внедрения.

Исследование поддержано государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 10230222000-2-2.7.3 (ЕГИСУ НИОКТР), тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Список источников

1. Мессерле А. В., Мессерле В. Е., Устименко А. Б. Плазменная термохимическая подготовка к сжиганию пылеугольного топлива // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 3. С. 366–374.

2. Бурдуков А. П., Чернецкий М. Ю., Дектерев А. А., Чернецкая Н. С. Исследование оптимальной конструкции горелочного устройства для обеспечения устойчивости аэродинамической структуры потока в горелке и интенсификации процессов смешения в зоне горения // Ползуновский вестник. 2012. № 3-1. С. 55–61.

3. Толчинский Е. Н., Колбасников В. А. Инженерный метод оценки критерия взрываемости пыли твердых натуральных топлив // Электрические станции. 1999. № 3. С. 2.

4. Энергосберегающие системы растопки и подсветки факела топочных камер котлов: монография / В. А. Дубровский, М. В. Зубова. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2012. 187 с.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЛАЖНЫХ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОПКАМ ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

Ж. А. Косторева*, А. А. Омаров, С. В. Сыродой

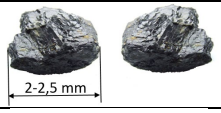
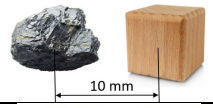
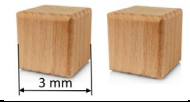
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
660074, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** zhanna.kostoreva@yandex.ru*

Снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет сжигания умеренно увлажненных частиц угля.

Цель данной работы – экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых (испарение влаги) и термохимических (взаимодействие горючего и окислителя, образование антропогенных продуктов горения) превращений при зажигании частиц сухих и влажных углей совместно с частицами древесной биомассы разной влажности. Установлено, что увлажнение углей (частично 50 % смеси или 100 % смеси), а также добавление к углю частиц древесной биомассы (сухой и увлажненной) приводит к снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду (табл. 1).

Таблица 1

Исследуемые составы топлив

Номер состава	Состав топлива	Конфигурация
1	Сухой уголь + Сухой уголь	
2	Сухой уголь + Увлажненный уголь	
3	Увлажненный уголь + Увлажненный уголь	
4	Сухой уголь + Сухая древесина	
5	Сухой уголь + Влажная древесина	
6	Увлажненный уголь + Влажная древесина	
7	Сухая древесина + Сухая древесина	

На рис. 1 приведена гистограмма, характеризующая среднее (по времени горения) значение концентраций одного из основных антропогенных газов – оксида серы.

© Косторева Ж. А., Омаров А. А., Сыродой С. В., 2015

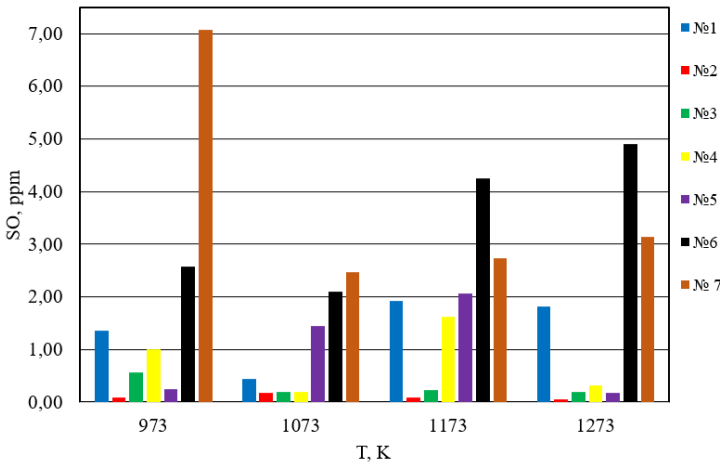


Рис. 1. Средние по времени концентрации оксида серы (SO, ppm) в газообразных продуктах горения в малой окрестности древесно-угольной смеси при различных температурах окислителя (T, K) для разных составов топлива

Исследования, приведенные в работе, обосновывают возможность использования в теплоэнергетике в качестве основного топлива увлажненных углей совместно с древесной биомассой.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 23-79-01067.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АГЛОМЕРАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАПЕЛЬ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ

А. Клименко*, Н. Е. Шлегель

Томский политехнический университет
660074, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 30
** ayk40@tpu.ru*

Одним из наиболее распространенных методов очистки газов является мокрое пылеулавливание, которое находит применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургия, химическая промышленность и энергетика. Необходимым условием пылеподавления выступает захват твердых частиц каплями диспергированной жидкости. Целью настоящей работы являлось определение характеристик процессов агломерации при соударении капель воды с угольными частицами. Установлено, что изменение влажности среды от 45 до 95 % привело к увеличению скорости растекания капли на 2–5 %, а диаметр растекания капли возрос на 5–10 %.

В настоящее время одними из наиболее распространенных загрязнителей воздуха являются различного рода пыли, содержащиеся в технологических газах [1]. Поэтому пылеулавливающие установки – важная часть многих технологических процессов. Одним из наиболее распространенных методов очистки дымовых газов является мокрое пылеулавливание, которое применяется в металлургии, энергетике и химической промышленности [2; 3]. При таком методе захват твердых частиц каплями диспергированной жидкости – необходимое условие пылеподавления. В связи с этим актуально исследование процесса агломерации, происходящего при столкновении капель и частиц [4; 5]. Помимо этого, одним из ключевых аспектов, определяющих исход взаимодействия, является состав газовой фазы. Содержание водяных паров в газовой среде – одна из важнейших характеристик, влияющих на эффективность процесса захвата частиц [6].

Целью настоящей работы являлось определение характеристик процесса агломерации при соударении капель воды с частицами угля. Методика проведения экспериментальных исследований подробно рассмотрена в работе [7].

В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с известными и стабильными свойствами (плотность $\rho = 998$ кг/м^3; поверхностное натяжение $\sigma = 72{,}7$ мН/м; динамическая вязкость $\mu = 8{,}9 \cdot 10^{-4}$ Па·с). В качестве твердых частиц использовался измельченный каменный уголь марки Т ($\rho = 1\,340$ кг/м^3, пористость 0,21, зольность 11 %). В табл. 1 представлены условия проведения экспериментов при варьировании влажности окружающей среды.

Таблица 1

Условия проведения экспериментальных исследований

Условие	1	2	3
Относительная влажность, %	95	65	40
Абсолютная влажность, г/м^3	28,4	13,7	9,2

На рис. 1 представлены зависимости диаметра (D_i) и скорости (U_i) растекания от времени при варьировании влажности окружающей среды. Установлено, что изме-

© Клименко А., Шлегель Н. Е., 2025

нение относительной влажности среды от 45 до 95 % привело к увеличению скорости растекания капли на 2–5 %, а диаметр растекания капли возрос на 5–10 %.

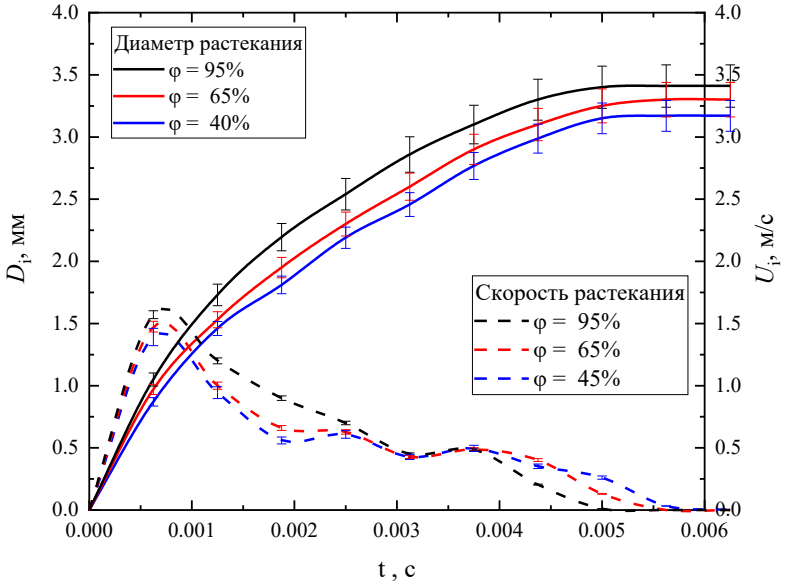


Рис. 1. Зависимости диаметра и скорости растекания от времени при варьировании относительной влажности (радиус капли R_d = 1 мм, радиус частицы R_p = 1,5 мм, начальная скорость взаимодействия U_d = 0,4 м/с)

Стоит отметить, что при столкновении капли с сухой частицей угля при нормальных условиях поры и неровности поверхности выступают в виде энергетический барьеров. Вследствие частичной конденсации пара из-за повышенной температуры среды, силы вязкостного трения при взаимодействии капли с твердой поверхностью уменьшаются [8]. Сконденсированная жидкость заполняет выступы и неровности поверхности. В результате коэффициент трения при столкновении капли воды с сухой частицей при низкой влажности значительно выше, чем при повышенной влажности. Таким образом абсорбция нового слоя воды на частице оказывает влияние на энергию вязкой диссипации капли, что приводит к увеличению диаметра растекания (рис. 1).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10040 (https://rscf.ru/project/23-71-10040).

Список источников

1. Чистяков Я. В., Махнин А. А., Гурылёва Н. Л., Володин Н. И. Исследование процесса пылеулавливания в центробежно-инерционных аппаратах // Экология и промышленность России. 2013. № 11. С. 8–11.

2. Ежова Н. Н., Власов А. С., Делицын Л. М. Современные методы очистки дымовых газов // Экология и промышленность России. 2016. № 2. С. 50–57.

3. Li G., Hu J., Chen S. A review of dust control/removal methods in metal mines in China // Powder Technology, Vol. 430, pp. 119035, 2023.

4. Donahue C. M., Davis R. H., Kantak A. A., Hrenya C. M. Mechanisms for agglomeration and deagglomeration following oblique collisions of wet particles // Phys. Rev., vol.86(2), pp. 021303, 2012.

5. Charalampous G., Hardalupas Y. Collisions of droplets on spherical particles // Physics of Fluids, Vol. 29 (10), pp. 103305, 2017.

6. Shanthanu S., Raghuram S., Raghavan V. Transient evaporation of moving water droplets in steam–hydrogen–air environment // Int. J. Heat Mass Transf., Vol. 64, pp. 536–546, 2013.

7. Klimenko A., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // Energy, Vol. 283, pp. 128480, 2013.

8. Chen S., Li S. Collision-induced breakage of agglomerates in homogenous isotropic turbulence laden with adhesive particles // Journal of Fluid Mechanics, Vol. 902, pp. A28, 2020.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ CO_2-ЦИКЛОВ С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ МЕТАНА

И. С. Садкин[1, 2*], П. А. Щинников[1]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** sadkinvanya@mail.ru*

В работе рассматриваются характеристики работы энергоблоков на основе CO_2-циклов различной архитектуры. Представлены результаты термодинамического, энергетического и технико-экономического анализа производства электроэнергии с нулевыми выбросами на основе энергоустановок на углекислом газе с кислородным сжиганием метана.

Цель исследования – рассмотрение различных конфигураций кислородно-топливных энергетических циклов с использованием сверхкритического диоксида углерода в качестве рабочего тела и соответствующих энергоблоков на их основе с определением взаимосвязанных термодинамических, энергетических и технико-экономических характеристик в зависимости от архитектуры и параметров цикла. Задачей анализа является выявление основных закономерностей и оптимальных конфигураций углекислотной установки по критерию эффективности производства электроэнергии с нулевыми выбросами в атмосферу.

В основе базовых технологических решений лежит сжигание газообразного топлива в кислороде с получением в качестве продуктов сгорания CO_2 и H_2O, из которых образуют рабочее тело цикла. Воду выводят из цикла в системе регенерации в процессе ее конденсации, а избыток CO_2 направляют на захоронение. Чистота углекислого газа, как и степень его улавливания, в данном случае стремится к 100 %.

Принятые к рассмотрению варианты цикла [1] представлены на рис. 1.

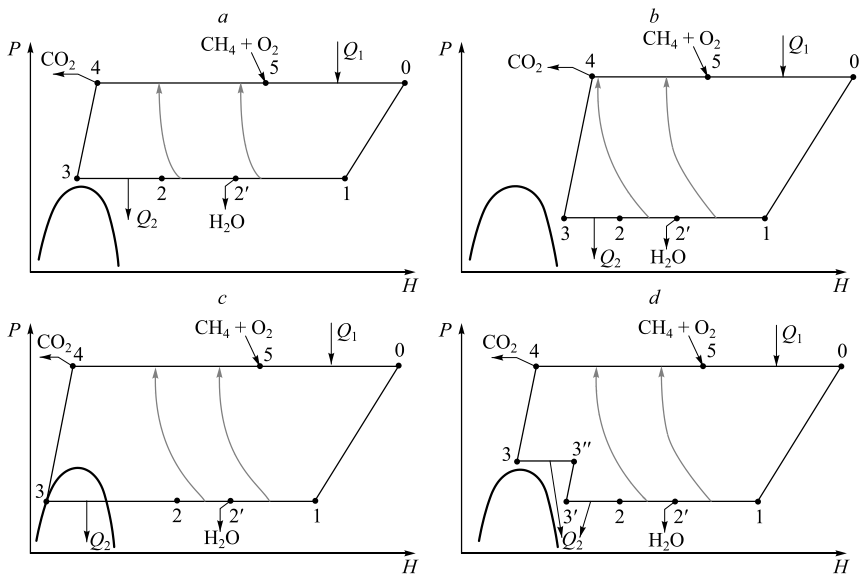


Рис. 1. Рассматриваемые варианты базовых конфигураций энергетического цикла на сверхкритическом углекислом газе с кислородным сжиганием топлива

© Садкин И. С., Щинников П. А., 2025

Различия в организации термодинамического цикла ведут к различному составу оборудования энергоблока на его основе, что сказывается на энергопотреблении собственных нужд и конечной эффективности производства электроэнергии. К сравнению, помимо различных вариантов цикла на углекислом газе, приняты технологии на основе циклов: Ренкина (при его реализации в виде технологии сверхкритических и суперсверхкритических параметров); Брайтона в виде газотурбинной установки; Брайтона – Ренкина в виде парогазовой установки. Сравнение осуществляется с учетом полного улавливания CO_2 в установках на основе энергетических циклов на углекислом газе и возможности оснащения традиционных энергоблоков системами захвата 90 % CO_2 из дымовых газов. Эффективность традиционных технологий принимается на уровне наилучших мировых образцов.

В результате проведенных исследований [1–4] получено, что в базовых конфигурациях CO_2-циклы имеют КПД выработки электроэнергии 65–73 % при параметрах на входе в турбину 1 150 °С, 30 МПа, превосходя все традиционные энергоблоки.

Коэффициент собственных нужд CO_2-энергоблоков находится на уровне 22–50 % в зависимости от конфигурации и параметров, что делает их менее выгодными по показателю отпуска электроэнергии, чем ПГУ, но предпочтительнее ГТУ, СКП и ССКП с технологиями улавливания и хранения углерода (CCS).

Основной вклад в собственные нужды составляют затраты электроэнергии на производство кислорода (12,8–16 %) от полной мощности установки и на привод компрессоров (от 8–10 до 23–32 %).

По энергетическим показателям варианты установок в бескомпрессорном исполнении выглядят предпочтительнее, чем варианты, где повышение давления обеспечивается при помощи компрессоров.

Затраты энергии на улавливание и отвод углекислого газа в CO_2 циклах не превышают 1,5 %, тогда как в традиционных технологиях затраты на CCS могут доходить до 12–20 %. Эмиссия углекислого газа для CO_2-циклов составляет 100–140 г/МДж, выше, чем для ПГУ. Однако технологическая схема CO_2-циклов позволяет улавливать до 100 % углекислоты с давлением до 30 МПа против 90 % в установках CCS.

Удельные капиталовложения в CO_2-технологии составляют 950–1400 $/кВт в зависимости от вида технологической схемы, начальных параметров и единичной мощности установок. Для установки мощностью 100 МВт показатель удельных капиталовложений лежит в интервале 1150–1350 $/кВт при изменении температуры от 900 до 1400 °С и 1050–1300 $/кВт при изменении давления от 15 до 30 МПа. Наименьшими показателями удельной стоимости обладает цикл Аллама – 950–1150 $/кВт, что сопоставимо со стоимостью ПСУ без улавливания CO_2, превосходит технологии СКП и уступает только ПГУ. Стоимость криогенной воздухоразделительной установки для производства кислорода составляет 24–34 % от полной стоимости энергоблока и является самым дорогостоящим элементом технологии, на втором месте – теплообменное оборудование. Увеличение единичной мощности от 100 до 500 МВт ведет к снижению удельных капиталовложений до 25–30 %.

Себестоимость производимой электроэнергии в долларовом эквиваленте составляет 6–9,5 центов за кВтч, причем для вариантов цикла с ограниченным использованием компрессора данная величина составляет 6–8 центов. Себестоимость снижается по мере роста температуры рабочего тела для всех вариантов исполнения цикла. Наименьшей себестоимостью обладают энергоблоки на базе цикла Аллама и цикла с конденсацией.

Список источников

1. Алексеенко С. В., Щинников П. А., Садкин И. С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO_2-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 89–98.

2. Sadkin I. S., Korepanova E. M., Shchinnikov P. A. On Temperature of Working Fluid Supply to Combustion Chamber in CO_2 Power Cycles with Oxy-Combustion of // Journal of Engineering Thermophysics. 2023. Vol. 32, No. 4. P. 816–823. DOI 10.1134/s1810232823040136

3. Sadkin I. S., Shchinnikov P. A. Influence of the Proportion of the Working Fluid Renewal on Semi-closed Oxy-Fuel sCO_2 Power Cycles Efficiency Indicators // Arabian Journal for Science and Engineering. 2024. DOI 10.1007/s13369-024-09286-x

4. Sadkin I. S., Borush O. V., Shchinnikov P. A. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO_2 power plants // Energy Conversion and Management. 2025. Vol. 323. Art. No. 119266. DOI 10.1016/j.enconman.2024.119266

ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ CO_2-ЦИКЛОВ ЗА СЧЕТ СТУПЕНЧАТОГО ПЕРЕГРЕВА РАБОЧЕГО ТЕЛА

А. П. Тамаренко*, И. С. Садкин, П. А. Щинников

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** artem.tamarenko@cotes-e.ru*

В работе исследуются CO_2-циклы со ступенчатым перегревом рабочего тела. За основу принят цикл с двухступенчатым повышением давления. Подвод энергии к рабочему телу обеспечивается за счет работы системы регенерации и сжигания топлива. В качестве топлива используют метан при кислородном сжигании. Новизной работы является промежуточный перегрев рабочего тела. Рассматриваются вопросы использования теоретически возможных давлений и температур при ступенчатом перегреве. Это исследование позволит установить физические величины в виде давлений, температур, необходимых для дальнейших исследований CO_2-циклов со ступенчатым перегревом.

В условиях Парижских соглашений по климату в мировой энергетике получили развитие технологии, позволяющие снизить углеродный след при использовании ископаемого топлива [1; 2]. Для этого разрабатываются технологии, которые дают возможность сократить выброс CO_2 в окружающую среду или исключить его полностью. Одним из таких решений являются кислородно-топливные энергетические циклы на углекислом газе в качестве рабочего тела [3; 4].

В работе рассмотрен термодинамический CO_2-цикл с двухступенчатым подъемом давления и одноступенчатым перегревом рабочего тела. Схема цикла представлена на рис. 1. Возможная схема реализации перегрева представлена на рис. 2.

Задачей исследования является установление термодинамических параметров и количественных оценок тепловых потоков, подводимых к рабочему телу в процессе 5-0, 0’-1’ (рис. 1). Кроме того, стоит цель определить допустимые значения давлений и температур, которые можно использовать в расчетах и оценке циклов с промежуточным перегревом.

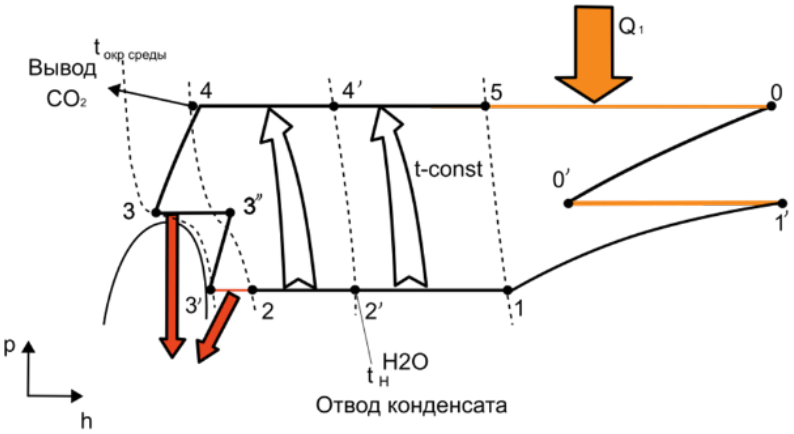


Рис. 1. Термодинамический CO_2-цикл с одноступенчатым перегревом рабочего тела

© Тамаренко А. П., Садкин И. С., Щинников П. А., 2025

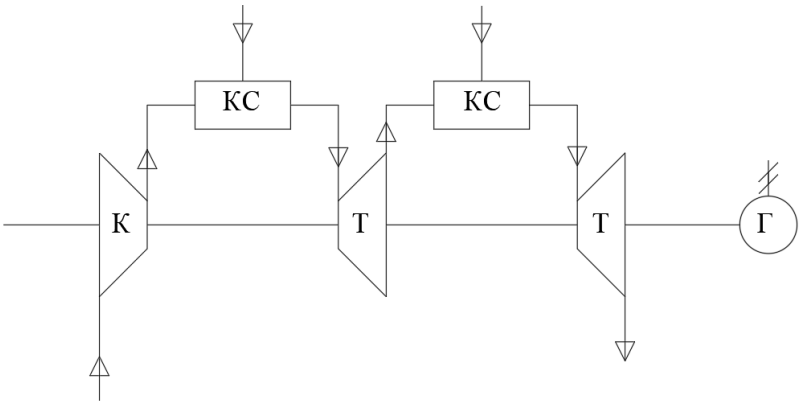


Рис. 2. Часть схемы CO_2-цикла с одноступенчатым перегревом рабочего тела:
КС – камера сгорания, К – компрессор, Т – турбина, Г – генератор.

В основе метода исследования приняты следующие допущения [4; 5]:

– все процессы проходят без теплообмена с окружающей средой;

– потерями в агрегатах пренебрегают;

– в качестве топлива используется метан;

– свойства рабочего тела определяются свойствами CO_2, так как его массовая доля превышает 95 % [5];

– температура подвода рабочего тела к камере сгорания не может превышать температуру на выходе из турбины.

Одним из базовых факторов сравнения разных энергетических установок является их термодинамический анализ и выявление характерных особенностей. Для определения возможных значений параметров давления и температур рабочего тела при промежуточном перегреве в первой итерации проводится сравнение с паровым котлом.

Давление, при котором значение КПД максимально, зависит от начальных и конечных параметров цикла. Оптимальное значение КПД устанавливается, когда:

– при одноступенчатом промежуточном перегреве

$$P_{0'} = (0{,}15 - 0{,}30) \cdot P_0;$$

– при двухступенчатом промежуточном перегреве

$$P_{0''} = (0{,}10 - 0{,}12) \cdot P_0,$$

где P – давление.

Преимущества использования установки на основе CO_2-цикла со ступенчатым перегревом:

– повышение термодинамической эффективности;

– отсутствие выбросов CO_2 в атмосферу;

– замкнутость контуров;

– минимальное количество воды в технологических цепочках.

Недостатки использования CO_2-цикла со ступенчатым перегревом:

– усложнение технологической схемы;

– более трудозатратное и требующее специальных навыков проектирование газовых турбин, работающих на диоксиде углерода;

– нехватка знаний и информации для налаживания постоянной работы цикла Аллама, чтобы создать серийное производство данной технологии.

Термодинамические значения рабочего тела в расчетных точках определяют по программам CoolPack и WaterSteamPro. При определении тепловых потоков учитывают средние для процесса значения изобарной теплоемкости CO_2.

Таким образом, исследование энергетических циклов на углекислом газе со ступенчатым перегревом может оказаться востребованным для решения проблем декарбонизации.

Список источников

1. IEA, Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, 2021. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2 (accessed 2023-01-21).

2. Об ограничении выбросов парниковых газов : Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013 (дата обращения: 03.01.2023).

3. Wimmer K., Sanz W. Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle // International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, Vol. 99, art.no. 103055. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103055.

4. Алексеенко С. В., Щинников П. А., Садкин И. С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO_2-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 89–98.

5. Sadkin I. S., Shchinnikov P. A. Influence of the Proportion of the Working Fluid Renewal on Semi-closed Oxy-Fuel sCO_2 Power Cycles Efficiency Indicators // Arabian Journal for Science and Engineering. 2024. DOI 10.1007/s13369-024-09286-x.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

В. Р. Жихарева*, С. Н. Петин,
М. А. Кислицын, Н. М. Бонадыков

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14
** zhilera@mail.ru*

Затрагивается вопрос увеличения доли водорода (H_2) в топливе. Рассмотрен вариант полезного использования газовых отходов от нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Изучена конструкция и принцип работы 3-ходового газотрубного водогрейного котельного агрегата VIESSMANN Vitomax 200HW и горелочного устройства «Weishaupt» G70/3-A-ZM-NR (W-FM 100/200). Проведены расчеты процесса горения и каждой теплообменной поверхности котла. По полученным результатам можно сделать вывод, что увеличение доли водорода в топливе до 70–85 % позволит снизить выбросы CO_2 в атмосферу на 40–55 % и повысить КПД котла на 1 %.

В последнее время происходит ускоренное развитие альтернативной энергетики, в частности водородной [1]. Перспективным решением для снижения выбросов CO_2 является переход на водородное топливо (H_2).

В работе [2] отмечается, что на современных нефтеперерабатывающих заводах определенной конфигурации наблюдается неэффективно сжигаемый избыток водородсодержащего газа, содержание водорода в котором находится в диапазоне 70–85 % об. Учитывая факт относительно низкого уровня использования первичных энергоресурсов на НПЗ, потенциальная возможность полезного использования подобных сбросных газов нуждается в проработке.

Целью данной работы является исследование особенностей теплотехнических параметров при переходе на сжигание МВС с различным содержанием водорода в топливе. В качестве объекта исследования был выбран 3-ходовой газотрубный водогрейный котел VIESSMANN Vitomax 200HW тип M238 с проходной топочной камерой, который оборудован горелками «Weishaupt» G70/3-A-ZM-NR (W-FM 100/200), установленный на ТЭЦ с газопоршневыми генераторными установками [3], с получением данных при проведении теплового расчета.

Тепловой расчет проводится по методике [4] для расчета жаротрубно-дымогарного котла на основании [5; 6], в которой последовательно показан тепловой расчет парового и водогрейного 3-ходового котла с проходной топкой. Результаты расчета котла представлены в виде графиков с основными параметрами при различных нагрузках в зависимости от содержания водорода в составе МВС: от 0 до 100 %.

На графике зависимости суммарной мощности котла от содержания водорода в топливе (рис. 1, *а*) видно, что при увеличении доли водорода в составе МВС происходит увеличение мощности котла при одинаковом расходе энергии топлива на котел, что приводит к увеличению КПД брутто котла (рис. 1, *б*). Повышение энергетической эффективности газотрубных котлов при переходе на МВС с увеличением доли водорода и снижение выбросов CO_2 (рис. 1, *в*) являются основными критериями использования водорода в качестве топлива на котельном оборудовании.

При переходе на сжигание чистого водорода возможно увеличение КПД котла примерно на 1,5 %, а выбросы CO_2 будут равны нулю. При использовании сбросного ВСГ, содержащего 70–85 % об. водорода, в качестве топлива для газотрубного котла

© Жихарева В. Р., Петин С. Н., Кислицын М. А., Бонадыков Н. М., 2025

наблюдается увеличение КПД котла на 1 % и сокращение выбросов CO_2 в атмосферу на 40–55 %. Однако следует учитывать, что увеличение содержания водорода в топливной смеси сверх 20 % об. приводит к нарушениям нормальной работы агрегата [7]. Подобное положение дел явным образом формирует потребность в замене или модернизации горелочного устройства, а также возможному изменению конструкции котла из-за изменения тепловосприятия поверхностями нагрева при сохранении тепловой мощности. Также повышается и риск взрывоопасности [1].

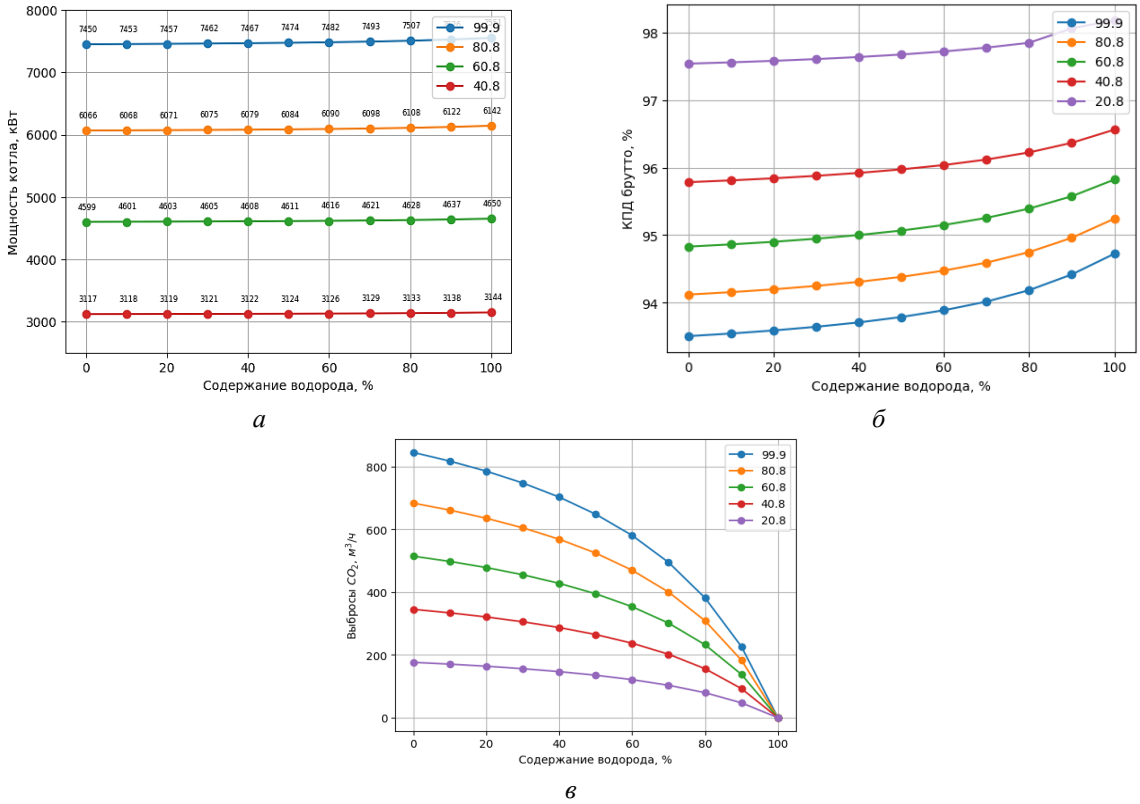


Рис. 1. Графики зависимостей от содержания H_2 в МВС теплотехнических параметров:
а – мощности котла; *б* – КПД брутто; *в* – выбросов CO_2

Можно заключить, что использование ВСГ, как и других богатых водородом МВС, в котельных агрегатах требует комплексный подход и дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках проекта «Водородная энергетика» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Список источников

1. Экология, энергетика, энергосбережение: бюллетень / под ред. акад. РАН А. В. Клименко. М. : ПАО «Мосэнерго», 2023. Вып. 4. Особенности сжигания и транспортировки водород содержащих газов / П. В. Росляков. 2023. 42 с.

2. Петин С. Н., Кислицын М. А., Голдобин Д. Д., Лугвищук Д. С. Разработка способа производства водорода на базе водородсодержащего газа нефтеперерабатывающих установок // Промышленная энергетика. 2023. № 9. С. 33–43.

3. Петин С. Н., Ванюшкин В. Д., Бурмакина А. В. Производственное обучение на ТЭЦ с газопоршневыми генераторными установками и водогрейными котлами. М. : Издательство МЭИ, 2022. 104 с.

4. Расчет жаротрубно-дымогарного котла / под ред. А. П. Лумми, В. А. Мунц. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2009. 31 с.

5. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова и др. М. : Энергия, 1973.

6. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб. : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998.

7. Концепция крупномасштабного развития инновационных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя. URL: https://ccortes.ru/st_docs/klumpur2012.pdf (дата обращения: 07.09.2022).

ГЛУБОКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ

В. И. Рудой*, А. Г. Батухтин

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
** valera_rud_99@mail.ru*

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года увеличение доли угля в топливно-энергетическом балансе страны является приоритетным направлением [1]. В связи с этим возникает и необходимость развития более эффективных методов использования данного вида топлива. По сравнению с другими видами топлива, уголь имеет ряд особенностей при эксплуатации в системах генерации тепла, а именно:

– наличие твердого несгораемого остатка (как удаляемого непосредственно из топок, так и уносимого с потоком дымовых газов);

– необходимость предварительной подготовки (измельчение, сушка и т. д.)

– наличие в составе компонентов серы, что приводит к образованию в продуктах горения ее оксидов;

– высокая инерция при розжиге и т. д.

Наибольшие тепловые потери при эксплуатации теплогенераторов – это потери с теплотой уходящих газов. Угольные теплогенераторы не являются исключением в данном случае. Уменьшить данные потери позволяет глубокая утилизация теплоты уходящих газов, т. е. охлаждение газов до начала их конденсации и конденсация содержащейся в них влаги. Глубокой утилизации теплоты уходящих газов теплогенераторов, работающих на газовом топливе, посвящено множество научных работ [2; 3]. Однако в них отмечается либо невозможность утилизации тепла дымовых газов от твердого топлива, либо нецелесообразность данных мероприятия. Как правило, это связано с конденсацией паров серной кислоты на теплопроводящих поверхностях и их последующее повреждение. Также отмечается невозможность полезного использования полученного конденсата в дальнейших циклах работы.

Однако в современных условиях увеличения доли угольной генерации необходимо более тщательно рассмотреть данный вопрос. Разработка новых технологий эксплуатации твердотопливных теплогенераторов, включающих в себя глубокую утилизацию теплоты уходящих газов, позволит не только сократить расходы топлива, но и увеличить надежность работы вспомогательного оборудования, а также уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Также одним из важнейших вопросов в данном случае является определение температур начала конденсации дымовых газов. Ввиду наличия множества компонентов в дымовых газах, как находящихся в газовой фазе, так и в твердой, температура начала конденсации будет зависеть от множества факторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

© Рудой В. И., Батухтин А. Г., 2025

Список источников

1. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года : распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 21.10.2024).

2. Зиганшина С. К. Энергосбережение в котельных установках тепловых электрических станций за счет использования вторичных энергоресурсов : специальность 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» : дис. … д-ра техн. наук / Зиганшина Светлана Камиловна. Самара, 2021. 449 с.

3. Беспалов В. В. Повышение эффективности глубокой утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе : специальность 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» : дис. … канд. техн. наук / Беспалов Виктор Владимирович. Томск, 2017. 119 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ: ОПЫТ ЧИТИНСКОЙ ТЭЦ-1

Ю. О. Риккер*, М. В. Кобылкин, Е. А. Беломестнова

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
** yrikker@mail.ru*

В статье рассматривается проблема загрязнения атмосферного воздуха, вызванного выбросами теплоэлектроцентралей, работающих на угле. На примере Читинской ТЭЦ-1 проанализированы режимные параметры работы котельных установок, определены оптимальные условия для минимизации выбросов вредных веществ. Разработанная методология включает расчетные и инструментальные методы оценки выбросов, а также математическую модель для оптимизации режимов.

Проблема загрязнения атмосферного воздуха остается одной из ключевых экологических задач современности. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), использующие угольное топливо, вносят значительный вклад в выбросы вредных веществ, таких как оксиды азота, диоксид серы, твердые частицы и бенз(а)пирен. Эти загрязнители оказывают негативное воздействие на окружающую среду, здоровье человека и климатические условия, что усиливает необходимость разработки эффективных мер по снижению их объемов.

Читинская ТЭЦ-1, расположенная в Забайкальском крае, является примером типичной угольной ТЭЦ. Ее котельные установки оснащены оборудованием для очистки дымовых газов, однако задачи повышения экологической безопасности и снижения выбросов остаются актуальными. Основной целью настоящего исследования является анализ режимных параметров работы котельных установок ТЭЦ-1 и оптимизация их с целью минимизации вредных выбросов.

Объект исследования – Читинская ТЭЦ-1 – включает в себя 12 котельных агрегатов БКЗ-220-100Ф и один модернизированный агрегат БКЗ-240-100Ф. Основным видом топлива является бурый уголь, а для розжига используется мазут. Станция оснащена скрубберами Вентури, обеспечивающими степень очистки дымовых газов до 95–96 %.

Методы исследования – расчетный метод, инструментальный и сопоставление данных.

Расчетный метод: определение объемов выбросов вредных веществ (твердых частиц, оксидов серы, азота и бенз(а)пирена) на основе эмпирических формул действующих методик РД и СО [2; 3]. Расчеты включали параметры топлива (зольность, сернистость), данные о температурных режимах и характеристиках оборудования (золоуловители, скрубберы) [1].

Инструментальный метод: проведение замеров выбросов с использованием газоанализаторов для определения концентраций оксидов азота, диоксида серы и аспирационных установок для определения концентраций твердых частиц в уходящих газах. Контроль достоверности замеров через повторные тесты с разными режимами работы котлов.

Сопоставление данных расчетного и инструментального методов включало выявление отклонений. Для снижения ошибок использовались корректировочные коэффициенты, уточненные для конкретных условий эксплуатации Читинской ТЭЦ-1.

© Риккер Ю. О., Кобылкин М. В., Беломестнова Е. А., 2025

Расчеты и инструментальные замеры показали, что основными источниками загрязнений являются твердые частицы (зола и несгоревшее топливо), их выбросы составляют до 60 % общего объема загрязнений при работе на буром угле, порядка 50 г/с с котла. Оксиды серы, образующиеся при сжигании серосодержащего угля, выбрасываются с массовом расходом до 14 г/с. Оксиды азота, формирующиеся при высокотемпературных процессах горения, достигают уровня 35 г/с. Бенз(а)пирен, связанный с неполным сгоранием углеродистых компонентов топлива, расчетно показал значительные концентрации, до $12 \cdot 10^{-6}$ г/с в зимний период, что связано с повышенной нагрузкой на котлы.

Средняя абсолютная ошибка расчетного метода по сравнению с инструментальными замерами составила 18,6 % для твердых частиц и 12,3 % для оксидов серы. Эти данные подтверждают необходимость корректировки расчетных методов с использованием эмпирических поправочных коэффициентов. Пример скорректированных данных по оксидам серы представлен на рис. 1.

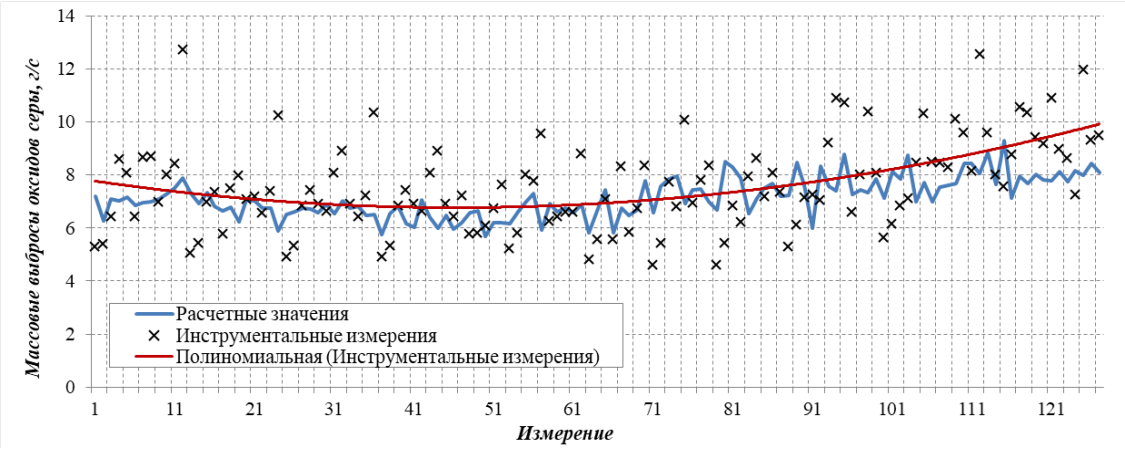


Рис. 1. Результаты сопоставления расчетных данных после валидации и инструментальных измерений для оксидов серы

Полученные результаты легли в основу математической модели, использованной для оптимизации работы оборудования ТЭЦ-1. Разработанная математическая модель позволила определить оптимальные условия работы котлов, включая:

1. Снижение температуры горения до уровня 1100–1200 °С для уменьшения выбросов оксидов азота на 15 %.

2. Поддержание оптимального уровня коэффициентов избытка воздуха 1,1–1,2 для снижения выбросов бенз(а)пирена и твердых частиц на 10–12 %, а также для общего повышения КПД ТЭЦ.

3. Повышение эффективности работы систем золоудаления за счет регулярного контроля и технического обслуживания для сокращения выбросов твердых частиц на 20 %.

Внедрение оптимизационных решений на Читинской ТЭЦ-1 позволит: снизить объемы выбросов вредных веществ на 15–20 %, что соответствует годовому сокращению на 500–700 т загрязняющих веществ; сэкономить до 5 млн руб. за счет уменьшения экологических платежей и повышения эффективности использования топлива.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Список источников

1. Природоохранные технологии на ТЭС : учеб. пособие / Ю. О. Риккер, М. В. Кобылкин, П. Г. Сафронов, И. Ю. Батухтина; Забайкальский государственный университет. Чита : ЗабГУ, 2021. 150 с.

2. РД 34.02.305–98 «Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС». URL: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=2101.

3. СО 153-34.02.304–2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций». URL: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=2101.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ БЫСТРИНСКОГО ГОКА

М. В. Кобылкин, Ю. О. Риккер*, З. Г. Дарбинян

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
** yrikker@mail.ru*

Статья посвящена исследованию и разработке методов повышения энергоэффективности инфраструктурных объектов Быстринского ГОКа. В условиях возрастающего внимания к вопросам рационального использования энергетических ресурсов и сокращения углеродного следа, тема работы является актуальной. В рамках исследования проведен анализ текущего состояния энергосистем объектов, выявлены основные факторы, влияющие на энергопотребление, предложены технические и организационные решения для их оптимизации. Также рассматриваются рекомендации по внедрению энергоэффективных технологий и мероприятий, направленных на снижение затрат на энергоресурсы и повышение экологической устойчивости. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации инфраструктурных объектов ГОКа, а также адаптированы для аналогичных промышленных предприятий.

В условиях глобального изменения климата и усиления требований к сокращению углеродного следа проблема энергосбережения приобретает особую актуальность. Для промышленных предприятий, таких как Быстринский ГОК, внедрение энергосберегающих технологий позволяет не только сократить выбросы вредных веществ, но и оптимизировать производственные расходы.

Проблема Быстринского ГОКа заключается в высокой энергоемкости производства, значительных экологических нагрузках и недостаточной эффективности существующих энергосистем. Для ее решения требуются внедрение современных энергосберегающих технологий, оптимизация использования ресурсов и снижение углеродного следа, что позволит повысить устойчивость предприятия и его соответствие современным экологическим стандартам.

Штат вахтового поселка Таежный составляет 2700 чел. (по данным на 2023 г.). Размещение штата производится на территории четырех общежитий. Все постройки имеют централизованное теплоснабжение.

Рассмотрены следующие технологии: тепловые насосы, бак-аккумулятор и рекуператор сточных вод [1; 2].

Ориентировочная средняя норма потребления горячей воды на одного человека в вахтовом поселке 100 л в сутки. Расчетный средний суточный расход теплоты на горячее водоснабжение 16,2 Гкал. Среднечасовая нагрузка 0,675 Гкал/ч. Максимальная (расчетная) нагрузка в соответствии с графиком потребления 3,16 Гкал/ч.

Исходя из рассчитанных данных, была произведена оценка сроков окупаемости внедряемых технологий, а также рассчитано снижение углеродного следа.

Таблица 1

Оценка экологичности и экономичности технологий

Технология	Срок окупаемости, лет	Углеродный след, тCO_2/год
Тепловые насосы	4,5	1029
Баки аккумуляторы	3	361
Рекуператоры серых стоков	4,62	94

© Кобылкин М. В., Риккер Ю. О., Дарбинян З. Г., 2025

Простота внедрения технологии рекуперации серых стоков обеспечила возможность оперативной реализации проекта в минимально короткие сроки. В рамках экспериментального исследования также была проведена оценка его предварительных результатов эффективности.

Пилотное внедрение технологии осуществлено на территории вахтового поселка Таежный, где был установлен один рекуператор. По данным, полученным инженерами котельной ГРК «Быстринское» в результате анализа показаний счетчика, реальная экономия тепловой энергии составила 100 кВт·ч в месяц.

На основании представленных данных, полученных в ходе эксплуатации оборудования, возможно проведение уточненных расчетов эффективности экспериментальной технологии, включая оценку ее энергосберегающего потенциала и экономической целесообразности.

Годовая экономия теплоты 1 Гкал, экономия в денежном выражении в год при тарифе на теплоту 1 600 руб./Гкал – 1600 руб. Окупаемость технологии 1,25 года при стоимости экспериментальной установки 2000 руб. и менее 4 лет при коммерческой реализации установки. Снижение углеродного следа в год, при удельном расходе топлива на котельной 300 кг/Гкал (174 кг.у.т/Гкал) и коэффициенте выбросов 2,96 тCO_2/т.у.т. 0,5 тCO_2/год для одного объекта и 336 тCO_2/год для условий полной модернизации всех объектов, что в 3,6 раза превысило расчетное значение.

Проведенный анализ и расчеты по каждому из предложенных вариантов энергосберегающих технологий позволяют заключить, что все рассматриваемые решения являются приемлемыми и демонстрируют высокую степень экономической и экологической эффективности для внедрения на инфраструктурных объектах Быстринского ГОКа. Тем не менее в зависимости от приоритетных критериев выделяются следующие ключевые аспекты.

Наивысший уровень экологической эффективности обеспечивают тепловые насосы, которые демонстрируют наиболее значительное снижение углеродного следа среди всех предложенных решений. Этот результат обусловлен их способностью минимизировать прямые выбросы CO_2 и повысить коэффициент использования возобновляемых источников энергии, что делает их наиболее предпочтительными с точки зрения достижения стратегических экологических целей.

Наиболее короткий срок окупаемости, составляющий 3 года, продемонстрировала технология использования бака-аккумулятора. Данный показатель отражает высокую степень экономической эффективности и подтверждает перспективность инвестирования в этот проект, особенно в условиях необходимости быстрого возврата вложенных средств.

В аспекте технологической интеграции и адаптации к существующей инфраструктуре наиболее простым для внедрения является рекуператор сточных вод, установка и эксплуатация которого требуют минимальных временных и финансовых ресурсов. Этот фактор делает его оптимальным решением в условиях ограниченных сроков модернизации или минимизации сбоев в операционных процессах.

Таким образом, все предложенные технологии демонстрируют высокий потенциал с точки зрения экономической, экологической и технологической эффективности. Выбор конкретного решения или их комбинации должен основываться на стратегических приоритетах, обусловленных текущими и долгосрочными целями развития Быстринского ГОКа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Список источников

1. Дарбинян З. Г., Беломестнова Е. А. Оценка эффективности технологии рекуперации теплоты сточных вод для ГРК «Быстринское» // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. Материалы XXIV Международной научно-практической конференции : в 3 ч. Чита, 2024. С. 23–26.

2. Рекуператор теплоты сточных вод: пат. 216381 РФ. № 2022111237, заявл. 04.25.22; опубл. 01.31.23; Бюл. № 4.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНО-ВОДОИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Б. А. Абсадиков[1*], Ш. К. Агзамов[2]

[1] ООО «Premium Project»
Узбекистан, Ташкент, ул. Шахрисабз, д. 16а
[2] Ташкентский государственный технический университет
Узбекистан, Ташкент, ул. Университетская, д. 2
** baharik@rambler.ru*

В статье рассмотрено воздушно-водоиспарительное охлаждение как основная альтернатива, сочетающая преимущества воздушного и испарительного охлаждения и минимизирующая их недостатки.

В условиях растущего мирового спроса на энергию и ужесточения экологических стандартов, эффективные системы охлаждения становятся критически важными для энергетической отрасли. Воздушно-водоиспарительное охлаждение (ВВИО) представляет собой гибридный метод, сочетающий принципы воздушного и испарительного охлаждения. В системах ВВИО воздух сначала предварительно охлаждается путем испарения воды, а затем используется для охлаждения технологической среды в АВО. Этот метод позволяет достичь более низких температур охлаждения по сравнению с простым воздушным охлаждением и снизить расход воды по сравнению с традиционным испарительным охлаждением. Ключевым отличием ВВИО является стратегическое использование воды для предварительного охлаждения воздуха [1–3]. ВВИО значительно повышает эффективность охлаждения АВО, особенно в условиях высоких температур окружающей среды. Предварительное охлаждение воздуха за счет испарения воды увеличивает разницу температур между воздухом и технологической средой, что приводит к более интенсивной теплоотдаче [4–6]. Это позволяет уменьшить размеры теплообменников по сравнению с традиционными воздушными системами и обеспечивает более стабильные рабочие условия. Вода используется в основном для предварительного охлаждения воздуха, а не как основной охлаждающий агент. Это делает ВВИО более экологически устойчивым вариантом, особенно в регионах с ограниченными водными ресурсами. Оптимизация расхода воды достигается благодаря стратегическому использованию испарительного эффекта и операционной гибкости, позволяя регулировать количество воды, используемой для предварительного охлаждения. Применение форсунок для мелкодисперсного распыления воды в системах ВВИО является предпочтительным и экономичным решением, поскольку способствует более интенсивному испарению и, следовательно, более эффективному охлаждению воздуха [7].

В энергетике АВО используются для охлаждения различных технологических сред, включая отработанный пар турбин, смазочное масло, технологическую воду, газ. ВВИО может значительно повысить эффективность этих процессов охлаждения, что приведет к увеличению выработки электроэнергии и снижению эксплуатационных расходов [2; 9]. Снижение потребления воды особенно выгодно в районах, где водные ресурсы ограничены. Повышенная эффективность охлаждения также может способствовать общей надежности электростанции. Компании, такие как Siemens и General Electric, активно исследуют и внедряют технологии ВВИО в своих энергетических решениях [4; 8]. Компании, такие как Газпром и Роснефть, проявляют интерес к внедрению этих технологий для повышения эффективности своих производственных процессов [1; 2].

© Абсадиков Б. А., Агзамов Ш. К., 2025

ВВИО нередко является экономически эффективным решением, балансируя первоначальные инвестиции со снижением эксплуатационных расходов [8]. Хотя первоначальные затраты могут быть выше, чем у простой воздушной системы, долгосрочная экономия от снижения энергопотребления и расхода воды может сделать ВВИО более экономичным выбором. Долгосрочная экономическая эффективность также повышается за счет снижения затрат на обслуживание по сравнению с традиционными испарительными системами.

Процесс ВВИО 30 % водного раствора моноэтаноламина (с = 30 %) с температурой $t_г$=80 °С показан на рис. 1 в виде зависимости $Q_m = f$ (Rem, ρ). На рисунке видно, что теплосъем (Q_m) лучше при высоких значениях числа Рейнольдса раствора (Rem), степени орошения охлаждающего воздуха (ρ) и скорости воздуха в узком сечении АВО (Wy). Чем выше значения ρ и Wy, тем эффективнее теплообмен и выше величина Q_m.

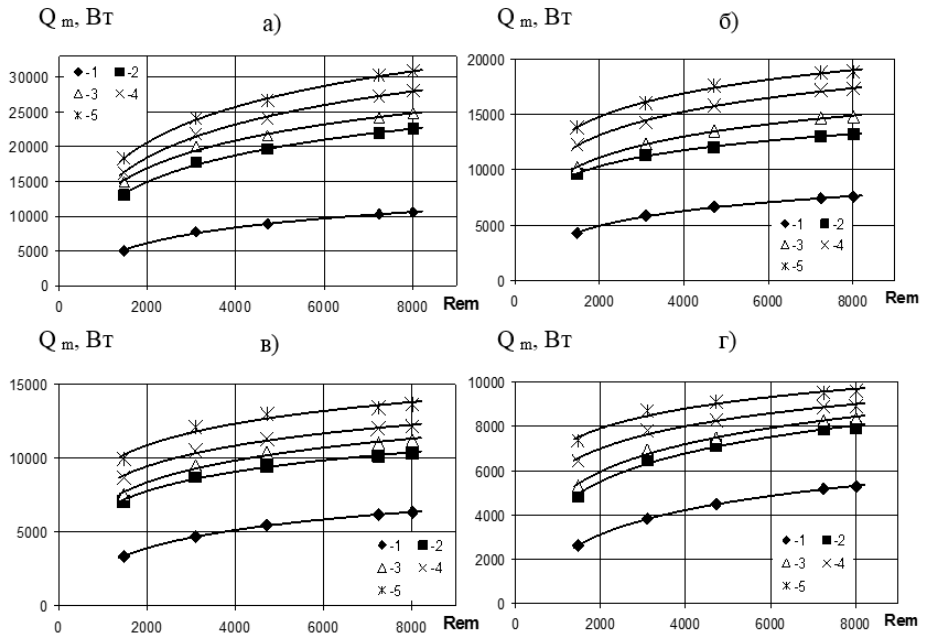


Рис. 1. Зависимость интенсивности теплосъема от числа Рейнольдса раствора в виде Q_m = f (Re_m), с = 30 % ($t_г$ = 80 ºС): *1* – «сухое» охлаждение; *2* – ρ = 0,0013 кг/кг; *3* – ρ = 0,0027 кг/кг; *4* – ρ = 0,0033 кг/кг; *5* – ρ = 0,004 кг/кг; *а* – Wy = 6,13 м/с; *б* – Wy = 4,12 м/с; *в* – Wy = 2,46 м/с; *г* – Wy = 1,29 м/с;

Воздушно-водоиспарительное охлаждение (ВВИО) – это эффективная технология для систем охлаждения в энергетике. Она сочетает преимущества воздушного и испарительного охлаждения, что позволяет достигать низких температур, сокращать расход воды и повышать эффективность. Высокие начальные затраты и требования к обслуживанию не снижают жизнеспособность ВВИО в критически важных секторах. Исследования в этой области могут привести к более эффективным решениям, а операционная гибкость и адаптируемость систем ВВИО делают их привлекательными для широкого спектра применений.

Список источников

1. Газпром. Технологии энергосбережения. URL: https://www.gazprom.ru/about/strategy/energy-saving.

2. Роснефть. Инновационные технологии. URL: https://www.rosneft.ru/Innovation.

3. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, 2007.
4. Siemens. Energy Efficiency Solutions. URL: https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-efficiency.html.
5. Bejan A. Heat Transfer. John Wiley & Sons, 1993.
6. Shah R. K., London A. L. Laminar Flow Forced Convection in Ducts. Academic Press, 1978.
7. Абсадиков Б. А., Агзамов Ш. К. Исследование процесса воздушно-водоиспарительного охлаждения в АВО // Технологии нефти и газа. 2020. № 3. С. 61–64. DOI: 10.32935/1815-2600-2020-128-3-61-64.
8. General Electric. Advanced Cooling Technologies. URL: https://www.ge.com/power.
9. Holman J. P. Heat Transfer. McGraw-Hill, 2010.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Е. П. Копьев[1*], Е. Ю. Шадрин[1], И. С. Садкин[1, 2]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** kopyeve@itp.nsc.ru*

Проведено экспериментальное исследование влияния добавления наночастиц металлов на процесс горения жидких углеводородов в прямоточном горелочном устройстве с регулируемой подачей первичного воздуха. На примере сжигания дизельного топлива с добавлением наночастиц алюминия и оксида алюминия ($Al + Al^2O^3$) проведено измерение температуры пламени, газовый анализ промежуточных и конечных продуктов сгорания. Получены данные о влиянии наночастиц алюминия на экологические показатели горения жидких углеводородов в распылительном горелочном устройстве. Показано, что добавление частиц в исследованном диапазоне режимов не приводит к значительным изменениям характеристик сжигания.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности сжигания различных типов топлив является их модифицирование путем добавления металлического горючего. В качестве металлического горючего используют частицы металлов, обладающие определенными физико-химическими свойствами, благоприятствующими сгоранию [1], в основном это дисперсные порошки алюминия различной формы и размеров [2]. Перспективными считаются смеси алюминия различной дисперсности, смеси с ним наноразмерных порошков других металлов или их сплавов. Кроме того, алюминий может окисляться не только свободным кислородом, но и связанным, входящим в состав воды или углекислого газа. Таким образом, добавление алюминия в топливо позволяет получать горючие смеси с уникальными свойствами. Например, добавление незначительного количества (до 15 %) порошка алюминия к высокореакционному топливу может существенно повысить температуру продуктов сгорания [3]. В настоящее время годовой выпуск алюминиевых порошков составил около 200 тыс. т в год [4], а разработанные способы их получения позволяют производить порошки различной формы и дисперсности – от десятка микрометров до нанометров [5], что позволяет использовать их в различных приложениях.

Одним из перспективных направлений для использования нанопорошков алюминия является их добавка к жидкому топливу при сжигании в среде с перегретым водяным паром, поскольку при окислении оксида алюминия в воде выделяется большее количество тепла, чем в воздухе. Для анализа влияния добавки нанопорошка алюминия на процесс горения жидкого углеводородного топлива, распыляемого перегретым водяным паром [6; 7], было проведено экспериментальное исследование горения смеси дизельного топлива и наночастиц (содержание порошка ~1 % по массе топлива). В качестве нанопорошка был использован порошок, состоящий из частиц оксида алюминия: ~ 90 % масс. Al_2O_3 и до 10 % не окисленного Al, частицы имеют сферическую форму, средний размер 36–46 нм.

© Копьев Е. П., Шадрин Е. Ю., Садкин И. С., 2025

Сжигание осуществлялось в атмосферном распылительном горелочном устройстве с регулируемой подачей воздоха в камеру газогенерации, в котором топливо распыляется струей перегретого водяного пара [8].

При сжигании такой смеси пламя имеет преимущественно синий цвет с оранжевыми областями. В ходе эксперимента было получено распределение средней по времени температуры вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства. Для измерения температуры использовалась платинородий-платинородиевая термопара типа В, закрепленная на координатно-перемещающем устройстве. Тепловыделение при сжигании смеси дизельного топлива с наночастицами при различном расходе воздуха, подаваемого в камеру газогенерации, определялось по измерениям на проточном калориметре. Концентрации токсичных веществ в продуктах сгорания определялись с помощью газоанализатора Testo 350. Забор охлажденной газовой пробы осуществляется на выходе из калориметра.

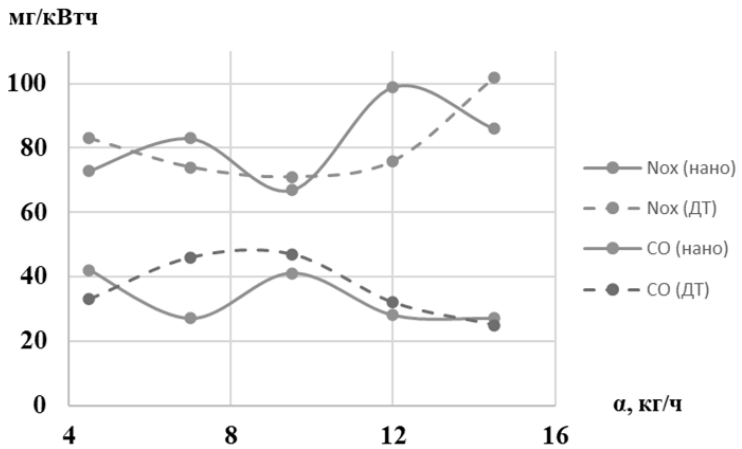


Рис. 1. Зависимость выбросов CO и NOx в составе конечных продуктов сгорания

Тепловыделение при сжигании дизеля в смеси для всех исследуемых режимов с наночастицами составило ~45 МДж/кг, что близко к высшей теплоте сгорания дизельного топлива. Содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания в пересчете на килограмм топлива удовлетворяет 2-му и 3-му классу европейского стандарта EN 267. При изменении расхода, подаваемого в камеру газогенерации воздуха, можно видеть, что зависимости для дизельного топлива с добавкой нанопорошка алюминия повторяют тенденции чистого дизельного топлива. Отсутствие видимых эффектов, вероятно, связано с особенностями физико-химических процессов в присутствии перегретого водяного пара, обеспечивающего низкоэмиссионное горение и за счет низкой концентрации наночастиц алюминия.

Список источников

1. Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И. Пути модификации металлического горючего конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1990. № 1 (26). С. 97–104.

2. Ritter H., Braun S. High Explosives Containing Ultrafine Aluminum ALEX // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. № 6(26). С. 311–314. DOI:10.1002/1521-4087.

3. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачёв В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М. : Наука, 1972. 294 с.

4. Тихов С. Ф., Романенков В. Е., Садыков В. А., Гаврилов В. Ю. Пористые композиты на основе оксид-алюминиевых керметов. Новосибирск, 2004. 198 с.

5. Гопиенко В. Г., Осипов Б. Р., Назаров Б. П. Производство и применение алюминиевых порошков и пудр. М. : Металлургия, 1980. 458 с.

6. Anufriev I. S., Kopyev E. P., Sadkin I. S., Mukhina M. A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // Process Safety and Environmental Protection. 2021. (152). С. 240–248. DOI:10.1016/j.psep.2021.06.016.

7. Anufriev I. S., Shadrin E. Y., Kopyev E. P., Sharypov O. V. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact // Fuel. 2021. (303). С. 121183. DOI:10.1016/J.FUEL.2021.121183.

8. Anufriev I. S., Kopyev E. P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Processing Technology. 2019. (192). С. 154–169. DOI:10.1016/j.fuproc.2019.04.027.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ПОДГОТОВКИ ПОТОКА «NEL (SPEARMAN)» ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА

М. В. Кобылкин, Ю. О. Риккер*, А. Г. Батухтин

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
** yrikker@mail.ru*

Статья посвящена оптимизации конструкции устройства подготовки потока «NEL (Spearman)», устраняющего или уменьшающего вихри в потоке и деформацию эпюр скоростей потока. В условиях запыленного потока использование стандартной конструкции показало свою невысокую эффективность, в связи с чем было проведено экспериментальное исследование относительно наилучшей конструкции устройства подготовки потока. В процессе исследования был разработан ряд модификаций «NEL (Spearman)», где за основу взята стандартная конструкция. С помощью физического и компьютерного моделирования, а также аддитивных технологий была найдена оптимальная конструкция, использование которой в условиях запыленного потока позволяет значительно уменьшить деформацию эпюр скоростей потока.

При проведении исследований аэродинамических характеристик, связанных с оценкой влияющих факторов на аэродинамику для запыленного потока, на протяжении всего трубопровода испытательного стенда наблюдаются проблемы, связанные с гравитационной сепарацией частиц пыли и искажением эпюр скорости в каналах, что усложняет процесс декомпозиции влияния исследуемых факторов. Для устранения выявленных проблем предлагается применение устройств подготовки потока.

Устройство подготовки потока (УПП) необходимо для выравнивания профиля скорости потока газообразных и жидких сред, так как оно устраняет или уменьшает вихри в потоке и деформацию эпюр скоростей потока.

В результате проведения стендовых экспериментальных исследований было установлено, что без использования УПП эпюра скоростей запыленного потока ожидаемо деформируется за счет сил трения о внутренние поверхности трубопровода, а также за счет выпадения пылевых частиц под действием силы тяжести в нижнюю часть трубопровода.

Примерами устройств подготовки потока могут служить УПП «Gallagher», «K-Lab NOVA», «NEL (Spearman)», «Sprenkle» и «Zanker».

В ходе исследования предпочтение было отдано использованию УПП «NEL (Spearman)» в связи с наибольшей простотой и надежностью конструкции.

Конструкция УПП «NEL (Spearman)» представлена перфорированной пластиной (рис. 1), устанавливаемой в трубопровод поперек потока.

Размеры отверстий зависят от внутреннего диаметра измерительного трубопровода и регламентируются ГОСТ 8.586.1–2005.

Применение УПП NEL (Spearman) при исследовании чистого газового потока оправдано благодаря его способности эффективно стабилизировать поток на коротком расстоянии от источника возмущений, обеспечивать равномерное поле скоростей и минимизировать гидравлическое сопротивление. Однако в условиях запыленного потока плоские грани УПП вызывают торможение частиц с их отражением в обратном направлении, что увеличивает сопротивление потоку. Кроме того, снижение импульса частиц усиливает их гравитационную сепарацию, что уменьшает эффективность работы УПП.

© Кобылкин М. В., Риккер Ю. О., Батухтин А. Г., 2025

Учитывая выявленные недостатки стандартной конструкции, была выдвинута гипотеза, предполагающая, что внесение конструктивных изменений в форму УПП «NEL (Spearman)» позволит добиться лучшей стабилизации профиля скорости и устранения эффекта прямого столкновения частиц о поверхность УПП. Изменения внесены согласно следующему описанию.

Для стандартной трубы с диаметром 100 мм принимается удвоенная толщина пластины, равная 24 мм с отверстиями 10, 16 и 12 мм. Предварительно спроектированная утолщенная пластина УПП, оснащенная отверстиями, соответствующими по типоразмерам ГОСТ 8.586.1–2005, делится горизонтальной линией. Толщина нижней части пластины от нижней грани до медианной линии равна 12 мм, соответственно, толщина верхней части пластины от медианной линии до верхней грани также равна 12 мм. Зенкирование отверстий верхней части пластины в форме полого конуса осуществляется до медианной линии с сохранением диаметров отверстий нижней части пластины. Таким образом, зенкирование производится по рабочим диаметрам отверстий 10–18, 16–33,5 и 12–26 мм.

В результате зенкирования происходит развертка верхней части пластины, вследствие чего верхняя часть пластины приобретает ряд острых граней, разделяющих отверстия перфорации. Общий вид УПП после внесения конструктивных изменений представлен на рис. 2.

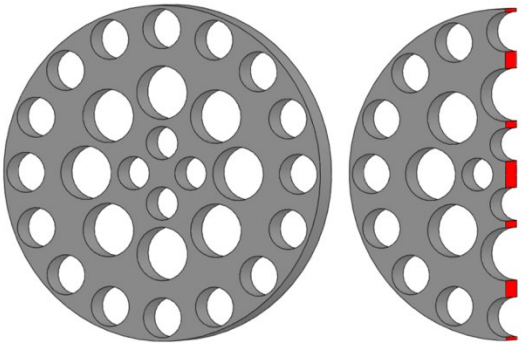


Рис. 1. Общий вид и разрез УПП NEL (Spearman)

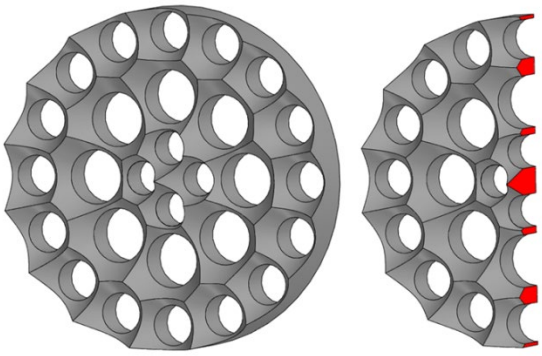


Рис. 2. УПП NEL (Spearman) с внесенными конструктивными изменениями и его разрез

Острая форма граней рабочей поверхности УПП минимизирует эффект торможения частиц, существенно уменьшая гидравлическое сопротивление УПП, а входная кромка позволяет перераспределять частицы по каналу, нивелируя накопленный до себя эффект гравитационной сепарации.

Для объективного заключения об эффективности модернизации УПП были применены следующие аналитические метрики при сопоставлении идеальной эпюры и эпюры, полученной при применении модернизированного УПП в сравнении с аналогичным сопоставлением для стандартного УПП: MAE, RMSE, R и R^2.

По совокупности значений метрик доказана эффективность модернизированного УПП. В частности, метрика R^2 показала рост с 0,94 до 0,97; RMSE уменьшилась с 1,03 до 0,95 м/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Список источников

1. ГОСТ 8.586.1–2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. М. : Стандартинформ, 2016. 49 с.

2. Кобылкин М. В., Риккер Ю. О., Батухтин А. Г. К вопросу о недостатках устройства подготовки потока «NEL (SPEARMAN)» в условиях запыленного потока // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : материалы XXIV Международной научно-практической конференции : в 3 ч. Чита, 2024. С. 41–44.

СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИН ВНЕШНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМОГО ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

Г. С. Маршалова[1,2], Д. В. Островская[2*], А. Б. Сухоцкий[2], Е. С. Данильчик[2]

[1]Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, д. 15
[2]Белорусский государственный технологический университет
220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, д. 13а
** dashkaost09@gmail.com*

Проведено экспериментальное исследование влияния толщины внешнего загрязнения оребренных труб на теплоотдачу однорядного пучка аппарата воздушного охлаждения с установкой вытяжной шахты. Данные аппараты используются для охлаждения технологических продуктов, охлаждения и конденсации парогазовых смесей, для нагрева воздуха, а также утилизации тепла отходящих продуктов сгорания природного газа или других газообразных сред. Установлено, что увеличение толщины загрязнения в 1,55 раза приводит к снижению интенсивности теплоотдачи на 5–9 %, а с ростом высоты вытяжной шахты негативный эффект от наличия внешнего загрязнения увеличивается.

В связи с размещением аппаратов воздушного охлаждения (АВО) на открытом воздухе, одной из ключевых проблем их эксплуатации является возникновение загрязнения на внешней поверхности оребрения труб. Это приводит к снижению эффективности теплоотдачи на поверхности охлаждения с воздушной стороны по ряду причин: отложение слоя загрязнения, имеющего высокое термическое сопротивление; снижение скорости воздуха, а иногда даже прекращение его поступления в те или иные каналы из-за их полной закупорки; изменение характера течения потока по каналам поверхности охлаждения из-за местных (локальных) отложений загрязнителя [1]. Это обуславливает актуальность изучения влияния внешнего загрязнения на интенсивность свободно-конвективного теплообмена оребренных пучков АВО.

Целью данной работы является сравнение влияния увеличения толщины внешнего загрязнения однорядного пучка оребренных труб в условиях свободно-конвективного теплообмена, интенсифицированного при помощи установки вытяжной шахты.

Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена однорядного пучка оребренных труб в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, а также конструктивные и геометрические параметры используемых оребренных труб представлены в работе [2].

Внешнее загрязнение межреберного пространства труб создавалось путем равномерного плотного кольцевого наматывания льняного шнура на поверхность трубы. В результате был образован слой загрязнения толщиной $\delta_з$ = 2,9 и 4,5 мм с неравномерностью ±0,4 мм. Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена над экспериментальным пучком труб устанавливалась вытяжная шахта с высотой H = 0,52; 1,04; 1,72 и 2,24 м с площадью выходного отверстия $f_{отв}$ = 0,069 м^2.

Исследования проводились в условиях полного теплового моделирования. Подвод теплового потока к оребренным поверхностям обеспечивался за счет установки внутри оребренных труб трубчатых электронагревателей (ТЭНов), которые подключались к регулируемому масляному трансформатору (модель АОМН-40-220-75). Мощ-

© Маршалова Г. С., Островская Д. В., Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., 2025

ность, подводимая к оребренным трубам, измерялась ваттметром. Для снижения торцевых потерь на концах труб устанавливались фторопластовые втулки.

Во время экспериментального исследования электрическая мощность, подводимая к оребренным трубам, изменялась в пределах $W = 10–260$ Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{ст} = 25–120$ °С, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 19–23$ °С. Теплофизические свойства воздуха λ, ν, ρ, c_p и β определялись по температуре окружающего воздуха в камере t_0. За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер d_0.

Результаты эксперимента обрабатывались и представлялись в безразмерном виде – в числах подобия Нуссельта от Рэлея.

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_к d_0}{\lambda}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr} = \frac{g\beta d_0^3 (t_{ст} - t_0)}{\nu a}, \tag{2}$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\beta = 1 / (273 + t_0)$ – коэффициент температурного расширения, К$^{-1}$; ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; a – коэффициент температуропроводности, м^2/с.

Для сравнительного анализа влияния толщины внешнего загрязнение на свободно-конвективную теплоотдачу воздухоохлаждаемого пучка оребренных труб на рис. 1 представлена графическая зависимость $\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Ra})$ при различных высотах вытяжной шахты с площадью выходного отверстия $f_{отв} = 0{,}069$ м^2.

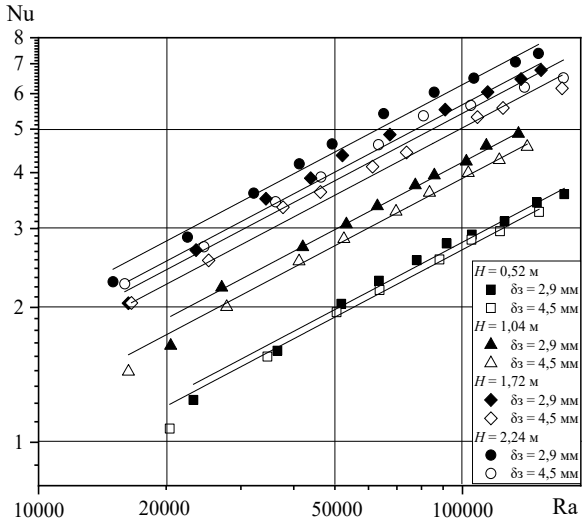


Рис. 1. Теплоотдача однорядного пучка оребренных труб с внешним межреберным загрязнением

Согласно данным, представленным на рис. 1, можно сделать вывод, что увеличение толщины загрязнения в 1,55 раза приводит к снижению интенсивности теплоотдачи на 5–9 %, а с ростом высоты вытяжной шахты негативный эффект от наличия внешнего загрязнения увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т23РНФМ-005), а также в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.37, ГБ21-104).

Список источников

1. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М. : Наука, 1982.

2. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : дис. … канд. техн. наук : 01.04.14. Минск, 2019. 153 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРИДА ВОДОРОДА ИЗ ПОЛИФТОРИДА АММОНИЯ ПРИ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАНОМ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Д. С. Пашкевич[1, 2], М. А. Олисов[1*], В. В. Капустин[1, 2, 5], П. С. Камбур[1, 2, 5], Д. А. Баженов[3, 4], Ю. И. Алексеев[2], В. Б. Петров[2, 5], Д. А. Мухортов[2], П. А. Смолкин[3]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
[2]ООО «Новые химические продукты»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 11а
[3]АО «Сибирский химический комбинат»
636039, Российская Федерация, Северск, ул. Курчатова, д. 1
[4]ООО «Центротех-Инжиниринг»
198097, Российская Федерация, Санкт-Петербург, пр. Стачек, д.47л
[5]АО «РНЦ “Прикладная химия”»
193232, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Крыленко, д. 26а
[6]Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе
194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
** misha.olisov@yandex.ru*

Предложен способ переработки полифторида аммония, побочного продукта производства экстракционной фосфорной кислоты из фторапатита, при его взаимодействии с метаном и кислородом в режиме горения, единственным фторсодержащим продуктом которого является фторид водорода. Экспериментами на пилотной установке с реактором типа туннельной горелки показана возможность формирования стабильного фронта пламени в указанной системе при практически полной конверсии аммиака и близком к 100%-му выходу фторида водорода.

В настоящее время мировое производство фторида водорода достигает 1,5 млн т в год. Основным методом его получения является сернокислотное разложение концентрата природного плавикового шпата кислотного сорта. Лидером по производству CaF_2 является Китай, который контролирует около 60 % мировой добычи этого минерала или 3,5 млн т ежегодно. В России запасы плавикового шпата необходимого состава исчерпаны и его приходится импортировать [1].

В то же время мировые запасы фтора в природном фторапатите превышают его запасы в плавиковом шпате в 10 раз [2]. Фторапатит используют при производстве экстракционной фосфорной кислоты, при этом фторсодержащие отходы, в основном водные растворы гексафторкремниевой кислоты, нейтрализуют, и продукты нейтрализации размещают на полях промышленных отходов. В России фторсодержащие отходы производства фосфорной кислоты образуются на целом ряде предприятий.

Таким образом, разработка методов получения фтористого водорода из фторсодержащих отходов переработки фторапатитов является актуальной задачей.

Из водного раствора гексафторкремниевой кислоты аминированием можно получить полифторид аммония $NH_4F{\cdot}nHF$. Одним из промышленных методов получения HF из полифторида аммония может стать его взаимодействие с кислородом в режиме горения.

Расчетами для системы элементов N-H-F-O было показано, что во всем реальном диапазоне изменения температуры в термодинамически равновесной смеси, когда ко-

© Пашкевич Д. С., Олисов М. А., Капустин В. В., Камбур П. С., Баженов Д. А., Алексеев Ю. И., Петров В. Б., Мухортов Д. А., Смолкин П. А., 2025

личество атомов водорода больше или равно количеству атомов фтора, единственным фторсодержащим веществом является HF, а фториды и фториды-оксиды азота и кислорода отсутствуют.

Тепловой эффект процесса

$$NH_4F \cdot nHF_{газ} + 0{,}75O_{2\,газ} \rightarrow 0{,}5N_{2\,газ} + 1{,}5H_2O_{газ} + (n+1)HF_{газ}, \qquad (1)$$

при n = 1 составляет –294 кДж и адиабатическая температура продуктов без учета диссоциации достигает 2351 К. Таким образом, процесс (1) может быть реализован в режиме горения.

На лабораторной установке с реактором типа туннельной горелки внутренним диаметром 41 мм с электрической спиралью для инициирования фронта пламени при температуре стенки реактора 300 °С были проведены исследования при расходе полифторида аммония порядка 40 мг/с и показано, что сформировать устойчивый факел горения в процессе (1) не удается, несмотря на то, что концентрация аммиака находится внутри концентрационных пределов распространения пламени для его смесей с воздухом.

При подаче в зону реакции фтора в количестве порядка единиц процентов от расхода полифторида аммония также не удалось сформировать стабильный фронт горения. Возможно, что HF, как высоко полярное вещество, является ингибитором процесса окисления аммиака кислородом.

Для стабилизации фронта пламени при сжигании полифторида аммония в кислороде было предложено использовать метан. Расчетами было показано, что для системы элементов N-H-F-O-C в термодинамически равновесной смеси во всем реальном диапазоне изменения температуры, если количество атомов водорода больше или равно количеству атомов фтора, единственным фторсодержащим веществом является HF, а фториды и фториды-оксиды углерода, азота и кислорода отсутствуют.

На лабораторной установке было показано, что при использовании метана:

$$NH_4F \cdot nHF_{газ} + mCH_{4\,газ} + (0{,}75+2m)O_{2\,газ} \rightarrow$$
$$\rightarrow 0{,}5N_{2\,газ} + mCO_{2\,газ} + (1{,}5+2m)H_2O_{газ} + (n+1)HF_{газ}, \qquad (2)$$

когда $m \geq 0{,}25$ факел горения стабилен, конверсия аммиака достигает 98 %, а единственным фторсодержащим продуктом процесса является HF.

На пилотной установке с реактором типа туннельной горелки внутренним диаметром 143 мм и температурой стенки порядка 100 °С был исследован процесс (2). Конструкция реактора описана в [3]. Полифторид аммония подавали в зону реакции с помощью насоса-дозатора в жидком состоянии с расходом порядка 1 г/с по осевому каналу коаксиальной цилиндрической форсунки. По кольцевым каналам форсунки подавали метан и кислород, распыляя расплав полифторида аммония так, что характерный размер капель составлял 300 мкм. Фронт горения инициировали самовоспламеняющейся парой фтор-аммиак, расход фтора составлял единицы процентов от расхода полифторида аммония.

Были проведены опыты при $m = 1$ и показано, что фронт горения стабилен, конверсия аммиака превышала 95 %, а единственным фторсодержащим продуктом являлся HF.

Таким образом, предложенный способ получения HF из полифторида аммония, который получают из водных растворов гексафторкремниевой кислоты, может стать основой промышленного производства этого вещества. При этом будет не только расширена сырьевая база получения HF, но может быть прекращено накопление фторсодержащих отходов производства фосфатных удобрений из фторапатита.

Список источников

1. U. S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey. 2020. P. 61.

2. Туманов В. В., Островский С. В., Старостин А. Г. Сырьевая база фтора в России и других странах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2015. № 4. С. 124–136.

3. Пашкевич Д. С., Зимин А. Р., Алексеев Ю. И., Мухортов Д. А., Камбур П. С., Петров В. Б., Баженов Д. А., Капустин В. В., Смолкин П. А., Федорова Т. А. Получение фторида водорода при взаимодействии обедненного гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 1. С. 154–163.

ПИРОМЕТРИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОРФА В ТОПКЕ ПАРОВОГО КОТЛА БКЗ-210-140Ф

И. А. Заграй*, В. А. Кузьмин

Вятский государственный университет
610000, Российская Федерация, Киров, ул. Московская, д. 36
** ZagrayIA@yandex.ru*

Разработана методика и представлены результаты пирометрирования рабочей среды при сжигании торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Определение температуры газовой фазы выполнено в полосе излучения CO_2, а температуры частиц конденсированной фазы – в полосе прозрачности газовой фазы с помощью пирометров при установлении на них обоснованных значений излучательной способности с учетом степени выгорания топлива и корректной интерпретации экспериментальных результатов.

Проведение пирометрирования рабочей среды при сжигании пылевидных твердых топлив (торфа и угля) подразумевает корректную установку спектральной излучательной способности ε_λ исследуемой среды с учетом длины волны приемника излучения выбранного устройства. Проведенное исследование спектров излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании торфа [1] показало, что пирометрическое определение температуры газовой фазы оптимально в полосе излучения CO_2, а определение температуры частиц – в окнах прозрачности газовой фазы. Раздельное определение температур конденсированной и газовой фаз рабочей среды необходимо для оценки вероятности плавления частиц летучей золы и шлакования экранных поверхностей топки [2], а также для определения уровня образования оксидов азота [3].

В работе рассматривалось факельное сжигание фрезерного торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Состав топлива: $W^р = 51{,}8$ %, $A^р = 6{,}3$ %, $C^р = 24{,}3$ %, $O^р = 13{,}3$ %, $H^р = 2{,}6$ %, $N^р = 1{,}4$ %, $S^р = 0{,}3$ %. Сжигание торфа производилось с «подсветкой» природным газом для обеспечения устойчивого горения и стабилизации пламени. С помощью пирометра Optris CTlaser F2H, воспринимающего излучение в полосе излучения CO_2 ($\lambda = 4{,}24$ мкм), и пирометра Raynger R3I 2MSC, работающего в окне прозрачности газовой фазы ($\lambda = 1{,}6$ мкм), на разных высотах H топки парового котла БКЗ-210-140Ф проведена регистрация температуры в зависимости от установленных на пирометрах значений ε_λ (рис. 1).

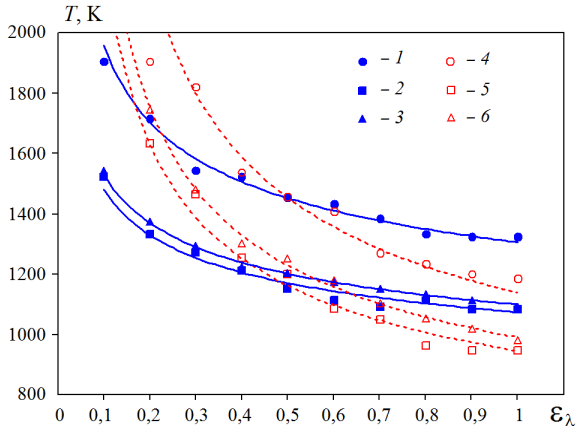


Рис. 1. Зависимости измеренной температуры от задаваемой ε_λ на пирометрах:
1, *2*, *3* – Raynger R3I 2MSC; *4*, *5*, *6* – Optris CTlaser F2H. $H = 9$ м (1, 4), 14 м (2, 5), 16 м (3, 6)

© Заграй И. А., Кузьмин В. А., 2025

Рассчитаны спектральные плотности потоков энергии излучения F_λ, воспринимаемые пирометрами, а также значения яркостных температур $T_я$ для соответствующих высот (табл. 1). Однако для однозначного определения температуры газа или частиц по формуле

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_я} + \frac{\lambda}{C_2} \ln\left[\varepsilon_\lambda + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_я}\right)\right] \quad (1)$$

необходимо знать ε_λ на измеряемом участке факела (C_2 = 14388 мкм·К).

Для определения ε_λ использовалась разработанная нами программа «SPEKTR», которая основана на решении уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3-приближении для излучающей, поглощающей и рассеивающей среды. В работе [4] приведены расчетные значения ε_λ топочных газов для полосы излучения CO_2 (λ = 4,24 мкм) при изменении теоретической (заданной) температуры $T_{теор}$ от 873 К до 1673 К. Пересечение экспериментальной $\varepsilon_\lambda = f(T_{эксп})$ и расчетной $\varepsilon_\lambda = f(T_{теор})$ функций позволили определить действительные значения ε_λ и температуры топочных газов $T_г$ (табл. 1). Конденсированная фаза при сжигании торфа представляла собой дисперсную систему частиц кокса и золы сложного химического состава. Для определения содержания (массовой доли, концентрации) компонентов конденсированной фазы учитывалась зависимость степени выгорания топлива $\beta^{сг}$ по высоте топки. Проведен расчет ε_λ частиц конденсированной фазы (кокса и золы) при увеличении $T_{теор}$ от 1173 К до 1673 К. Пересечение функций $\varepsilon_\lambda = f(T_{эксп})$ и $\varepsilon_\lambda = f(T_{теор})$ показали действительные значения ε_λ и температуры частиц конденсированной фазы $T_ч$ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты пирометрирования

H, м	λ = 4,24 мкм				λ = 1,6 мкм			
	F_λ, Вт/(см^2·мкм)	$T_я$, К	ε_λ	$T_г$, К	F_λ, Вт/(см^2·мкм)	$T_я$, К	ε_λ	$T_ч$, К
9	1,461	1156	0,934	1182	3,642	1305	0,496	1453
14	0,777	939	0,860	978	0,822	1074	0,349	1228
16	0,92	994	0,883	1031	1,002	1100	0,238	1334

По температурам топочных газов проведена оценка уровня образования оксидов азота NOx, концентрация которых составила 500–600 мг/м^3. Измеренные температуры конденсированной фазы при сжигании торфа превышают температуру начала шлакования $T_{шл}$ = 1291 К в корневой и хвостовой частях факела ($T_ч$ = 1453 и 1334 К соответственно). Поэтому в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки.

В работе выполнено пирометрирование рабочей среды при сжигании торфа в топке парового котла БКЗ-210-140Ф с помощью пирометров при установлении на них обоснованных значений излучательной способности с учетом степени выгорания топлива и корректной интерпретацией экспериментальных результатов. Полученные в работе данные позволяют воспользоваться приведенной формулой (1) определения действительной температуры при использовании яркостных пирометров Optris и Raynger (по значениям $T_я$, ε_λ и λ), отследить уровень и характер изменения температуры и излучательной способности по высоте факела при сжигании торфа.

Список источников

1. Кузьмин В. А., Заграй И. А., Десятков И. А. Исследование характеристик излучения и температуры топочных газов парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном

сжигании фрезерного торфа с подсветкой природным газом // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 2. С. 303–313.

2. Кузьмин В. А., Заграй И. А., Десятков И. А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 27–33.

3. Кузьмин В. А., Заграй И. А., Десятков И. А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126–132.

4. Кузьмин В. А., Заграй И. А., Шмакова Н. А. Определение температуры и излучательной способности топочных газов парового котла при факельном сжигании торфа // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 66–74.

КОЭФФИЦИЕНТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОГО ПРЕДТОПКА

К. А. Штым[1], Т. А. Кулагина[2], Т. А. Соловьёва[1*]

[1]Дальневосточный федеральный университет
690850, Российская Федерация, Владивосток, ул. Суханова, д. 8
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** soloveva.ta@dvfu.ru*

Представлены сравнительные результаты расчета коэффициента аэродинамического сопротивления циклонно-вихревого предтопка при сжигании и без горения природного газа в нем. По результатам расчетов при разных вариантах распределения и подвода природного газа на горение рекомендуется при проектировании нового циклонно-вихревого предтопка и при выполнении аэродинамического расчета учитывать влияние процесса горения. Процесс горения приводит к увеличению сопротивления циклонно-вихревого предтопка и перераспределению воздуха по обечайкам.

При исследовании горелочного устройства устанавливается ряд основных зависимостей между конструктивными параметрами горелочного устройства и его характеристиками. Интерес представляют такие характеристики, как аэродинамическое сопротивление, равномерность распределения скоростного потока, углы раскрытия факела, размеры областей возвратных токов в факеле и устье горелочного устройства, дальнобойность факела, скоростные поля в разных сечениях горелочного устройства и в факеле.

Сопротивление циклонно-вихревого предтопка (ЦВП) при горении в нем природного газа увеличивается. Об этом свидетельствуют значения статического давления в воздуховоде, которые зафиксированы при подаче одного и того же расхода воздуха на ЦВП при разных режимах работы ЦВП, а именно: без горения и при горении в ЦВП на трех режимах: режим 1, режим 2 и режим 3. При режиме 1 подвод газа осуществляется комбинированно – через тангенциальные, аксиальные и торцевые вводы газа. Этот режим является основным режимом работы. При режиме 2 подвод газа осуществляется через тангенциальные вводы, а при режиме 3 через аксиальные и торцевые вводы [1].

Сравнение распределения расходов воздуха по обечайкам ЦВП при проведении холодных тарировок и тарировок при горении (рис. 1) показывает, что процесс горения увеличивает сопротивление осевого ввода за счет снижения расхода воздуха в ТВК на 15 %. Это происходит из-за увеличения температуры и объема среды в ЦВП при горении. Расход на тангенциальные вводы по всем обечайкам, без исключения, увеличился, причем на шестую обечайку, находящуюся перед пережимом, приходится самый большой перепад равный 8 %, так как условия стока из шестой обечайки наиболее благоприятные из-за близости выходной амбразуры ЦВП в топку котла, где оказывает влияние разрежение топки и центральной зоны разрежения закрученного потока.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при проектировании и выполнении аэродинамического расчета необходимо учитывать влияние процесса горения в ЦВП, приводящее к увеличению сопротивления ЦВП и перераспределению воздуха по обечайкам.

Сопротивление горелочного устройства характеризуется коэффициентом сопротивления ξ, который можно отнести к любому сечению горелочного устройства [2]. При отнесении ξ к выходным тангенциальным соплам камеры сгорания ЦВП потеря

© Штым К. А., Кулагина Т. А., Соловьёва Т. А., 2025

напора относится к скоростному напору в сечении тангенциальных сопел. Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления ЦВП используется формула [2]:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot W_{вх}^2} + \left(\frac{F_п}{F_в}\right)^2, \quad (1)$$

где ΔP – разность статического давления в воздуховоде перед ЦВП и разрежением в топке котла, Па; ρ – плотность воздуха перед ЦВП, кг/м^3; $W_{вх}$ – средняя расходная скорость потока в тангенциальных соплах, м/с; $F_п$ – площадь поперечного сечения тангенциальных сопел, м^2; $F_в$ – площадь живого сечения подводящего воздуховода, м^2.

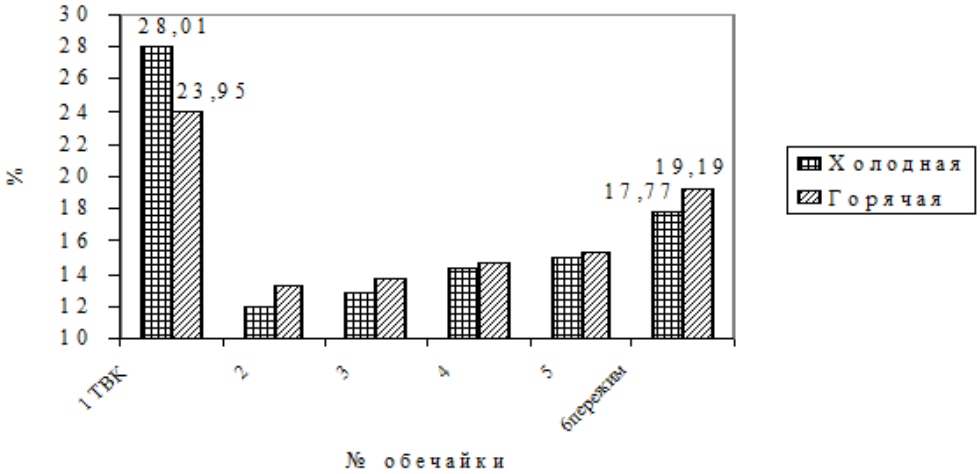


Рис. 1. Влияние процесса горения в ЦВП на распределение воздуха по обечайкам ЦВП

Сопоставление результатов расчета коэффициентов сопротивления ξ предтопка (табл. 1), выполненного по формуле (1), показывает, что коэффициент сопротивления ЦВП без процесса горения в нем равен 3,5, а при организации процесса горения в ЦВП на режимах 1 и 2 возрастает, по сравнению с режимом без горения, на 9,7 %.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента гидравлического сопротивления ЦВП

Наименование	КВГМ-100-150 ст. № 5 Владивостокской ТЭЦ1			
	Режим без горения	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Статическое давление воздуха в воздуховоде прямоугольного сечения перед ЦВП, $P_{ст}$, Па	813,4	1009,4	1009,4	1117,2
Разрежение в топке котла, S, Па	–29,4	–22,5	–25,5	–24,5
Плотность воздуха перед ЦВП, ρ, кг/м^3	1,23	1,23	1,23	1,23
Средняя расходная скорость потока в тангенциальных соплах, $W_{вх}$, м/с	20	21,1	21,1	21,1
Площадь поперечного сечения тангенциальных сопел, $F_п$, м^2	0,41	0,41	0,41	0,41
Площадь поперечного сечения воздуховода, $F_в$, м^2	1,38	1,38	1,38	1,38
Коэффициента гидравлического сопротивления ЦВП, ξ	3,5	3,84	3,85	4,24

Организация режима 3 горения увеличивает ξ в сравнении с режимом без горения на 21 %, так как сказывается влияния обратного тока из топки котла. Стоит отметить, что режим 3 не является основным рабочим режимом, а только растопочным, по-

этому в аэродинамическом расчете воздушного тракта котельной установки, оснащенной ЦВП, целесообразно учитывать коэффициент сопротивления ЦВП при горении при режимах 1 и 2, так как эти режимы являются основными и наиболее экономичными режимами работы ЦВП и котла в целом.

При аэродинамическом расчете газовоздушного тракта котельной установки оснащенной ЦВП рекомендуется использовать значение коэффициента аэродинамического сопротивления ЦВП ξ равного 3,85.

Список источников

1. Shtym K. A., Solov'eva T. A. Conversion of KVGM-100-150 boiler to cyclone-swirl burning of gas // Thermal Engineering., Vol. 62 (3), pp. 202-207, 2015.

2. Иванов Ю. В. Газогорелочные устройства. М. : Недра, 1972.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОДОТОПЛИВНЫХ КАПЕЛЬ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Д. В. Антонов, О. В. Высокоморная*, П. А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** vysokomornyy@yandex.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований микровзрывной фрагментации композиционных водотопливных капель при добавлении к базовому топливу твердых горючих частиц. Зарегистрированы режимы и характеристики вторичной фрагментации капель. Показано, что наличие твердых частиц в базовом топливе интенсифицирует микровзрывной распад.

Микровзрывная фрагментация капель возникает при нагреве композиционных капель, состоящих из неперемешанных компонентов с разной температурной, например, органического топлива и воды [1]. Компонент с более низкой температурой кипения испаряется, разрушая оболочку композиционной капли и тем самым формируя мелкодисперсное облако вторичных фрагментов топливного компонента. Дополнительное измельчение капель за счет микровзрывного распада интенсифицирует процессы тепломассообмена, способствует более эффективному выгоранию топлива. Кроме того, за счет наличия небольшого количества (обычно около 10 об. %) дополнительного низкокипящего компонента могут улучшаться экологические показатели сжигания топлива. Для повышения энергоемкости жидкого топлива можно использовать добавки в виде мелких горючих частиц: углерода, алюминия, железа и т.д.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей и характеристик микровзрывной фрагментации композиционных водотопливных капель с добавками твердых частиц.

Исследования проведены на экспериментальном стенде, общая схема которого представлена на рис. 1.

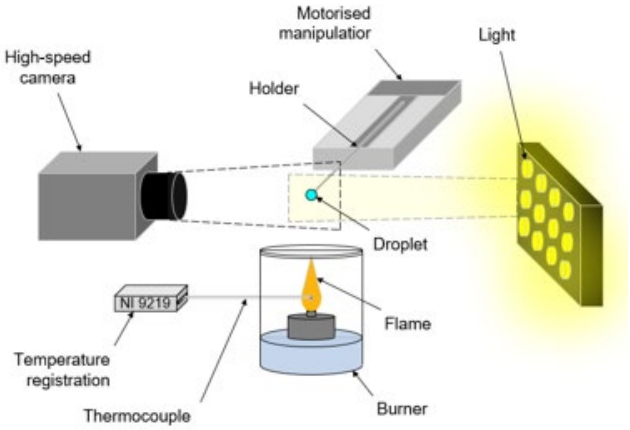


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

В качестве основного топливного компонента использовался керосин марки ТС-1, в качестве низкокипящего компонента – дистиллированная вода. Твердые добавки

© Антонов Д. В., Высокоморная О. В., Стрижак П. А., 2025

к основному топливу – частицы угля марки «К» (тонина помола 100 мкм), наночастицы алюминия и наночастицы железа. Содержание твердых добавок к основному топливу составляло 0,5; 1 и 5 масс.%. Температура нагрева T_g варьировалась от 650 до 1050 K. Композиционные капли формировались автоматическими дозаторами в два этапа: сначала на металлический держатель из нихромовой проволоки сечением 0,2 мм подвешивалась капля воды (0,5 мкл), затем формировалась топливная оболочка (4,5 мкл). Температура в зоне нагрева капель контролировалась высокочувствительными мини-термопарами. Процесс нагрева, испарения и фрагментации композиционных капель регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры (1000 кадров в секунду).

Типичные видеокадры распада композиционных капель представлены на рис. 2.

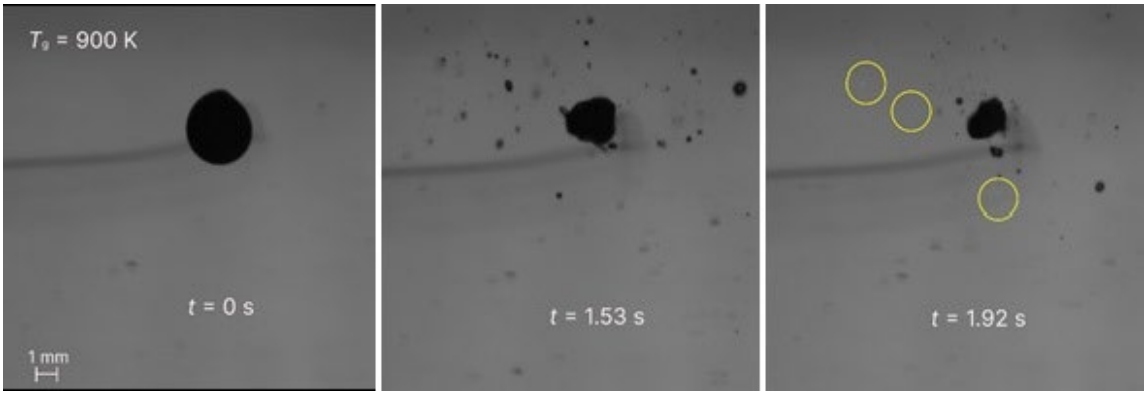


Рис. 2. Типичные видеокадры микровзрывного распада капли состава «Керосин (+Al 5 %) 90/вода 10»

Фрагментация композиционных водотопливных капель с твердыми добавками протекала в режиме интенсивного паффинга (так называемый режим «высокочастотного отделения») – быстрое и непрерывное формирование вторичных жидкостных фрагментов в области вокруг родительской капли [2]. Важнейшими характеристиками вторичной фрагментации является время задержки распада (время от начала нагрева до отделения первого вторичного фрагмента) $\tau_{p/m}$ и время существования капли (время от начала нагрева до полного исчезновения родительской капли) τ_h.

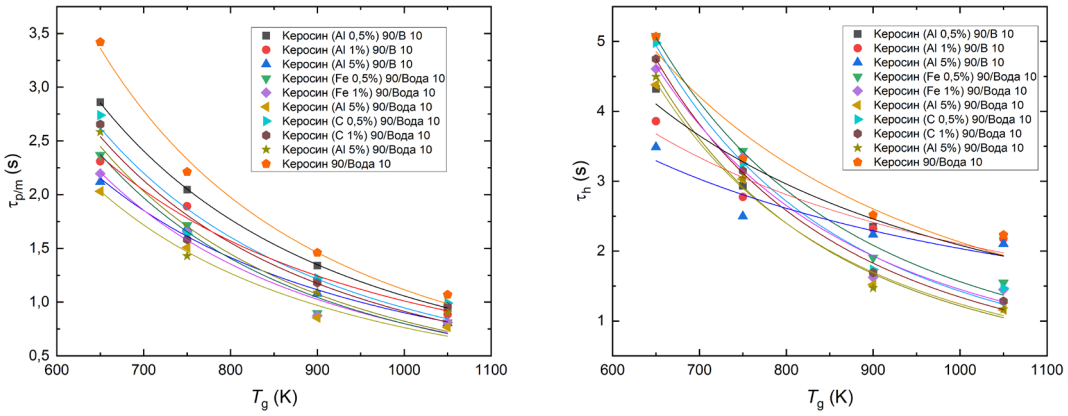


Рис. 3. Значения времен задержки фрагментации (*а*) и времен существования (*б*) композиционных водотопливных капель с разными твердыми добавками при варьировании температуры нагрева T_g и начальном размере родительской капли $D_{d0} \approx 1{,}7$ мм

Добавление твердых частиц к базовому топливу интенсифицировало процесс фрагментации композиционных капель (рис. 3). Повышенные концентрации добавок снижали времена задержки распада и времена существования капель для всех видов исследованных твердых примесей. Полученный результат позволяет сделать заключение о возможности применения твердых высокоэнергетических добавок к базовому топливу для повышения интенсивности фрагментации водотопливных капель.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-69-10006.

Список источников

1. Antonov D. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. 2019. Vol. 142. Pp. 30–41.

2. Liu C., Cui L., Xu J., Cen L., Xu J., Li P., Xiao T., Cao F. Achieving optimal micro-explosions in stable emulsions by adding water-soluble polymers // Chem. Eng. Sci. 2023. Vol. 281. P. 119120.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЭФФЕКТИВНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

С. Б. Есин[1*], П. В. Егоров[1], М. В. Миронова[1], В. М. Фрайфельд[2], А. Л. Демидов[3]

[1] Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И. И. Ползунова
191167, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6
[2] ООО «Энерготех-Эжектор»
620026, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Белинского, д. 86, офис 607
[3] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
** EsinSB@ckti.ru*

Проведены исследования с целью разработки инновационных технических решений по созданию опытно-промышленного образца эффективного вертикального подогревателя сетевой воды (ПСВ) для Уфимской ТЭЦ-2 филиала ООО «БГК» с ООО «Энерготех-Эжектор». ОАО «НПО ЦКТИ» был разработан и поставлен сетевой подогреватель ПСВ-550-0,3-1,6 ЦКТИ-УрФУ.

Теплообменный аппарат ПСВ-550 предназначен для нагрева сетевой воды, протекающей в трубах теплообмена, паром, конденсирующимся в межтрубном пространстве и поступающим в аппарат из станционного коллектора или из теплофикационного отбора турбины ПТ-65/75-130/13 Уфимской ТЭЦ-2. ПСВ-550 представляет собой кожухотрубный теплообменник с пучком гладких теплообменных труб с двумя ходами по сетевой воде (рис. 1).

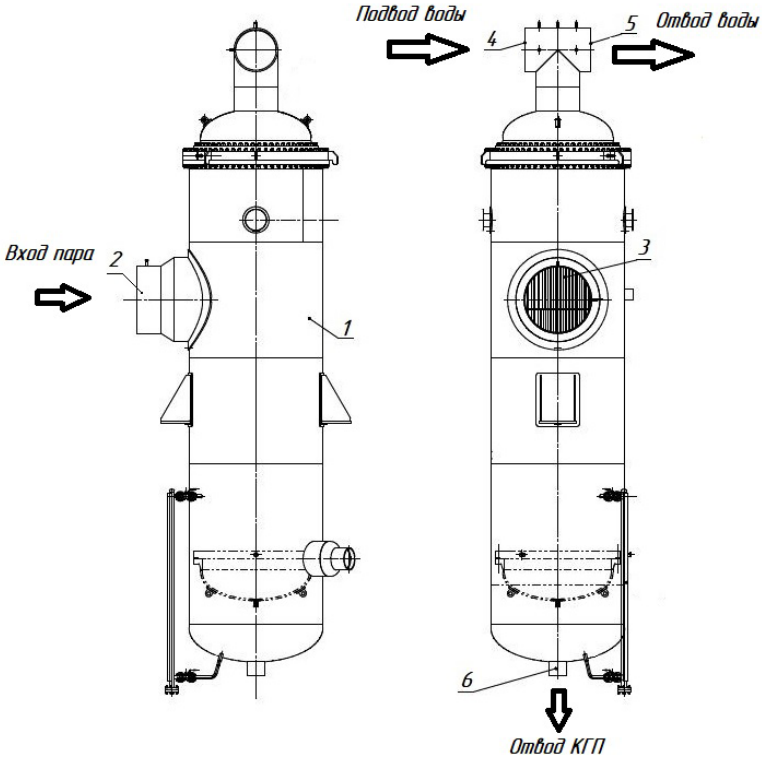


Рис. 1. Общий вид подогревателя сетевой воды

© Есин С. Б., Егоров П. В., Миронова М. В., Фрайфельд В. М., Демидов А. Л., 2025

Греющий пар входит в паровой корпус (*1*) через патрубок подвода (*2*), конденсируется на пучке труб теплообмена (*3*). Сетевая вода подается в аппарат и отводится из него через патрубки *4* и *5* соответственно. Нагретая сетевая вода отводится потребителю. Для отвода конденсата греющего пара (КГП) из аппарата предусмотрен патрубок *6*.

При разработке технического проекта сетевого подогревателя ПСВ-550-0,3-1,6 ЦКТИ-УрФУ, с целью обеспечения надежности и повышения эффективности работы подогревателя были предусмотрены следующие технические решения:

– трубная система подогревателя повернута относительно входа пара в подогреватель на 45°;

– оптимизирована на основе разработок ОАО «НПО ЦКТИ» компоновка трубной системы, расстановка перегородок;

– применена разработанная ОАО «НПО ЦКТИ» схема отсоса паровоздушной смеси с выделенной зоной воздухоотсоса;

– напротив входа пара в подогреватель установлены стержни, которые выполняют роль пароотбойного щита;

– использованы теплообменные трубки диаметром 19 × 1,0 мм из медно-никелевого сплава МНЖ 5-1.

Расстановка перегородок по длине трубного пучка в рассматриваемой конструкции ПСВ определяется из соображений минимизации разницы тепловой мощности секций, что приводит к равномерному распределению конденсата по секциям, а значит – и к более равномерному его удалению.

При проектировании ПСВ были использованы методики расчета, изложенные в [1; 2], и численное моделирование с применением вычислительной газодинамики с заменой трубного пучка, состоящего из 1926 труб, эффективной пористой средой. Данный подход к моделированию подогревателей, разработанный совместно с Сибирским федеральным университетом [3], позволяет учитывать влияние следующих факторов: присутствие в паре неконденсирующихся газов, геометрические характеристики трубного пучка, наличие нескольких ходов по нагреваемой среде, конфигурацию отсасывающего устройства, изменение температуры сетевой воды по ходу движения среды в трубах.

После изготовления и поставки ПСВ на Уфимскую ТЭЦ-2 были проведены режимно-наладочные испытания. Результаты испытаний показали, что фактический недогрев воды до температуры насыщения при номинальном режиме работы подогревателя составляет 8,4 ºС (проектная величина t = 12,5 ºС), а коэффициент теплопередачи составил 5108 Вт/м^{2}К (при заявленном К = 5000 Вт/м^{2}К).

Изменение давления пара в теплофикационном отборе за счет снижения температурных напоров в новом вертикальном сетевом подогревателе ПСВ-550-0,3-1,6 ЦКТИ-УрФУ составит 0,1–0,4 кгс/см^2, что позволит повысить эффективность вырабатываемой мощности в паровой турбине.

Анализ результатов испытаний показал, что новый подогреватель ПСВ-550-0,3-1,6 ЦКТИ-УрФУ эффективней серийного подогревателя ПСВ-500-3-23 на 20–35 %.

Список источников

1. РТМ 108.271.23-84 Расчет и проектирование поверхностных подогревателей высокого и низкого давления // НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова. 1987. 216 с.

2. РД 24.035.05-89 Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС // НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова. 1991. 212 с.

3. Есин С. Б., Миронова М. В., Сухоруков Ю. Г., Минаков А. В., Платонов Д. В. Моделирование процессов тепломассообмена в подогревателях низкого давления для АЭС и ТЭС // Всероссийская конференция «XL Сибирский теплофизический семинар» : сб. тезисов докладов 20–23 августа 2024 г. Новосибирск, 2024. С. 56.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ ИЗ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Е. А. Еремеев, К. Ю. Ушаков*, А. Р. Богомолов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, д. 28.
** ushakovkju@kuzstu.ru*

В работе представлены технические характеристики вырабатываемого обводненного угольного кека на ОФ Северная и полученных из него брикетов. Экспериментально и теоретически обосновано отсутствие необходимости применения связующих веществ, при этом экспериментально и теоретически определена необходимость в добавлении компонента, отнимающего влагу от поверхности частиц, – древесных опилок. Показан оптимальный для промышленных испытаний состав брикета на основе кека и древесины и определены технологические характеристики процесса изготовления.

На обогатительных фабриках Кузбасса образуются отходы основного производства в виде обводненной пластической массы с рабочей зольностью на сухое вещество около 40 % и классом крупности преимущественно около 80–250 мкм. Использование по прямому назначению указанных отходов затруднительно или практически невозможно из-за хорошей адгезии кека (шлама) к любой поверхности транспортного средства. Одним из вариантов их использования является брикетирование и последующее сжигание в бытовых и производственных котлах. Объект исследования в представленной работе – кек (шлам) обогатительной фабрики Северная АО УК Северный Кузбасс. Предмет – закономерности влияния параметров прессования (давление, температура и время сушки при одновременном наборе прочности) и состава наполнителя (оптимальное сочетание пропорции кека и осушающего компонента) на прочностные характеристики. В процессе работы проводились исследования по добавлению различных пород древесины, испытания на механическую прочность брикетов, определялись параметры брикетирования и сушки.

На первом этапе был выполнен технический анализ образцов кека, приведенного к аналитической влажности ($W^a = 1{,}28\ \%; A^a = 47{,}35\ \%;\ V^a = 14{,}30\ \%$), при исходной влажности 41–42 %. Необходимо отметить, что в процессе определения влажности кека анализируемые образцы небольшой массы не обращались в рассыпчатую массу, а представляли собой пористую структуру в виде одного кусочка. Это свидетельствует о том, что поверхность мелких частиц имеет химические соединения, способствующие удержанию между собой и противодействующие разрушению при сдавливании. Можно предположить, что связующими компонентами являются оставшиеся на поверхности частиц флотореагенты и в большей степени флокулянты, используемые при флотации и коагуляции. Именно эти компоненты удерживают влагу в массе кека и не позволяют удалить ее даже при сжатии в пресс-форме. Из изложенного следует, что исследования о возможности брикетирования угольного кека и получения прочного брикета необходимо вести в направлении испытания материалов, хорошо отнимающих влагу от поверхности частиц и затем отдающих воспринятую влагу при прессовании.

В процессах со смачиванием важную роль играет капиллярное давление, которое возникает из-за искривления поверхности жидкости в месте контакта жидкости с твердым телом, имеющим преимущественно цилиндрическую форму. Условием удаления (отнимания) влаги из обводненного кека (шлама) является превышение капиллярного давления в отнимающем компоненте при соприкосновении с влагой кека (шлама). Т. е. радиус капилляров вводимого тела должен быть меньше, чем размер порового (пори-

© Еремеев Е. А., Ушаков К. Ю., Богомолов А. Р., 2025

стого) пространства частиц кека (шлама). Наименьшим размером порового пространства кека (шлама) примем 80 мкм. Наиболее приемлемым водоотнимающим средством может служить древесина, лузга и другие продукты растительного происхождения. В работе в качестве отходов деревообработки использовались опилки хвойных пород древесины: сосна и пихта (табл. 1).

Таблица 1

Технические и текстурные характеристики опилок

Образец	W^a, %	A^a, %	V^a, %	F, м^2/г	$D_{пор}$, нм	V, см^3/г
Сосна	8,46	0,13	77,82	0,99	7,38	0,005
Пихта	9,82	0,56	72,84	1,2	9,77	0,006

Примечание. F – величина удельной поверхности в м^2/г; $D_{пор}$ – средний диаметр пор, нм; V – средний объем пор, см^3/г.

На первом этапе было определено влияние концентрации отнимающих влагу компонентов в брикете (без предварительной сушки кека) на технологические характеристики брикета и его прочность на сбрасывание. Определено: при увеличении содержания древесных опилок в составе брикета увеличивается выход летучих и теплота сгорания брикета, при этом зольность снижается. Отметим, изменения имеют незначительный характер, поэтому определяющим является фактор прочности брикетов. Так, при определении прочности брикетов с содержанием древесных опилок более 10 %, прочность брикетов на сбрасывание составила 0 % (брикеты рассыпались на мелкие кусочки с первого же сбрасывания), причем данное значение прочности было характерно для сушки брикетов в течение 24, 48 и 76 ч в воздухе при комнатной температуре.

С целью определения влияния исходной влажности кека на прочностные характеристики брикета были изготовлены брикеты из кека влажностью 41–42 % (исходное состояние) и из кека, подвергнутого сушке на воздухе в течение 7 ч (Wр = 37–38 %) и 30 ч (Wр = 34–35 %). Исходя из значений прочности на сбрасывание, можно сделать вывод о нецелесообразности предварительной сушки кека. Брикет, изготовленный из кека с рабочей влажностью кека 41–42 %, после сушки на воздухе не уступает по прочности брикетам, изготовленным из предварительно подсушенного кека (значение прочности всех образцов брикетов превышает 95 %). Эта зависимость характерна для брикетов с массовым соотношением кек/древесина = 97/3 и 95/5. Брикеты, выполненные с увеличенным содержанием древесины (93/7), не имеют стабильной закономерности по прочности и не рекомендованы для дальнейшего рассмотрения. Стоит отметить важный факт для промышленного изготовления брикетов: брикеты с отношением 97/3 при выходе из пресс-формы более пластичные, т. е. могут быть подвержены изменению формы при выходе из фильеры экструдера/пресс-формы и падении на ленту транспортера. Одним из способов увеличения прочности брикета в процессе брикетирования (с целью сохранения формы при перемещении к месту сушки) является нагрев пресс-формы. Так, в исследовании было определено влияние температуры пресс-формы на прочность брикета в момент завершения процесса брикетирования: для брикета, выполненного на пресс-форме без нагрева, имеется видимая деформация как по оси, так и по высоте, величина деформации уменьшается с увеличением температуры пресс-формы и выражается незначительным вдавливанием края, на который пришелся удар. Для брикета, полученного при нагреве пресс-формы до 100°С, деформация не наблюдается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024. (FZES-2024-0001).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТКО НА СТРОЯЩИХСЯ В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ТЭС НА ТКО

А. Э. Зелинский[1*], А. Н. Тугов[2]

[1]ООО «Специальная энергия»
Российская Федерация, Москва
[2]АО «Всероссийский теплотехнический институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводской проезд, д. 4/1
** a.zelinskiy@seaem.ru*

Термическая утилизация твердых коммунальных отходов (ТКО) приобретает все большее значение во многих крупных городах по всему миру из-за быстрой урбанизации и роста населения. Преимущества производства энергии и значительное сокращение объема отходов, отправляемых на свалки, также способствуют его более эффективной адаптации для управления твердыми отходами в этих городах. В то же время воздействие загрязняющих веществ, выделяющихся в процессе сжигания, на окружающую среду является общей проблемой, которую необходимо должным образом решать. Чтобы свести к минимуму выбросы загрязняющих веществ при сжигании ТКО, а также для повышения энергоэффективности установок термической утилизации критически важно оптимизировать эффективность сжигания в сжигательной установке, что потребует разработки надежных подходов, основанных на моделировании вычислительной гидродинамики (CFD).

В Воскресенском, Наро-Фоминском, Солнечногорском и Ногинском районах Московской области ведется строительство заводов для термической переработки ТКО производительностью 700 тыс. т/год и установленной электрической мощностью 70 МВт.

В составе каждого завода входят три паровых котла типа Е-95-7,0-430 (П-152) производства АО «ЗиО-Подольск», паровая турбина Кп-77-6.8 с тремя нерегулируемыми производственными отборами производства АО «УТЗ», турбогенератор с воздушным охлаждением ТФ-80-2У3 (НПО «ЭЛСИБ») и воздушно-конденсационная установка.

В настоящее время на первом заводе в Воскресенском районе вблизи дер. Свистягино начались пусконаладочные работы по основному оборудованию.

В период пусконаладки и последующей эксплуатации котельного оборудования основные трудности связаны с системой управления горением CCS. По нашему опыту, системы управления горением импортного производства представляют собой «черный ящик» с базовыми настройками, которые трудно и не всегда возможно полностью оптимизировать применительно к конкретным условиям (российский состав ТКО, типоразмер оборудования и т. д.), даже по результатам выполнения большого объема режимно-наладочных опытов. Выполнять наладку без предварительного численного моделирования чревато рисками повреждения оборудования и экологическими последствиями. Кроме того, подход к регулированию мощности на предприятиях, сжигающих отходы, в России и за рубежом различный.

Определить оптимальные параметры системы регулирования и подогрева воздуха (в т. ч. его распределение в различные зоны колосниковой решетки), динамические характеристики этой решетки, равномерность распределения газообразных продуктов сжигания отходов для гарантированной высокотемпературной выдержки в течение 2 с, расположение камеры видеонаблюдения за положением пламени на колосниках и многое другое без результатов математического моделирования невозможно.

Благодаря последним достижениям в области вычислительной техники и теории термогидродинамики, использование вычислительной гидродинамики (CFD) может

© Зелинский А. Э., Тугов А. Н., 2025

значительно облегчить проектирование установок для сжигания отходов. CFD позволяет детально спрогнозировать поля потока газов, а также температуру и газораспределение для конкретной установки для сжигания отходов, что позволяет осуществлять проектирование на научной основе.

Мировой опыт показывает, что для всех современных установок, сжигающих ТКО, на этапах проектирования и перед вводом их в эксплуатацию выполняют численные исследования с использованием математического моделирования [1–5].

В настоящем докладе приводится обзор применяемых в мировой практике методов компьютерного моделирования процессов сжигания ТКО в слое отходов.

Список источников

1. Lai A. C. H., Law A. W.-K. (2019). Numerical modeling of municipal waste bed incineration. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 29(2), 504-522. doi:10.1108/hff-04-2018-0165

2. Xiaozhou Liu a, Taimoor Asim b*, Guangyu Zhu a, Yu Zhang a and Rakesh Mishra Experimental Investigations on a Grate Incinerator of L-shaped Flame Fueled by Rural Solid Waste. International journal of COMADEM Vol 22 No 02 (April 2019)

3. Yang Y. B., Sharifi V. N., Swithenbank J. Converting moving-grate incineration from combustion to gasification –Numerical simulation of the burning characteristics// Sheffield University Waste Incineration Centre (SUWIC), Department of Chemical and Process Engineering, Sheffield University. – Sheffield, 2006.

4. Modeling On-Grate MSW Incineration with Experimental Validation in a Batch Incinerator Abhishek Asthana, Yannick Me´nard, Philippe Sessiecq, and Fabrice Patisson Sheffield Hallam University Research Archive http://shura.shu.ac.uk

5. Тугов А. Н. Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт: обзор // Теплоэнергетика. 2022. № 12. С. 5–22.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ЦВП

А. В. Кулик*, Е. В. Базилевич,
Т. А. Соловьёва, К. А. Штым

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10
** Kulik_av@dvfu.ru*

В работе представлены результаты исследования параметров закрученного потока внутри лабораторной модели циклонно-вихревой камеры с изменяемой геометрией тангенциальных воздушных сопел. Приводится сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными на промышленном образце.

С целью совершенствования циклонно-вихревой технологии сжигания органических топлив были проведены исследования горения закрученных потоков как в лабораторных условиях, так и непосредственно на энергетических объектах [1–5]. Циклонно-вихревой предтопок (ЦВП) в упрощенном виде представляет из себя комплекс гидравлических сопротивлений, состоящий из местных сопротивлений, таких как входная камера распределения, обечайка (поворот на 360°), сужение (сопловые вводы) и расширение (истечение из сопел в камеру сгорания), а также пережим (диафрагма на выходе из камеры сгорания).

Известно, что при расчете оптимальных характеристик применяются безразмерные соотношения, такие как калибр ($\bar{L}$) камеры сгорания (КС), вычисляемый как отношение длины КС к ее диаметру, относительный диаметр пережима (dп), определяемый отношением диаметра пережима к диаметру КС, относительная высота тангенциальных сопел ($\bar{h}$) – отношение высоты тангенциальных воздушных сопел к радиусу КС [1].

Лабораторная модель ЦВП изготовлена с учетом безразмерных соотношений, характерных для промышленного образца. Промышленным образцом являлся ЦВП мощность 65 МВт, установленный на котле КВГМ-100 Владивостокской ТЭЦ-1 [5]. Основной особенностью лабораторной модели ЦВП является отсутствие огнеупорной обмуровки, а также наличие механизмов, позволяющих изменять высоту тангенциальных воздушных сопел и положение газовых вводов относительно среза тангенциальных воздушных сопел [6].

Пневмометрическим методом [7] с помощью трехканального зонда в экспериментальном сечении (таком же, как на промышленном образце) измерялись полное и статическое давление, а также температура и направление потока в зависимости от радиуса КС *R*. На основании этих данных были рассчитаны значения тангенциальной w_φ и осевой w_x скорости, а также циркуляция скорости Г закрученного потока внутри КС при различных расходах воздуха в ЦВП и различных высотах тангенциальных воздушных сопел. Измерения проводились с шагом 2 мм по радиусу, при расходах воздуха 386, 449 и 513 л/мин, на каждом расходе тангенциальные воздушные сопела устанавливались в положения от 1 до 4, что соответствовало *h* от 0,8 до 3 мм.

Для сравнения результатов измерения на лабораторной модели и на промышленном образце проводилось обезразмеривание значений тангенциальных скоростей $\bar{W}=w_\varphi/w_{\varphi max}$ и радиусов $\eta=R/R_{\varphi max}$ измерения по максимуму тангенциальной составляющей скорости закрученного потока $w_{\varphi max}$ и радиуса, на котором зафиксирована эта максимальная скорость $R_{\varphi max}$ [1].

© Кулик А. В., Базилевич Е. В., Соловьева Т. А., Штым К. А., 2025

Далее была рассчитана относительная циркуляция скорости $\bar{\Gamma}=\bar{W}*\eta$, график которой представлен на рис. 1.

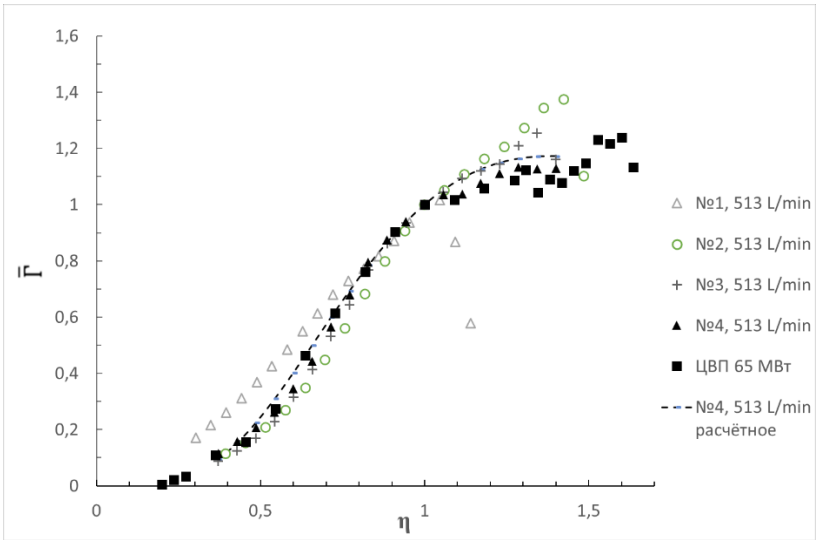


Рис. 1. Безразмерная циркуляция скорости от безразмерного радиуса КС

Из графика на рис. 1 наблюдается удовлетворительное количественное соответствие опытных данных с промышленного ЦВП (черные квадраты) и лабораторного при расходе воздуха 513 л/мин и 4-м положении тангенциальных воздушных сопел (черные треугольники), что соответствует $\bar{h} = 0{,}06$, в то время как на промышленном предтопке $\bar{h} = 0{,}07$.

Из полученных результатов следует, что оптимальные параметры конфигурации КС, полученные на лабораторном ЦВП, можно применить для модернизации конструкции промышленных образцов ЦВП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZNS-2025-0009.

Список источников

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками : монография. Владивосток : Изд. дом Дальневосточного федерального ун-та, 2012. 419 с.

2. Aleksandr V. Kulik, Evgenij Iu. Dorogov, Tatyana A. Soloveva and Konstantin A. Shtym Experimental Study of Temperature Distribution in a Cyclone-Vortex Furnace // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2021 14(1): 140–145.

3. А.В. Лесных, К.А. Штым, М.В. Упский, Методы снижения выбросов оксидов азота в котлах с воздухоохлаждаемыми циклонно-вихревыми предтопками // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2020 13(1): 69–83.

4. Лесных А. В., Штым К. А., Соловьева Т. А. Методы снижения эмиссии оксидов азота NOx при циклонно-вихревом сжигании топлив // Экология энергетики 2017 : сб. трудов международной научной конференции молодых ученных и специалистов. М. : МЭИ, 2017. С. 24–27.

5. Соловьева Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками : дис. … канд. техн. наук, 05.14.04; J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C.A. Zemach. A Continuum Method for Modeling Surface Tension // J. Comput. Phys., Vol. 100, pp. 335–354, 1992.

6. Патент РФ № 225542 23.04.2024. Кулик А. В., Мокрин С. Н., Штым К. А., Соловьёва Т. А. Циклонный предтопок// Заявка №2023130784 25.11.2023.

7. Методические указания по испытаниям топочных и горелочных устройств котельных установок: СО 34.26.724 (МУ 37-70-180-87): утв. Производственным объединением по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Союэтехэнерго» 29.07.87. Ввод в действие с 01.01.88.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОРИСТЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

А. В. Кулик[1], И. В. Каныгин[1], С. Н. Мокрин[1], Ю. Б. Гончаренко[1, 2], К. А. Штым[1]

[1] Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, остров Русский, п. Аякс, д. 10
[2] ОАО «Хабаровская энерготехнологическая компания»
Российская Федерация, Хабаровск
** Kulik_av@dvfu.ru*

В работе представлена технология безмазутного розжига пылеугольных котлов с применением интерметаллидных радиационных пористых горелок. Описаны основные элементы системы безмазутного розжига, приведены характеристики опытной установки.

На большинстве тепловых электростанций для растопки пылеугольных котлов и поддержания устойчивой работы котлов на режимах малой мощности используется мазут. Для этого через мазутный факел подается пылеугольная смесь [1]. Подсветка мазутным факелом также необходима для обеспечения устойчивого горения пылеугольного факела внутри топки котла при использовании угля с различными свойствами и составом. Это приводит к устойчивой, но неэффективной и экологически небезопасной работе котла. Стоимость мазута существенно выше, чем угля. Таким образом, для описанных выше процессов целесообразно использовать более дешевое топливо. Например, сжиженный углеводородный газ (СУГ). Основная проблема совместного сжигания угля и газа связана с высокой реакционной способностью газового топлива по сравнению с углем. Кроме того, газовая горелка не способна генерировать лучистый тепловой поток, достаточный для воспламенения угольной пыли. Одним из путей преодоления этих проблем является стабилизация пылеугольного факела в лучистом тепловом потоке высокой плотности, создаваемом радиационными пористыми горелками, работающими на газовом топливе. В данной работе представлены результаты разработки и промышленного внедрения без мазутной системы пылеугольного розжига на основе радиационных пористых горелок.

Индустриальный партнер – компания «РусГидро» – предложила в качестве объекта для опытного внедрения электростанцию, расположенную в городе Биробиджан. Пилотное устройство было установлено на пылеугольном котле БКЗ-75ФБ вместо одной из двух мазутных форсунок. Основной частью аппарата является узел розжига, который включает в себя две последовательные секции. Каждая секция состоит из четырех газовых горелок (модулей) мощностью 12 кВт, где в качестве излучателя использовалась интерметаллическая пористая пластина Ni-Al размером 280 × 160 × 17 мм, полученная методом СВС [2]. Корпус модуля изготовлен из стали, покрытой изнутри высокотемпературной теплоизоляцией. Газовый коллектор был смонтирован со стороны, противоположной излучателю. Использовался воздух от компрессора и сжиженный газ. Воспламенение горючей смеси осуществлялось свечой зажигания. Модули были установлены напротив друг друга в вертикальной и горизонтальной плоскостях на расстоянии 180 мм. Таким образом, восемь модулей узла зажигания образовывали квадратный канал размером 180 × 180 × 650 мм, а свободный конец был подключен к пылепроводу. Угольная пылевоздушная смесь направлялась из подающего тракта соседнего котла.

© Кулик А. В., Каныгин И. В., Мокрин С. Н., Гончаренко Ю. Б., Штым К. А., 2025

Узел зажигания достигал рабочей температуры излучателей (~1000 °C) через 5 мин. после запуска. Затем пылевоздушная смесь, подаваемая в узел зажигания, воспламенялась и образовывала факел угольной пыли внутри топки котла. Через 15 мин. пилотный пылеугольный факел вышел на устойчивый самоподдерживающийся режим, и подача газа прекратилась. Однако подача воздуха в узел розжига не прекращалась во избежание шлакования.

Средний расход мазута на холодный пуск котла составляет 3,6 т, что эквивалентно тепловыделению 9 т угля. Тестовые эксперименты показали, что расход сжиженного газа разработанного узла розжига с восемью модулями за 15 мин. составил 15 л. Таким образом, с учетом фактической стоимости энергоресурсов экономический эффект от промышленного внедрения разработанной безмазутной системы розжига на пылеугольном топливе обеспечивает снижение затрат на растопку котла до 2,85 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZNS-2025-0009.

Список источников

1. Burdukov A. P. Chernova G. V. Konovalov V. V. Churashev V. N. Development of technology for oil-free plasma kindling and lightning based on ultra-fine pulverized coal fuel, Izvestiya Tomskogo Polytehnicheskogo Universiteta. Georesources Engineering 2002.

2. Maznoy A., Pichugin N., Kirdyashkin A. Zambalov S., Guschin A. Predicting oxidation-limited lifetime of Ni-Al-Cr porous radiant burners made by combustion synthesis, Journal of Alloys and Compounds., 2023, 934, 167885.

ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

К. А. Штым[1], Т. А. Соловьёва[1], А. А. Глазебная[2*]

[1]Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10
[2]Научно-исследовательский центр «РусГидро»
** glazebnaia.aa@dvfu.ru*

Защита от коррозии металла во время эксплуатации, ремонтов и простаивания оборудования является одним из главных условий экономической работы теплоэнергетических объектов. В данной работе представлены существующие методики исследования коррозионного износа в низкотемпературных поверхностях нагрева, определена наиболее оптимальная для изучения коррозионного износа поверхностей нагрева низкотемпературных конденсационных теплообменников.

В современных условиях энергосбережения и повышения эффективности использования ресурсов–низкотемпературные конденсационные теплообменники (НКТ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, химическая промышленность, пищевая промышленность и др.

Для утилизации теплоты из уходящих газов за водогрейным котлом КВГМ-100-150 установлен НКТ (рис. 1). Конденсация водяных паров из дымовых газов позволила снизить температуру уходящих газов до 55 °С и потери теплоты с уходящими газами, повысить КПД котла на 0,3 % [2].

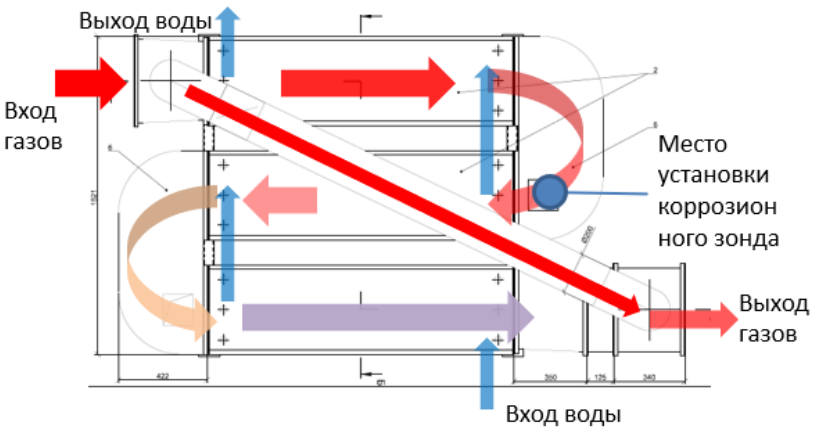


Рис. 1. Схема движения основных потоков экспериментального конденсационного теплообменника

При эксплуатации таких теплообменников возникает проблема коррозионного износа поверхностей нагрева, что может привести к снижению эффективности работы оборудования и увеличению затрат на его обслуживание и ремонт.

Наиболее распространенными методами исследования коррозионного износа являются:

1. Визуальный осмотр. Наиболее простой и доступный метод, который позволяет обнаружить видимые признаки коррозии, такие как ржавчина, трещины, отслоения

© Штым К. А., Соловьева Т. А., Глазебная А. А., 2025

и другие дефекты на поверхности теплообменника. Однако этот метод не всегда позволяет точно определить степень износа и характер коррозионных процессов.

2. Металлографический анализ. Метод предполагает изготовление микрошлифов поверхности теплообменника и их исследование под микроскопом. Он позволяет определить структуру металла, наличие микротрещин, пор и других дефектов, которые могут привести к коррозии, однако для использования данного метода требуется наличие специального оборудования и квалифицированных специалистов.

3. Химический анализ. Метод предполагает определение химического состава поверхности теплообменника. Он позволяет обнаружить наличие химических элементов, которые могут привести к коррозии. Этот метод также требует наличия специального оборудования и квалифицированных специалистов [1].

4. Гравиметрический метод.

Для расчета и оценки изменения показателей скорости коррозии НКТ котла КВГМ-100–150 выбран гравиметрический метод, основное преимущество которого заключается в отсутствии необходимости использовать специфическое дорогостоящее оборудование и простоте.

При использовании данного метода подготавливаются коррозионные образцы, круглые диски диаметром 60 мм и толщиной 15 мм с отверстием в центре (изготавливаются из того же материала, что и НКТ). Поверхность пластинок шлифуется и промывается раствором щелочи и спирта. Перед установкой в НКТ котла КВГМ-100-150 (рис. 1) высушенные и выдержанные в течение суток в эксикаторе пластинки взвешивают на аналитических весах. Диски крепятся на специальный водоохлаждаемый зонд (рис. 2).

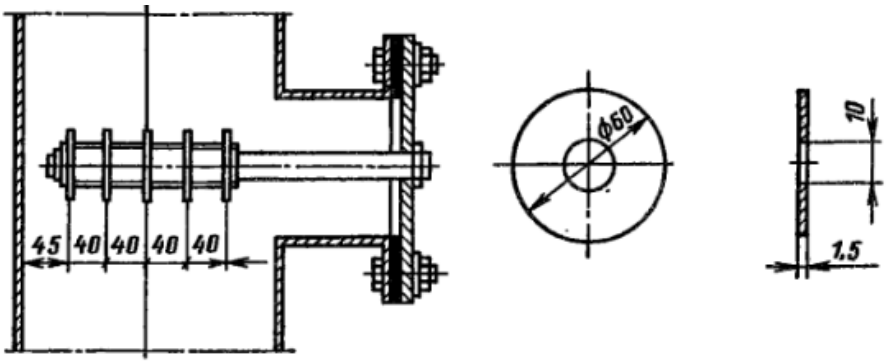


Рис. 2. Коррозионный зонд

После окончания испытаний пластинки извлекают, слои продуктов коррозии и отложений с их поверхности удаляют струей воды и мягкой резинкой. Очищенные пластинки промывают спиртом и сушат в течение суток, после чего взвешивают [1]. Среднее значение скорости равномерной коррозии металла вычисляется по формуле

$$\text{СК} = (q_1 - q_2) \times \frac{10^4}{(S\tau)} mc^2, \quad (1)$$

где CR – скорость коррозии, г/(м^2·ч); q_1– масса пластины до начала опытов, г; q_2 – масса пластины после опытов, г; S – общая площадь поверхности пластинки, м^2; τ – длительность испытаний, ч.

Установка коррозионных образцов производится на месте существующего лючка в НКТ (рис. 1) для контроля конденсации дымовых газов. Стоит отметить, что при использовании данного метода большое значение имеет длительность опытов, так как

скорость коррозии в зависимости от времени, как правило, имеет затухающий характер. В начале проведения исследований она может быть в несколько раз больше средней скорости за длительный период испытаний.

Использование зонда наиболее предпочтительно, ввиду отсутствия необходимости вмешательства в тепловую схему котла и НКТ, легкости использования и транспортировки, а также малозатратности. Результаты исследования позволят оценить продолжительность эффективной работы НКТ.

Список источников

1. Акользин А. П. Контроль коррозии металла котла. М. : Энергоатомиздат, 1994. 240 с.

2. Кихайогло Е. Ф., Соловьева Т. А., Штым К. А. Постановка исследований процессов теплообмена в конденсационном теплообменнике котла с предтопками // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 г. / отв. за выпуск Д. В. Платонов. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. С. 44–45.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В КОТЛЕ С ЦИКЛОННО-ВИХРЕВЫМИ ПРЕДТОПКАМИ

А. В. Лесных*, К. А. Штым, А. А. Глазебная

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10
** lesnykhav@mail.ru*

Обеспечение высоких экологических показателей работы теплоэнергетического оборудования является одной из значимых задач наряду с эффективностью и надежностью. Цель данной работы – изучение особенностей образования оксидов азота в котлах с циклонно-вихревыми предтопками и выявление факторов, влияющих на их образование.

На текущем уровне развития теплоэнергетики, с вводом новых мощностей, повышением эффективности использования топлива, остро стоит вопрос об улучшении экологических показателей работы топочных устройств. После ухода с российского рынка иностранных производителей горелочных устройств, необходимо наращивать темпы импортозамещения. Одним из вариантов горелочного устройства является циклонно-вихревой предтопок (далее – ЦВП), который показывает высокие показатели эффективности при сжигании природного газа и мазута в водогрейных котлах [1]. Однако с точки зрения эмиссии вредных выбросов данный тип горелочного устройства имеет свои особенности.

В отличие от традиционных горелочных устройств, для которых характерен рост эмиссии вредных выбросов, и их удельных значений, в частности оксидов азота, который является основным при сжигании газообразного топлива, в котлах с ЦВП характерна обратная тенденция.

Для понимания протекающих при горении в ЦВП процессов были проведены внутрициклонные исследования, с помощью многоканального водоохлаждаемого измерительного зонда. Исследования проводились на котле КВГМ-116,3-150, оснащенном двумя ЦВП мощностью 65 МВт каждый, размещенными на боковых стенах топочной камеры [2].

При нагрузке котла 56 МВт максимальная температура в камере сгорания ЦВП достигала 1723 К, при этом характер ее изменения резкий скачкообразный, начало повышения наблюдается в пристенной области. Пики температур по сечению соответствуют резким провалам содержания кислорода в газовоздухотопливной смеси. Зона образования оксидов азота обширная и занимает значительную часть объема камеры сгорания, достигая значений 670 мг/м^3. При этом концентрация оксидов азота в уходящих газах составила 218 мг/м^3 при коэффициенте избытка воздуха 1,49.

При нагрузке котла 105 МВт максимальная температура в камере сгорания составляет 1380 К, убыль концентрации кислорода незначительная, зона образования оксидов азота узкая, находится в приосевой зоне камеры сгорания, максимальная измеренная концентрация составила 47 мг/м^3. Соответственно, из-за высоких скоростей потоков продукты сгорания незначительной части топлива пребывают малое время в устройстве с высоким тепловым напряжением, а основное горение на высоких нагрузках смещено в топочную камеру. Концентрация оксидов азота в уходящих газах составила 115 мг/м^3 при избытке воздуха 1,05.

При нагрузках, близких к номинальной, котлы с ЦВП обладают удовлетворительными экологическими показателями работы, для обеспечения же низкой эмиссии оксидов на минимальных нагрузках требуется применение дополнительных топочных

© Лесных А. В., Штым К. А., Глазебная А. А., 2025

мероприятий, таких как впрыск влаги, который может быть осуществлен через штатные многосопловые центробежные форсунки, в зону максимальных температур, которая с ростом нагрузки смещается в топочную камеру [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2025-0009.

Список источников

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками : монография. Владивосток : Изд. дом Дальневосточного федерального ун-та. 2012. 421 с.

2. Лесных А. В., Штым К. А., Упский М. В. Методы снижения выбросов оксидов азота в котлах с воздухоохлаждаемыми циклонно-вихревыми предтопками // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 13, № 1. С. 69–83.

3. Кихайогло Е. Ф., Лесных А. В., Гончаренко Ю. Б. Разработка технических решений снижения вредных выбросов в водогрейных котлах с циклонно-вихревым предтопком и низкотемпературным теплообменником // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 8. С. 948–960.

СЖИГАНИЕ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

С. С. Алексеев*, В. А. Верещетин

АО «Всероссийский теплотехнический институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корп. 1
* *SSAlekseev@vti.ru*

В работе рассматривается вопрос сжигания в энергетических котлах водородосодержащих газов в различных соотношениях метана и водорода в смеси. Выявлены проблемы с достижением номинальных параметров пара при переводе действующих котлов на сжигание водородосодержащих газов, предложены решения.

На предприятиях нефтепереработки, нефтехимии и металлургии по завершении цикла одним из побочных продуктов является газ с очень высоким содержанием водорода (до 85 %). Этот побочный газ в виде смеси с природным можно использовать в качестве топлива для получения пара в энергетических котлах, который будет возвращаться обратно в технологический цикл или использоваться для выработки электроэнергии

Кроме того, в настоящее время большое внимание уделяется снижению воздействия антропогенных факторов на изменение климата. Один из методов борьбы с глобальным потеплением – снижение выбросов CO_2 в атмосферу. Для этой цели может быть рассмотрен вариант замены или снижения доли традиционных топлив на водород. Так как одним из основных потребителей топлива является электроэнергетика, то исследование сжигания водородсодержащих газов (ВГС) в энергетических котлах актуально.

Водород имеет высокую плотность энергии на единицу массы, но низкую плотность энергии на единицу объема в газообразной форме. Очевидно, что переход на сжигание ВСГ и тем более чистого водорода в топках существующих котлов потребует определенной их доработки и реализации ряда необходимых конструктивных и технических мероприятий. В первую очередь это касается горелочных устройств и газоподводящего оборудования. Кроме того, имеются проблемы обеспечения радиационного и конвективного теплообмена вдоль газового тракта для обеспечения требуемых параметров перегретого пара.

Проведены многовариантные расчеты с использованием математических моделей котлов ТГМ-96Б и БКЗ-420-140НГМ, созданных в программном комплексе Boiler Designer. Котельные агрегаты посчитаны в широком диапазоне нагрузок. Определены минимально допустимые нагрузки для котлов при разных долях водорода в метано-водородной газовой смеси. Проведены численные исследования различных методов достижения номинальных параметров пара. Выявлено, что рециркуляция дымовых газов позволяет существенно расширить диапазон нормальной работы котла.

Расчетно-аналитические исследования показали, что значительное увеличение объемного расхода топлива при повышении доли H_2 в ВСГ (более чем в три раза при сжигании 100 % водорода) потребует модернизации или замены горелочных устройств в силу их ограниченной пропускной способности.

При увеличении доли водорода в ВСГ происходит увеличение адиабатной температуры и снижение температур по газовому тракту. Это повлияет на тепловосприятие среды в поверхностях пароперегревателя. На основании расчетов сделаны выводы об увеличении светимости факела за счет увеличения доли трехатомных газов. За счет снижения объема уходящих газов КПД котла возрастет, несмотря на незначительное увеличение их температуры.

© Алексеев С. С., Верещетин В. А., 2025

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СИНТЕЗ-ГАЗА НА ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, ВЫДЕЛЯЕМОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО ГОРЕНИЯ

М. Е. Таценко

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** tatsenko2010@yandex.ru*

Рассмотрено влияние состава синтез-газа как рабочего тела в CO_2-цикле Аллама с внутрицикловой газификацией угля на тепловой эффект и количество теплоты, выделяемой в результате реакции его горения на 1 кг углекислого газа. Исходя из полученных данных представлены графики и выводы.

В настоящее время в мире актуализируются исследования, направленные на создание циклов, использующих в качестве рабочих тел природные вещества, а именно углекислый газ в сверхкритическом состоянии [1]. Одним из таких циклов является цикл Аллама – Фетведта – это новейшая технология производства электроэнергии на синтез-газе, полученном в результате газификации угля [2].

Ниже показаны многостадийные экзотермические реакции горения синтез-газа:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + (-\Delta H^0_{298}); \quad (1)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + (-\Delta H^0_{298}), \quad (2)$$

где ΔH^0_{298} – тепловой эффект реакции.

Тепловой эффект реакции зависит от природы и состояния исходных веществ и конечных продуктов, но не зависит от пути реакции, т. е. от числа и характера промежуточных стадий. Знак минус в уравнении реакции показывает, что реакция протекает с выделением теплоты ($\Delta H < 0$). Такая реакция называется экзотермической [3].

Для определения и анализа оптимального состава синтез-газа было выбрано три варианта с различным содержанием углерода и водорода, без учета таких примесей, как азот, сера, углекислота и зольность. Исходя из закона Гесса, найдем тепловые эффекты для двух реакций, рассмотренных выше.

Для реакции (1):

$$\Delta H^0_{298} = 2\Delta H^0_{2CO2} - 2\Delta H^0_{CO} - \Delta H^0_{O2} \quad (3)$$

Для реакции (2):

$$\Delta H^0_{298} = 2\Delta H^0_{2CO2} - 2\Delta H^0_{CO} - \Delta H^0_{O2} \quad (4)$$

В табл. 1 сведены полученные результаты для двух реакций.

Таблица 1

Тепловой эффект реакций

Реакция	ΔH^0_{298}, кДж/моль
1	-566,02
2	-483,64

© Таценко М. Е., 2025

Далее рассмотрим зависимость количества теплоты, выделяемой в результате горения синтез-газа на 1 кг углекислого газа для трех разных вариантов состава рабочего тела. Содержание CO и H_2 представлено в табл. 2.

Таблица 2

Состав исследуемого синтез-газа

Вариант	$CO, \%$	$H_2, \%$
1	20	80
2	50	50
3	80	20

Количество теплоты напрямую зависит от обьема углерода и водорода, содержащегося в составе синтез-газа, а также от его расхода на генерацию 1кг CO_2. Формула для нахождения количества теплоты [4]:

$$Q = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot C_{\text{син.газ}}, \tag{5}$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания синтез-газа, $C_{\text{син.газ}}$ – расход синтез-газа на генерацию 1 кг CO_2.

Низшая теплота сгорания равна сумме тепловых эффектов от двух реакций, переведенная в кДж/кг, что составляет 19 866,5 кДж/кг. Полученные результаты, следуя формуле (5), представлены в табл. 3. Расход синтез-газа для трех вариантов соответственно равен 0,819; 0,682; 0,647 кг.

Таблица 3

Количество теплоты для разных вариантов состава синтез-газа

Вариант	Q, кДж/кг
1	16,27
2	13,54
3	12,86

Ниже представлен график зависимости количества теплоты от содержания CO и H_2, выполненный в Mathcad (рис. 1).

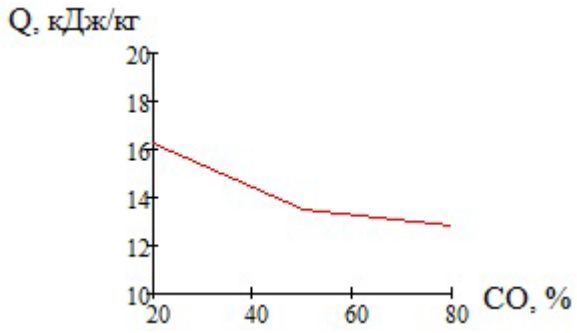


Рис. 1. Зависимость количества теплоты от содержания CO

Анализируя график, можно сделать вывод, что оптимальный состав синтез-газа определяется вариантом 3. Из графика видно, что при содержании CO на уровне 80 % наблюдается наименьшее количество теплоты, выделяемой при реакции горения газа. Из этого следует, что чем меньше тепла выделяется, тем лучше показатели, которых можно достигнуть для эффективной работы CO_2-цикла Аллама с внутрицикловой гази-

фикацией угля [5], а именно: термический КПД, КПД электростанции, работающей на данном цикле, которые будут рассмотрены в следующих исследованиях.

Список источников

1. Берт Метц, Огунладе Дэвидсон, Хелен де Конинк, Мануэла Лоос, Лео Мейер Улавливание и хранение двуокиси углерода // Специальный доклад МГЭИК. 2005. 56 с.
2. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xijia Lu, David Freed, G. William Brown Jr.a, Takashi Sasaki, Masao Itohb, James Manningc Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedia. 2017. С. 5948–5966
3. Коровин Н. В. Общая химия : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования. М. : Академия, 2013. 496 с.
4. Щинников П. А. Комплексное исследование энергоблоков электростанций и энергоустановок // Издательство НГТУ. 2020. 500 с.
5. Таценко М. Е. Актуальность применения внутрицикловой газификации угля на основе CO_2 цикла // Наука. Технологии. Инновации. 2024.

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕЖИМНАЯ КАРТА ПЕЧИ

А. В. Кушнаренко

Омский государственный университет путей сообщения
644046, Российская Федерация, Омск, пр. Карла Маркса, д. 35
antonkushnarenko@yandex.ru

Традиционные режимные карты управления печами статичны и не в полной мере обеспечивают надежность и эффективность работы печи, так как не учитывают динамические изменения внешних и внутренних значимых параметров. Статья исследует динамические режимные карты для оптимизации тяги в печах. Предложены подходы по корректировке параметров тяги и давления газа, с учетом изменения параметров сырья и окружающей среды. Цель – снизить неравномерность нагрева, расход топлива и риски. Проведен анализ, разработана концепция динамической карты и алгоритм коррекции. Оценка показала потенциал улучшения управления и эффективности печей. Перспективы связаны с детальной проработкой моделей и экспериментальной проверкой.

Целью данного исследования является разработка концепции динамической режимной карты для управления трубчатыми печами установок первичной переработки нефти, основанной на алгоритме динамического расчета оптимальных параметров работы печи, с акцентом на управление тягой в областях перевала и пода [1], и давлением газа перед горелкой [2]. Для достижения этой цели в исследовании использованы следующие методы и подходы.

1. Анализ работы трубчатых печей и процессов теплообмена:

а) изучение технологических схем и конструкций;

б) анализ параметров работы печи;

в) идентификация факторов, влияющих на параметры работы печи;

г) анализ данных технологического процесса.

2. Разработка концепции динамической режимной карты:

а) выбор ключевых параметров для динамической коррекции;

б) обоснование влияния тяги и давления газа на радиационный и конвективный теплообмен;

в) определение структуры динамической режимной карты;

г) разработка алгоритма динамического расчета оптимальных параметров.

3. Разработка алгоритма динамического управления тягой в областях перевала и пода, а также давлением газа:

а) моделирование процессов тяги;

б) определение оптимального давления газа;

в) разработка алгоритма динамической коррекции тяги и давления газа;

г) апробация алгоритма.

4. Оценка эффективности предложенного подхода:

а) проведение опытно-промышленных испытаний;

б) сравнение результатов;

в) оценка экономической эффективности.

В ходе проведенного исследования была обоснована возможность и перспективность применения динамических режимных карт для управления трубчатыми печами установок первичной переработки нефти, с особым акцентом на управление тягой в областях перевала и пода печи, и давлением газа перед горелкой.

© Кушнаренко А. В., 2025

В результате проведенного исследования были достигнуты следующие основные результаты:

1. Разработана концепция динамической режимной карты, включающая систему сбора данных, модуль обработки данных, алгоритм динамического расчета оптимальных параметров и модуль корректировки параметров.

2. Разработан алгоритм динамического расчета оптимальных параметров тяги на перевале и в поде печи, а также давления газа перед горелкой, который позволяет оперативно корректировать параметры работы печи в зависимости от текущих условий эксплуатации.

3. Проведено математическое моделирование работы печи с использованием статических и динамических режимных карт, результаты которого показали, что применение динамической режимной карты позволяет снизить расход топлива на 2–3 %, уменьшить неравномерность нагрева на 15–20 % и стабилизировать температуру сырья на выходе из печи.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование динамических режимных карт, основанных на алгоритме динамического расчета, является перспективным подходом к управлению трубчатыми печами нефтеперерабатывающих производств. Динамическая корректировка параметров тяги в областях перевала и пода печи, а также давления газа перед горелкой, позволяет более эффективно управлять процессом горения и теплообмена, обеспечивая снижение расхода топлива и повышение равномерности нагрева.

Перспективы дальнейших исследований:

1. Уточнение математических моделей: необходимо провести дальнейшее уточнение математических моделей процессов горения и теплообмена в трубчатых печах с целью повышения точности алгоритма динамического расчета.

2. Экспериментальная проверка на реальных объектах: для подтверждения полученных результатов необходимо провести экспериментальную проверку предложенного подхода на реальных промышленных объектах с учетом особенностей их эксплуатации.

3. Разработка адаптивных алгоритмов управления: необходимо разработать адаптивные алгоритмы управления, которые будут способны автоматически настраиваться на различные режимы работы печи и условия эксплуатации.

4. Интеграция с САУ: следующим этапом может стать интеграция разработанной концепции динамических режимных карт с существующими системами автоматического управления (САУ) на нефтеперерабатывающих предприятиях.

5. Исследование влияния различных факторов: провести более детальное исследование влияния различных факторов (качество сырья, состояние оборудования, внешние условия) на работу печи, оптимизировать алгоритм динамического расчета с учетом этих факторов.

Предложенный подход к управлению трубчатыми печами является перспективным и может быть рекомендован для внедрения на нефтеперерабатывающих предприятиях.

Список источников

1. Резанов Е. М., Стариков А. П., Финиченко А. Ю., Кушнаренко А. В. Об эффективности регулирования высокотемпературного агрегата нефтеперерабатывающего завода // Энергосбережение и водоподготовка. 2023. № 5 (145). С. 15–19.

2. Кулагин А. Ю. Регулирование топочных процессов и повышение эффективности сжигания углеводородных газов переменного состава в горелках с нерегулируемыми параметрами : дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2010. 146 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ

А. Д. Никитин[1], Н. А. Абаимов[1]*, М. И. Ершов[1], Я. В. Касилин[1], В. Г. Тупоногов[1], Л. В. Плотников[1], Л. В. Симбирятин[2], С. В. Алексеенко[1, 3], А. Ф. Рыжков[1]

[1]Лаборатория новых энергетических технологий Уральского федерального университета
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
[2]ООО «Промышленный перлит»
620072, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Владимира Высоцкого, д. 4б
[3]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** nick.sum41@mail.ru*

В работе представлены результаты исследования воздушной низкотемпературной газификации сырой биомассы широкого фракционного состава в опытно-промышленной установке с расширяющимся профилем и восходящим потоком под атмосферным давлением. В качестве топлива использовался сырой сосновый опил с влажностью 35 %, средним размером 1–2 мм и максимальным 5–10 мм. Расход воздуха варьировал в диапазоне 200–700 м^3/ч, топлива 100–465 кг/ч, природного газа 20–32,8 м^3/ч. Теплота сгорания полученного синтез-газа (3–4 МДж/м^3) соответствует требованиям к энергетическим газам, используемым в двигателях внутреннего сгорания и газотурбинных установках.

Использование биомассы в энергетике и химической промышленности требует решения ряда проблем, связанных со специфическими свойствами данного вида твердого топлива. Биомасса с волокнистой структурой требует в 10 раз больше электроэнергии на помол, чем уголь с кристаллической структурой. Высокая влажность сырой биомассы (до 50–60 %) вынуждает прибегать к дополнительным затратам тепловой энергии на сушку топлива. Относительно низкая температура плавления золы, возгонки ее щелочных металлов и большое количество смолы приводит к необходимости жесткого контроля температурного диапазона работы установок. Эффективным решением вышеописанных проблем является использование предлагаемой в работе технологии воздушной газификации с разными формами реализации гидродинамического режима, зависящими от дисперсности топлива. В частности, в ранее исследованной пилотной установке был реализован поточно-фонтанирующий режим [1], а в данной – поточно-слоевой. Близкое решение, но на парокислородном дутье предлагается в [2].

Цель работы – исследование воздушной газификации сырой биомассы широкого фракционного состава в опытно-промышленной установке.

В августе 2024 г. проведена серия экспериментов на опытно-промышленной установке поточной газификации биомассы с производительностью по топливу 100–465 кг/ч (тепловая мощность по топливу 0,4–2 МВт). Установка расположена на одном из промышленных предприятий Среднего Урала. Рабочее пространство газификатора представляет собой коническо-цилиндрическую камеру диаметром 0,2–0,6 м и высотой 6 м. Через нижний торец подается воздух с температурой 150–400 °С и природный газ. Подача топлива осуществляется шнеком. В качестве топлива использовался сырой сосновый опил с влажностью 35 %, средним размером 1–2 мм и максимальным 5–10 мм.

Температура, давление и состав синтез-газа замерялись не только на выходе из установки, но и по глубине реакционной камеры. Температура измерялась с помо-

© Никитин А. Д., Абаимов Н. А., Ершов М. И., Касилин Я. В., Тупоногов В. Г., Плотников Л. В., Симбирятин Л. В., Алексеенко С. В., Рыжков А. Ф., 2025

щью хромель-алюмелевых термопар, давление – цифровых дифференциальных датчиков Keller PD-33X, а состав синтез-газа – газоанализатора «Гамма-100».

Замеры температуры по высоте установки показали, что максимальная температура 800 °C наблюдается в нижней точке измерений на высоте 1,5 м. При этом температура на выходе составила 400 °C. Относительно низкая температура в большей части камеры реагирования объясняется охлаждением реакционного пространства воздухоохлаждаемой стенкой, через которую тепло передается дутьевому воздуху. В дальнейших исследованиях планирует усовершенствовать конструкцию и отказаться от охлаждаемой стенки, увеличив тем самым высоту, на которой возможно протекание реакций газификации биомассы.

При $\alpha = 0{,}1–0{,}5$ состав синтез-газа практически не меняется (H_2 = 3–6 %, CO = 9–14 %, CO_2 = 15–17 %, CH_4 = 3–5 %, H_2/CO = 0,21 – 0,67), что говорит о стабильном протекании процесса, однако при $\alpha = 0{,}1$ содержание CO минимальное в связи с недостатком кислорода для поддержания температуры, необходимой для протекания реакций газификации.

Синтез-газ, полученный во всех режимах, удовлетворяет требованиям по минимальной теплоте сгорания газовых турбин (3–4 МДж/м^3), что говорит о его применимости для энергетических назначений. КПД холодного газа (хим. КПД) во всех конфигурациях достигает 50 %, что является удовлетворительным показателем для поточных газификаторов сырой биомассы.

Измерение давления позволило обнаружить формирование придонного слоя опила, существенно влияющего на гидродинамику. При подаче опила среднее избыточное давление в нижней точке может возрастать вплоть до положительных значений (с −22 Па до +2...+45 Па), указывая на забивку каналов для воздуха. Среднеквадратическое отклонение сигнала давления, напротив, может снижаться (например, с 21–39 Па до 3–4 Па), свидетельствуя о демпфировании колебаний в плотном слое опила и возможном погасании горелки. Спектральный анализ пульсаций давления (оконное преобразование Фурье) показал характерные диапазоны доминантных частот: 10–11,7 Гц (и близкие к ним 9,4; 12; 13 Гц) – механические вибрации установки, обусловленные работой воздуходувки и резонансами конструкции; 0–7 Гц (и более узкие полосы 0–4 Гц, 0–5 Гц) – неустойчивые режимы псевдоожижения опила и/или работы горелки при различных расходах. При форсированной продувке воздухом (с целью выжигания накопившегося слоя) может появляться низкочастотная компонента порядка 0,2–1 Гц, отражающая переход опила в транспортный режим.

Выполнена оценка объемных концентраций продуктов конверсии опила по высоте опытно-промышленной установки, показавшая, что при плотностях дисперсии 70–500 кг/м³ объемная доля частиц может достигать до 0,37 % в верхней части камеры реагирования. На основе полученных данных можно сделать вывод, что разработанные режимы работы и система контроля параметров (давление, расход, температура, состав синтез-газа) позволяют эффективно проводить запуск, прогрев и эксплуатацию установки. Выявлены ключевые особенности формирования придонного слоя опила, влияющие на стабильность горения и возможности самотяги. Полученные экспериментальные данные и методики измерений могут быть использованы при последующей оптимизации конструкции промышленных газификаторов и отработке режимов подачи воздуха, газа и опилок с целью получения стабильного синтез-газа.

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 и в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список источников

1. Абаимов Н. А., Никитин А. Д., Ершов М. И., Симбирятин Л. В., Рыжков А. Ф. Исследование газификации биомассы в поточном режиме с использованием физического моделирования в пилотной установке // XL Сибирский теплофизический семинар : сб. тезисов докладов Всероссийской конференции, Новосибирск, 20–23 августа 2024 г. Новосибирск : ИТ СО РАН, 2024. С. 247.

2. K. Matsumoto An entrained flow biomass gasification technology with the fluidized bed concept for low-carbon fuel production // Applications in Energy and Combustion Science. Vol. 20. 100292. 2024.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТОРФА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Е. А. Рыжникова[1*], П. А. Батраков[1], М. С. Пешко[2]

[1]Нижневартовский государственный университет
628605, Российская Федерация, Нижневартовск, ул. Ленина, д. 56
[2]Омский государственный технический университет
644050, Российская Федерация, Омск, пр. Мира, д. 11
** ryzhnikova.k@yandex.ru*

Проводится глубокий анализ методов разложения торфа и извлечения летучих веществ, что позволяет получить ценную информацию о процессе подготовки и получения эффективного топлива из торфа. В результате изучения научно-технической литературы были выявлены основные подходы, применяемые в настоящее время для извлечения летучих веществ из торфа, а также представлена классификация методов. Основываясь на этих знаниях, предлагается создать экспериментальную установку с определением ключевых зон, которая позволит оптимизировать процесс и повысить его эффективность, а основной целью станет максимальное выделение летучих веществ и их подготовка для последующего сжигания в энергетических установках. Этот процесс будет осуществляться посредством пиролиза с добавлением специальных ингибиторов.

В современном мире одним из главных направлений технологического прогресса является постоянное совершенствование методов сжигания органического топлива, направленное на повышение эффективности и экологической безопасности процесса.

Современные методы расчета энергетических установок на промышленных предприятиях имеют ряд ограничений. Они не учитывают специфику топлива в процессе его сгорания, а основным критерием для расчета выступает только теплотворная способность. Эти методы позволяют производить расчеты только для традиционных видов топлива. Например, при использовании торфа в качестве топлива мы не можем в полной мере оценить его потенциал.

Главная причина заключается в том, что торф содержит много влаги (до 90 %) и много летучих веществ (до 70 % от сухой массы).

При сушке торфа летучие вещества активно выделяются вместе с влагой. Если же не проводить сушку, то скрытая теплота парообразования воды поглощает теплоту сгорания, что в конечном итоге снижает теплотворную способность топлива.

Поэтому основная задача данной работы – проанализировать методы разложения торфа, а также процессы выделения влаги и летучих веществ в ходе этих процессов. Также рассмотрим возможность максимально эффективно улавливать выделяющиеся из торфа углеводороды.

В результате анализа научно-технической литературы определены основные методы, которые используются для извлечения летучих веществ из торфа. Для удобства дальнейшей работы разработан классификатор (рис. 1), позволяющий систематизировать полученные знания.

Исходя из предложенной классификации, авторы остановили свой выбор на методе пиролиза с добавлением ингибиторов. Цель – заблокировать активные центры и нейтрализовать активные частицы (радикалы), превратив их в менее активные соединения. Основываясь на этих идеях, предлагаем разработать экспериментальную установку, главной задачей которой будет максимальное выделение летучих веществ

© Рыжникова Е. А., Батраков П. А., Пешко М. С., 2025

и их подготовка к сжиганию в энергетической установке. Это будет достигаться за счет пиролиза с добавлением ингибиторов.

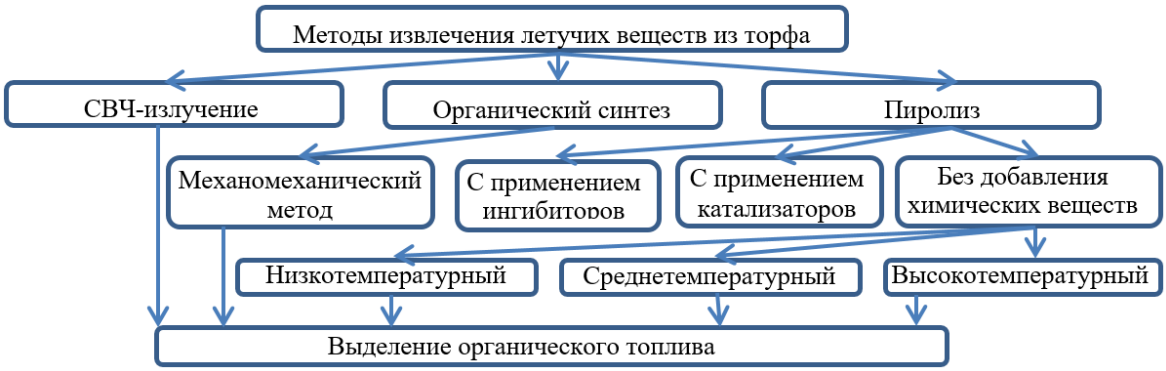


Рис. 1. Классификация методов извлечения летучих веществ из торфа

Наша концепция предусматривает четыре ключевых зоны:

1. Зона создания инертной среды в системе (для выделения и подготовки летучих веществ).
2. Зона пиролиза (для выделения летучих соединений).
3. Зона охлаждения (для стабилизации газов).
4. Зона сбора летучих продуктов для последующего анализа.

Исследование поддержано средствами гранта Фонда научно-технологического развития Югры. Соглашение № 2024-518-09.

Список источников

1. Тимофеева С. С., Караева Ю. В. Термохимическая переработка низкосортного торфа на основе газификации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2 (50). С. 15–26.

2. Бекмуратова Б. Т. Разработка технологии получения стабильных композиционных топлив из углерода // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. С. 208–212.

3 Табакаев Р. Б. и др. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 190–199.

4. Крапивницкая Т. О. и др. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4 (31). С. 750–758.

5. Урханова Л. А. и др. Теплоизоляционный материал на основе торфов Республики Бурятия // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 2 (77). С. 59.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И ОДНОСТАВОЧНОГО ТАРИФА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ, ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПО ДВУМ ЗОНАМ СУТОК, ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА

А. В. Ануфриенко[1*], С. Л. Елистратов[1, 2]

[1] Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2] Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** Alexey-div@mail.ru*

Рациональное использование энергоресурсов традиционно является одной из приоритетных задач. Рассмотрены условия практического потребления электрической энергии на нужды отопления эксплуатируемого индивидуального жилого дома в условиях г. Красноярска. Электроотопление – простое в эксплуатации и экологичное решение для обогрева жилых помещений в условиях смешанной застройки многоквартирных домов, присоединенных к централизованным системам теплоснабжения, и индивидуальных жилых домов без присоединения к централизованным системам теплоснабжения

Для рационального использования энергоресурсов рассматриваются меры по снижению энергопотребления в системах коммунального теплоснабжения. В настоящее время – различные комбинированные схемы теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), позволяющие в значительной мере заместить традиционные энергоресурсы. Однако природные ВИЭ (солнце, воздух, тепло верхних слоев грунта), как правило, характеризуются большой неравномерностью получаемой тепловой мощности. Поэтому всегда необходим резервный источник тепла [1], как правило, это газовый котел. Однако в целом ряде зданий используются электрокотлы, для которых экономически целесообразно использовать ночной тариф на отпуск электроэнергии.

Использование электрической энергии в период ночного минимума нагрузок энергосистемы по сниженному тарифу позволяет существенно снизить затраты на отопление [2]. Рассмотрены условия практического потребления электрической энергии на нужды отопления эксплуатируемого индивидуального жилого дома в условиях г. Красноярска. Электроотопление рассматривается как простое в эксплуатации и экологичное решение для обогрева жилых помещений в условиях смешанной застройки многоквартирных домов, присоединенных к централизованным системам теплоснабжения, и индивидуальных жилых домов без присоединения к централизованным системам теплоснабжения.

В расчетах (табл. 1) приведены тарифы на электрическую энергию ПАО «Красноярскэнергосбыт» с 01.07.2024 по 01.07.2025, применяемые к квартирам и домам в населенных пунктах, оборудованных плитой и электроотопительной установкой. Одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток: ночная зона – 1,48 руб./кВт·ч с 23:00 по 07:00; пиковая/полупиковая зона – 2,86 руб./кВт·ч с 07:00 по 23.00. Стоимость электрической энергии за пределами социальной нормы в расчете не учитывается.

© Ануфриенко А. В., Елистратов С. Л., 2025

Таблица 1

Параметры системы электроотопления жилого здания

Режим работы	Мощность электрокотла, кВт	Суточное потребление, кВт·ч	Стоимость электроотопления, руб/сут.	Стоимость электроотопления, руб/мес.
Без аккумулирования	10	240 (10 × 24)	576	17 280
С аккумулированием в ночные часы	30	240 (8 × 30)	355,2	10 656

Целесообразно потребление дифференцированной стоимости электроэнергии по зонам суток на основе использования системы отопления в виде водяной системы «теплый пол» и сохранения уровня комфорта в помещениях.

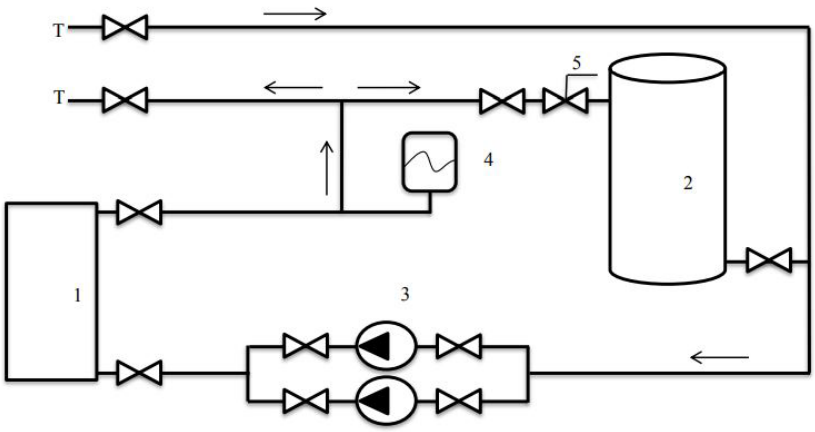


Рис. 1. Тепловая схема теплового узла: *1* – электрический котел мощностью 30 кВт; *2* – теплонакопительная емкость объемом 1,0 м^3; *3* – насосная группа; *4* – расширительный бак; *5* – балансировочный вентиль; T_1 – подающий трубопровод в систему отопления; T_2 – обратный подающий трубопровод системы отопления

Основной принцип выбора решений схемы на рис. 1 – это использование наиболее бюджетного оборудования и минимума тепловой автоматики. Алгоритм работы тепловой схемы заключатся в установке пользователем требуемой температуры в емкости *2*. В ночное время включается электрический котел *1* и происходит накопление тепловой энергии в емкости *2* и в высоко инерционной системе «теплый пол». При достижении установленной температуры котел *1* автоматически отключается.

В целях использования пониженных ночных тарифов в системах экологичного отопления дополнительно на законодательном уровне предложено решить ряд задач, в т. ч.:

1) уровень социальной нормы для отопления в размере 400 кВт·ч является недостаточным для осуществления электроотопления по ночному тарифу, предлагается увеличить в несколько раз или определить как безлимитное;

2) мощность электрического котла для работы в системе с тепловым аккумулированием возрастет минимум в три раза, что необходимо учитывать в системах подключения электроснабжения.

Список источников

1. Леонтьев В. А., Олейник Д. С., Яшенков А. К. и др. Отопление индивидуального жилого дома в условиях отсутствия системы централизованного газоснабжения // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2021. № 2 (33). С. 149–155.

2. Лелюшкин Н. В. Перспективы применения электроэнергии для теплоснабжения // Двойные технологии. 2009. № 3 (48). С. 38–45.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КИСЛОРОДНО-КАПЕЛЬНО-ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КОТЛЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В. А. Кузнецов*, Д. М. Божеева, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** Vakuznetsov@sfu-kras.ru*

Проведено численное исследование процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в условиях топочной камеры. Рассмотрено влияние концентрации кислорода в дутье и доли теплового потока с поверхности топки на стабильность воспламенения и эффективность горения водоугольного топлива.

Основной проблемой при сжигании водоугольного топлива в топочных устройствах является его трудная воспламеняемость [1; 2]. Известно, что наличие высокой доли влаги в составе водоугольного топлива (ВУТ) приводит к его низкой реакционной способности при зажигании. Этот эффект является сдерживающим фактором при внедрении ВУТ на станциях.

Решение этой проблемы может лежать в двух направлениях. В первом осуществляется воздействие на свойства самого топлива. Например, изменение соотношения влаги и угля, изменение компонентного состава, добавление легко воспламеняемых компонентов, уменьшение размера капель и др. Во втором для сокращения времени воспламенения ВУТ осуществляется воздействие на параметры окружающей среды. Например, увеличение температуры среды, изменение теплофизических характеристик, использование плазматрона, использование подсветки дизельного факела, изменение состава дутья и др.

Одним из методов интенсификации процесса воспламенения и повышения стабильности горения ВУТ является увеличение концентрации кислорода в дутье. В литературе представлено достаточно мало исследований по этой теме. Установлено, что повышение концентрации кислорода (вплоть до 100 %) позволяет добиться укорочение факела на 30–50 % по сравнению с воздушным дутьем [3]. Использование в качестве окислителя чистого кислорода позволяет устойчиво воспламенять ВУТ с содержанием воды до 75 %. Данный эффект принципиально расширяет области использования ВУТ в малой и средней энергетике.

В данной работе предложена численная методика описания процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в потоке в условиях повышенной концентрации кислорода. Методика была протестирована на основе экспериментальных данных. Получена зависимость процессов воспламенения и горения ВУТ в топочной камере от концентрации кислорода в дутье и доли теплового потока на поверхности стен камеры сгорания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01267 (https://rscf.ru/project/23-79-01267).

Список источников

1. Алексеенко С. В., Мальцев Л. И., Богомолов А. Р. и др. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощ-

© Кузнецов В. А., Божеева Д. М., Минаков А. В., 2025

ности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 12.

2. Овчинников Ю. В., Бойко Е. Е., Серант Ф. А. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания, доклады АН ВШ РФ, 2015. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-85-93.

3. Морозов А. Г. Практические результаты сжигания водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. 2015. № 6 (178).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВНЫХ ПРИСАДОК НА ГОРЕНИЕ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

К. В. Беляев[1*], В. И. Мурко[1], В. И. Карпенок[2]

[1]Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Российская Федерация, Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
654006, Российская Федерация, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, д. 7
** belkir1976@mail.ru*

Применение топливных присадок при сжигании угля в котельных является одним из направлений по улучшению показателей использования этого вида топлива. Рассматривается воздействие отдельно взятых химических компонентов, входящих в состав присадок, на процесс горения угольного топлива.

Угольное топливо, несмотря на развитие альтернативных источников энергии, остается одним из наиболее востребованных видов топлива в мире. Но все же его использование сопряжено с рядом проблем, включая низкую эффективность горения и высокий уровень выбросов вредных веществ. Для устранения этих недостатков необходимо обновление имеющегося технологического оборудования или установка дополнительного, что потребует больших финансовых и трудовых затрат, а также простоя производства. Однако во многих случаях можно обойтись улучшением свойств сжигаемого топлива. Во всем мире широко используются присадки для мазутного топлива с целью улучшения показателей его горения и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду, но для угля они практически не применяются. В связи с этим возникает необходимость в разработке и применении топливных присадок, которые могут улучшить характеристики горения угольного топлива и снизить его негативное воздействие на окружающую среду.

Топливные присадки – это специальные добавки, которые используются для улучшения характеристик горения угля и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Они могут включать в себя различные химические соединения, которые добавляются в уголь перед его сжиганием. Присадки могут влиять на следующие характеристики: улучшение воспламеняемости, а именно способствование более быстрому и равномерному воспламенению угля; снижение выбросов оксидов азота, оксидов серы и твердых частиц; улучшение теплообмена и распределения кислорода в процессе горения; уменьшение образования шлака и золы.

Топливные присадки могут быть как жидкими, так и твердыми. Жидкие состоят из различных спиртов и кислот. Твердые, как правило, имеют в своем составе SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, MnO [1]. Оксид кремния наносится на поверхность угля тонкой оболочкой с определенными добавками для увеличения полноты сгорания топлива и уменьшения образования дыма. Оксид железа используют в качестве модификатора горения, который позволяет повысить температуру в зоне горения угля и уменьшить количество токсичных веществ в отходящих газах. Оксид алюминия в составе сорбентов, которые добавляют к углю до его зажигания или вводят в пламя, уменьшает количество серы и ртути, выбрасываемой в атмосферу при горении угля, но частицы большого размера (около 20–50 мкм) оксида алюминия (Al_2O_3) приводят к снижению эффективности сгорания топлива. Оксид кальция вступает в реакцию с серой, содержащейся в топливе, образуя в восстановительной зоне горения сульфид кальция (CaS), а в окислительной зоне – сульфат кальция ($CaSO_4$). Полученные неорганические веще-

© Беляев К. В., Мурко В. И., Карпенок В. И., 2025

ства отделяют на сепараторе и направляют в отвал. Также оксид кальция может повышать эффективность катализаторов, используемых для снижения выбросов вредных веществ. Однако большое количество щелочных элементов, к которым относится и кальций, может вызвать коррозию оборудования и образование шлаков, поэтому их нужно учитывать при оценке качества угля и улучшении технологии сжигания. Оксид магния (MgO) может способствовать сокращению потерь тепла с недожогом до 80 %. Также он реагирует с диоксидом серы, образуя сульфат магния, который остается в золе и может быть легко удален. Добавка оксида магния повышает температуру плавления оксидов ванадия, в результате чего зола не прилипает к поверхности нагрева, а осыпается. Если поверхность нагрева котла покрыта отложениями, магний разрыхляет их, и они осыпаются. По данным исследования ученых из Томского политехнического университета, добавка смеси из железной окалины (Fe_3O_4) и оксида марганца (Mn_3O_4) к углю позволяет снизить температурный порог окисления топлива (на 2–32 °С), а также уменьшить период задержки его воспламенения (на 0,2–2,2 с). При этом температурный порог, при котором завершалось окисление топлива, снижается на 13–68 °С. Интенсификация горения с помощью этой добавки позволяет снизить удельные выбросы углекислого газа при сжигании угля на 57 %, а эмиссию оксида азота – на 25 %. Благодаря сокращению топливного недожога объем тепловой энергии, генерируемой при сжигании топлива, увеличивается на 10 % [2].

Одной из главных причин низкого интереса отечественной угольной энергетики к данной технологии по улучшению качества сжигания твердого топлива является отсутствие какого-либо опыта практического применения топливных присадок. В России впервые (по литературным источникам) в 2009 г. были проведены испытания топливной присадки на стальном водогрейном котле КВм – 1,86 КБ со слоевым сжиганием угля в котельной № 6 МУП г. Бийска «Теплоэнергия». В результате испытаний было установлено снижение содержания несгоревшего угля в уносах на 39,3 %, улучшение прогорания загрузки угля, увеличение температуры горения угля на поверхности на 120 °С.

Аналогичные испытания топливной присадки каталитического и модифицирующего действия были проведены компанией «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк) совместно с национальной ассоциацией производителей и потребителей золошлаковых материалов (НАППЗШМ, г. Москва) и муниципальным предприятием МП «ССК» (г. Новокузнецк) [3]. Испытания проводились на котле КВр-11,63-115 № 2 Байдаевской котельной (г. Новокузнецк). В качестве топливной добавки катализирующего и модифицирующего действия при сжигании угля использовалась присадка производства Южной Кореи Aid-Clean Force (3H Korea Co.Ltd). Эффективность действия топливной присадки оценивалась путем проведения балансовых испытаний котла до введения присадки и после при различной производительности с последующим расчетом основных технико-экономических показателей методом обратного баланса. Применение присадки привело к увеличению КПД на 10,8 % выше значения по режимной карте. Отмечено снижение горючих веществ как в шлаке, так и в золе уноса под действием присадки, что привело к уменьшению потерь тепла с механическим недожогом. Также после применения присадки было замечено очищение экранных труб котла, а структура шлака стала более рыхлой и однородной.

По первым проведенным экспериментам можно сказать, что использование топливных присадок является перспективным направлением для улучшения эффективности сжигания угля. Однако стоит еще проводить исследования совместного воздействия присадочных компонентов для различных марок угля и режимов горения.

Список источников

1. Белосельский Б. С. Применение присадок многофункционального действия к топочным мазутам, сжигаемым на электростанциях // Новое в российской энергетике. 2005. № 10.

2. Ассоциация «Глобальная энергия» : сайт. URL: https://globalenergyprize.org/ru/2023/10/18/rossijskie-uchenye-snizili-vybrosy-pri-szhiganii-uglja-za-schet-modifikatora-gorenija (дата обращения: 24.01.2025).

3. Мурко В. И., Карпенок В. И., Федяев В. И. и др. Результаты испытаний топливной присадки на котле со слоевым сжиганием угля // Журнал сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. № 10 (8). С. 993–999.

ПЕРЕДВИЖНАЯ МНОГОТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА КОГЕНЕРАЦИИ

С. А. Чухлебов[1*], С. Л. Елистратов [1, 2, 3]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630037, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
683032, Российская Федерация, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д. 4
** LEST2006@mail.ru*

Представлена схема передвижной системы когенерации на базе многотопливной энергоустановки малой мощности для создания временной инфраструктуры жизнеобеспечения. В качестве приборов нагрева воздуха внутри помещений и/или получения горячей воды используются герметичные гибкие металлические рукава, заменяющие выхлопную трубу. Показано влияние геометрических параметров тепловых приборов на эффективность работы энергоустановки.

При ликвидации аварийных ситуаций в зимних условиях, для сохранения жизни и здоровья человека и поддержания критической инфраструктуры в работоспособном состоянии требуется оперативное решение вопросов производства тепла и электроэнергии с использованием местных энергоресурсов. При этом важна мобильность и доступность применяемого теплоэнергетического оборудования, позволяющие обеспечить доставку и быстрое введение его в эксплуатацию на месте непосредственного использования. В качестве одного из вариантов решения такой технической задачи может рассматриваться оснащение серийно выпускаемых многотопливных электрогенераторов дополнительными теплоутилизируюшими устройствами, обеспечивающими нагрев воздуха или воды в помещениях. Технологическая схема такой когенерационной системы (рис. 1) предполагает использование различных видов топлива.

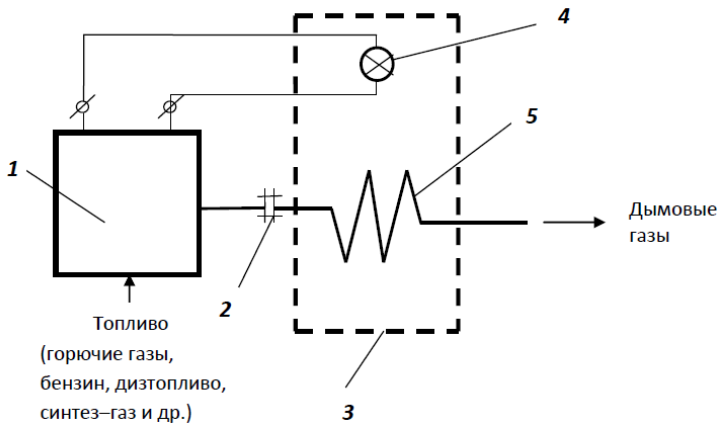


Рис. 1. Схема передвижной системы когенерации: *1* – многотопливная мобильная энергоустановка; *2* – быстроразъемное соединение на входе в герметичный теплообменник; *3* – контур отапливаемого помещения (палатка, полевой госпиталь и др.); *4* – потребители электроэнергии; *5* – герметичный теплообменник дымовых газов

В качестве герметичных теплообменников для многотопливной энергоустановки мощностью 2,2 кВт, работающей на бензине, природном и сжиженном газе, рассмотре-

© Чухлебов С. А., Елистратов С. Л., 2025

ны гибкие герметичные гофрированные газоходы из нержавеющей стали различных диаметров, устанавливаемые взамен заводской выхлопной трубы. В работе выполнены с использованием программы Pressure Drop сравнительные расчеты гидравлических сопротивлений технологической линии выхлопных газов в зависимости от длины и диаметра газоходов, а также изменения температуры газов в зависимости от внешней теплоотдачи в нагреваемое помещение.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ КОГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

С. Л. Елистратов [1, 2, 3*], М. Ю. Савоськин[1]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630037, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
683032, Российская Федерация, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д. 4
**elistratov.sl@yandex.ru*

Рассмотрены особенности использования бинарных энергетических установок, работающих по органическому циклу Ренкина, для обеспечения электроэнергией собственных нужд водогрейных котельных и объектов критической инфраструктуры. Показано, что для организации устойчивого электроснабжения необходима корректировка схемы и режимов производства тепловой энергии.

Исторически бинарные энергетические установки используются для выработки электроэнергии на базе низко- и среднетемпературных геотермальных источников с температурой до 100 °С [1]. Как правило, при проектировании и выборе режимов их работы принимается во внимание, прежде всего, стабильность во времени температурных и расходных характеристик геотермального флюида. Однако при использовании в качестве источника тепла теплоносителя водогрейной котельной жилищно-коммунальной сферы возникают специфические ограничения и запреты.

Во-первых, при качественном регулировании отпуска тепловой энергии, например, по стандартному [2] графику 95/70, стабильная выработка электроэнергии возможна только в ограниченный по времени наиболее холодный период года на специально подобранном для этих целей низкокипящем рабочем теле. При снижении температуры нагрева теплоносителя с 95 до 70 °С и ниже возникает необходимость замены на новое рабочее тело, способное работать при таких низких температурах.

Во-вторых, воздушное охлаждение конденсатора бинарной энергоустановки для водогрейной котельной неприменимо, вследствие больших теплопотерь в окружающую среду.

В-третьих, законы качественного регулирования тепловой нагрузки изначально определяют ее неравномерность в пределах от 0,2 до 1,0 величины установленной мощности котельной соответственно в периоды конца – начала отопительного сезона при температуре наружного воздуха +8 °С и при его расчетной температуре (–39 °С, г. Новосибирск).

Для перевода работы водогрейной котельной в режим когенерации предложено изменить как внутренний температурный график выработки тепловой энергии, так и схему тепловых потоков для стабильной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Список источников

1. Gerald W. Hattrer. Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. Proc. of the World Geotermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland. April-october 2021.

2. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов. 7-е изд., стереотип. М. : Издательство МЭИ, 2001. 472 с.

© Елистратов С. Л., Савоськин М. Ю., 2025

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

О. А. Гобызов[1, 2*], А. А. Дектерев[1, 2], С. А. Филимонов[1, 2], И. А. Плохих[1, 2], Р. И. Мулляджанов[1, 2], С. В. Алексеенко[1, 2]

[1] Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2] Центр искусственного интеллекта Новосибирского государственного университета
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1
** Oleg.a.g.post@gmail.ru*

Рассматривается использование методов машинного обучения в комбинации с численным моделированием для целей анализа состояния сетей городского теплоснабжения. Обсуждаются возможные области применения и подходы для решения прикладных задач. Приводится модельный пример использования графовой нейросети для предсказания состояния гидравлической сети по ограниченному набору входных данных.

На сегодняшний день методы машинного обучения и искусственного интеллекта активно проникают практически во все сферы человеческой деятельности. Особый интерес они вызывают в областях, где требуется оперативный анализ больших объемов данных и принятие решений на их основе.

В России сформированы уникальные по масштабам и сложности системы централизованного теплоснабжения, не имеющие аналогов в ряде других стран. В контексте современных тенденций актуальной задачей является цифровизация этих систем и внедрение для них интеллектуальных систем управления. В то же время информационная разобщенность, а также ограниченные возможности натурных испытаний и сбора данных существенно осложняют решение указанной задачи.

В настоящей работе обсуждаются возможности внедрения элементов искусственного интеллекта (ИИ) для задач мониторинга у правления работой тепловых сетей. Предлагается использование инструментов численного моделирования для обучения и тестирования нейросетевых моделей.

В качестве примера демонстрируется применение нейросетевой модели для восстановления параметров работы гидравлической сети по ограниченному набору входных данных. В рассматриваемом примере использовалась цифровая модель гидравлической сети, построенная на основе сегмента реальной сети г. Ясногорска. Для подготовки набора данных в ПО SigmaNet (разработка ИТ СО РАН) [1] импортировалась топологическая схема гидравлической сети и выполнялись вариантные расчеты режимов работы гидравлической сети. В общей сложности было рассчитано более 10^4 примеров – вариантов режимов работы сети, которые использовались для обучения и тестирования нейросетевой модели. Набор данных охватывал различные сценарии работы тепловой сети, включая номинальные и аварийные режимы.

Для решения задачи предсказания параметров тепловой сети была выбрана графовая нейронная сеть (GNN) [2]. Ее основное преимущество – способность учитывать топологическую структуру графа, который отражает конфигурацию гидравлической или тепловой сети, а также взаимосвязи и взаимодействия между элементами. Например, для узла (теплового пункта) важно учитывать параметры соседних узлов и трубопроводов, чтобы корректно реконструировать его состояние.

© Гобызов О. А., Дектерев А. А., Филимонов С. А., Плохих И. А., Мулляджанов Р. И., Алексеенко С. В., 2025

Для решения задач машинного обучения применялся фреймворк PyTorch с модулем PyTorch Geometric, упрощающим работу с графовыми данными и предоставляющим готовые операции для графовых нейронных сетей. Исходные данные нормировались и преобразовывались из табличного формата в граф. Характеристики трубопроводов соответствовали признакам ребер, а параметры узлов сети – признакам узлов графа. Входными признаками служили давление, тип и баланс потока в узлах, а также номинальные диаметры трубопроводов. Модель предсказывала скорость потока и уточненные диаметры трубопроводов в ребрах графа.

В работе было протестировано несколько вариантов нейросетевых моделей, различающихся по составу входных данных, структуре слоев и способу формирования функции потерь. В качестве итоговой модели была выбрана модель с четырьмя графовыми свёрточными слоями, полносвязными проекционными слоями между ними и остаточными связями. На рис. 1 приведены графики результатов предсказания скорости течения теплоносителя на участках трубопровода и нормированных диаметров трубопровода. Для параметра скорости в большинстве случаев предсказание нейросети близко совпадает с данными датасета, для диаметра трубопроводов модель достаточно точно предсказывает значительные (>5 %) отклонения, однако в случаях упускает слабые отклонения от номинального значения. В целом модель демонстрирует высокое качество предсказания, достигая MSE на уровне 10^{-3}.

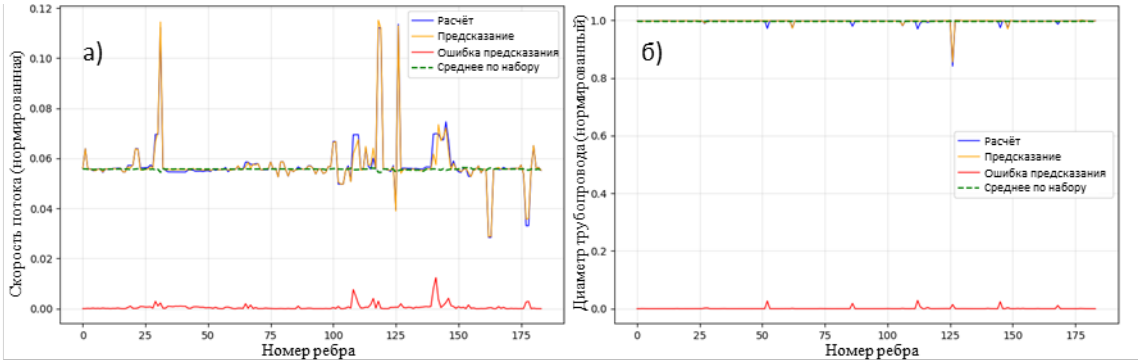


Рис. 1. Пример реконструкции скорости потока (*а*) и диаметров трубопроводов (*б*) графовой свёрточной сетью (GCN)

Настоящая работа демонстрирует перспективность предложенного подхода для целей оперативного восстановления и анализа параметров работы тепловых и гидравлических сетей. Вместе с тем для расширения его возможностей и перехода к практическому применению необходимо дальнейшее развитие методических основ и инструментов ИИ. Последующие работы планируется направить на перенос сформулированного решения на полномасштабные теплогидравлические системы, а также на адаптацию подхода для задач предсказания дефектов в работе сетей и оптимизации гидравлических и тепловых режимов.

Список источников

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2106613273 «Программа для численного моделирования потокораспределения в системах технологических трубопроводов (SigmaNet)», 24.03.2016.

2. Scarselli F., Gori M., Tsoi A. C., Hagenbuchner M. & Monfardini G. (2008). The graph neural network model // IEEE transactions on neural networks, Vol. 20(1), pp. 61-80, 2008

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOFTPLC И НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Н. К. Бородин[1, 2], В. А. Кулагин[1*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]«Красноярская теплосеть» – филиал ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)»
660014, Российская Федерация, Красноярск, ул. Малаховская, д. 5
** v.a.kulagin@mail.ru*

Ключевой задачей в системах теплоснабжения является повышение их эффективности. Известно, что проблема энергоресурсосбережения в теплоснабжении до сих пор остается на повестке современной теплоэнергетики. Частично эти проблемы можно решить за счет рационального регулирования. Совершенствование регулирования технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения возможно за счет применения нейросетевых технологий. Здесь рассмотрен способ повышения энергоэффективности систем теплоснабжения через автоматизацию тепловых пунктов с использованием SoftPLC и нейросетевых регуляторов. Проведен эксперимент, показавший превосходство нейросетевых регуляторов над классическими PID-регуляторами в условиях сложных технологических условий.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) играют важную роль в современных системах теплоснабжения. АСУ ТП включает в себя применение различных технических средств и программного обеспечения для автоматического контроля и управления технологическими процессами. Автоматизация позволяет значительно повысить эффективность, надежность и безопасность работы систем теплоснабжения [1; 2].

Несмотря на преимущества автоматизации тепловых пунктов, существует множество технических и эксплуатационных проблем, с которыми приходится сталкиваться при внедрении автоматизированных систем управления. Основные из них: нелинейность исполнительных механизмов, взаимовлияние исполнительных механизмов, сложности пусконаладочных работ, потеря актуальности коэффициентов PID-регулятора, взаимовлияние последовательно стоящих на одной трубопроводной сети.

Классическими средствами АСУ ТП решить эти задачи крайне сложно. Одним из перспективных решений для автоматизации тепловых пунктов является использование SoftPLC с нейросетевыми регуляторами. SoftPLC представляет собой программируемый логический контроллер, реализованный на программном уровне. Нейросетевые регуляторы используют методы искусственного интеллекта для адаптивного управления технологическими процессами. Они способны самообучаться на основе данных о состоянии системы и автоматически корректировать свои параметры для достижения оптимальных результатов [3]. Таким образом, совершенствование регулирования технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения возможно за счет применения нейросетевых технологий сходимости [4].

Для проведения практического эксперимента был выбран центральный тепловой пункт № 1 Филиала «Красноярская теплосеть» АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)». Объект был введен в эксплуатацию 15.09.2023, а эксперимент проводился 15 и 16 марта 2024 г., следовательно, до начала эксперимента объект на SoftPLC отработал 7 месяцев. Все это время объект находился под пристальным наблюдением, работал в диапазоне температур наружного воздуха от –35 до +15 °С. За семь месяцев работы нейросеть обучилась, страховочный адаптивный PID-регулятор работал крайне редко. При этом основное

© Бородин Н. К., Кулагин В. А., 2025

обучение нейросеть прошла буквально за первые дни работы. Основным преимуществом для инженера было отсутствие необходимости какой-либо настройки, все происходит автоматически. Наиболее явно преимущество нейросетевого регулятора проявилось в самом сложном эксперименте с регулированием Δ_T3T4 при параллельном изменении уставок двух других регуляторов. Результаты эксперимента представлены на рис. 1 и 2.

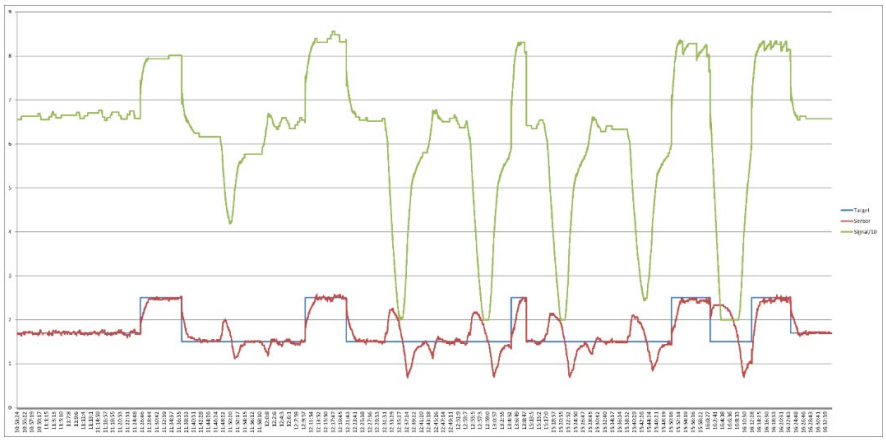


Рис. 1. Результат регулятора Δ_T3T4 с PID-регулятором

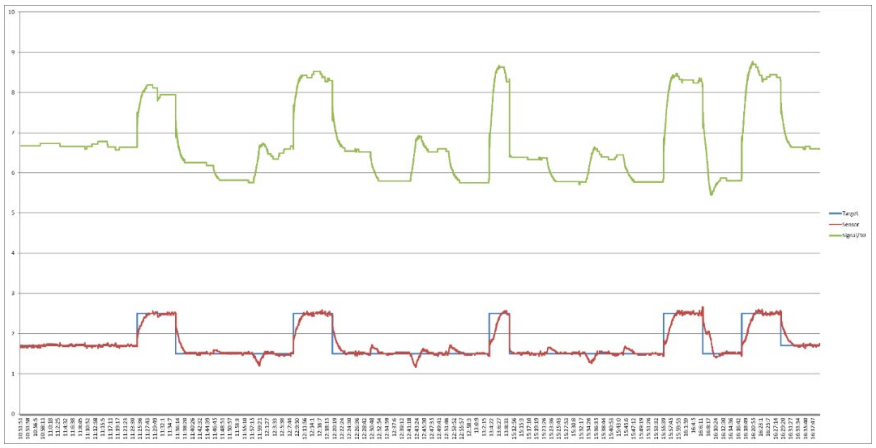


Рис. 2. Результат регулятора Δ_T3T4 с нейросетевым регулятором

Как видно из графиков, PID-регулятор данное испытание полностью провалил, а нейросетевой регулятор справился. В качестве исполнительного механизма для этого регулятора выступал насос ПНГ, работающий через частотный преобразователь. Нелинейность зависимости оборотов насоса от создаваемого давления очень высока и до 35–40 Гц насос оказывает минимальное воздействие на сеть, а свыше 40 Гц воздействие значительное. Данное испытание помимо взаимовлияния регуляторов так же осложняется сильной нелинейностью исполнительного механизма, именно этим и вызван провал PID-регулятора. Нейросетевой регулятор всегда держал насос в рабочем диапазоне и это крайне важно. Этому нейросеть обучилась самостоятельно.

Если комплексно посмотреть на итоги испытаний, то можно сказать, что нейросетевой регулятор тотально превосходит PID-регулятор по всем показателям. Скорость, точность, адаптивность – это главные плюсы нейрорегулятора, которые обеспечивают стабильный техпроцесс в любых условиях с минимальными затратами ресурсов.

Список источников

1. Ищенко А. С., Сафонов Н. Е., Колосова Н. В. Повышение энергоэффективности тепловых пунктов. Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2021. № 3 (24). С. 6–10. EDN WXCQZX.

2. Колосов М. В. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Красноярск : СФУ, 2011. 118 с.

3. Феофилов Д. С. Сравнительный анализ качества процессов управления для нейросетевых и классических регуляторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 68–72. EDN OEGGRN.

4. Бородин Н. К., Кулагин В. А. Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2025. 18 (3). С. 369–376.

ТЕРМОПОДГОТОВКА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ – СТАРЫЙ СПОСОБ РЕШЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

А. А. Дектерев

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
dekterev@mail.ru

Работа посвящена обзору технологии термоподготовки, современному состоянию и области ее использования в свете решения современных задач комплексного развития энергетики. Рассмотрен расчетный подход для оценки технологии термоподготовки угольной пыли для факельного сжигания в топках энергетических котлов с целью снижения экологически опасных выбросов, увеличения диапазона энергетической нагрузки, повышения устойчивости сжигания комбинированных топлив и др. Предложена комплексная математическая модель горения термоподготовленной угольной пыли в смеси с получаемым синтез-газом. Проведена апробация выбранной математической модели на основе экспериментальных данных. Представлены результаты моделирования различных технологических решений.

Несмотря на активное внедрение «зеленых энергетических технологий» в настоящее время, тепловая энергетика на угольном топливе будет играть значительную роль в обозримом будущем. Задача уменьшения образования NOx путем контроля процесса горения была и остается перспективным направлением для исследований, особенно это становится важным в современных условиях увеличения доли возобновляемых источников (ветроэнергетика, солнечная энергетика), когда теплоэнергетика становится регулирующим элементом энергосистемы, в этом случае котельное оборудование должно работать в широком диапазоне изменения нагрузки при соблюдении сверхнизкого уровня выбросов NOx.

В 1980-е гг. во Всесоюзном теплотехническом институте (ВТИ) на основе результатов исследования механизма образования топливных оксидов азота при сжигании широкой гаммы углей разной степени метаморфизма (от бурых и сланца до антрацита) была предложена перспективная технология, позволяющая снизить выбросы NOx. Для перевода азотистых соединений в химически неактивное состояние – молекулярный азот, процесс прогрева и пиролиза угольной пыли должен протекать при недостатке кислорода, что можно реализовать путем предварительной термообработки угольной пыли до поступления ее в топочную камеру котла [1]. Установлено, что при предварительном подогреве высококонцентрированной пылевзвеси в газовой среде с коэффициентом избытка кислорода < 0,05 с при температуре 600–800 °С выход топливных оксидов азота может быть снижен в 2–5 раз. Эта технология была экспериментально проверена на лабораторных установках в ВТИ [2], КГТУ [3]. Были предложены технические решения – горелочное устройство с внутренним пылеподогревом [4], специальный предтопок [5], реализованный на опытном котле ТП-35У СибВТИ и в выполненном проекте экологически чистого котла на 500 т/ч энергоблока № 2 Минусинской ТЭЦ [6]. Проведенные исследования и практический опыт показали, что предварительная термическая подготовка топлива непосредственно перед подачей в топку является реальным способом технологического и экологического совершенствования пылеугольных котлов. Внедрение этой технологии в России было приостановлено в 1990-х гг.

В последние годы в Китае начались интенсивные исследования в области использования термоподготовки углей и внедрения ее в практическую энергетику. Реализуются технологии термоподготовки угольной пыли для факельного сжигания в топках

© Дектерев А. А., 2025

энергетических котлов с целью снижения экологически опасных выбросов, увеличения диапазона энергетической нагрузки, повышения устойчивости сжигания комбинированных топлив и др. [7–11].

Ранее в СибВТИ и на кафедре теплофизики СФУ были разработаны математические модели и выполнены расчетные исследования отдельных процессов для различных технологий термоподготовки: с использованием муфельных горелок с резистивным нагревом; специальных предтопков и камер, использующих высокотемпературные газы отбора из топочной камеры. Результаты этих исследований использовались при отработке технологий термоподготовки.

В последние годы в ИТ СО РАН разработана комплексная математическая модель и методика расчета процессов пиролиза угольного топлива и дожигания полученной смеси синтез-газа и термоподготовленного угля. Результаты расчета процесса термоподготовки были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными ВТИ. Проведено численное исследование зависимости состава газообразных продуктов пиролиза угля от температуры нагрева угольной пыли. Запланировано комплексное изучение различных схем термоподготовки и сжигания угольного топлива.

Работы выполнены в рамках государственного задания ИТ СО (номер рег. 121031800229-1).

Список источников

1. Отчет по НИР «Влияние предварительного подогрева угольной пыли на выход топливных окислов азота при горении углей разной степени метаморфизма». М. : ВТИ, 1983.

2. Бабий В. И., Алавердов П. И., Барбараш В. М. и др. Влияние предварительного подогрева угольной пыли на выход топливных окислов азота // Теплоэнергетика. 1983. № 9. С. 10–13.

3. Дубровский В. А. Повышение эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. 184 с.

4. Бабий В. И., Вербовецкий Э. Х., Артемьев Ю. П. Горелка с предварительной термоподготовкой угольной пыли для снижения образования оксидов азота // Теплоэнергетика. 2000. № 10. С. 33–38.

5. Дубровский В. А., Евтихов Ж. Л., Деринг И. С., Бойко Е. А., Козлов С. Г., Пронин М. С., Дектерев А. А., Ковалевский А. М. Патент № 2113655 C1 Российская Федерация, МПК F23C 5/08. Топка котла. № 95119229/06: заявл. 14.11.1995: опубл. 20.06.1998.

6. Пронин М. С., Костина Л. М., Хоменко Ю. В. и др. Перспективы развития экологически чистой технологии сжигания канско-ачинских углей при ступенчатом сжигании угля с предварительным подогревом угольной пыли с установкой рукавных фильтров и активацией золы для улавливания золы, оксидов серы и азота. Новые технологии сжигания твердого топлива, текущее состояние и использование в будущем. М. : ВТИ, 2001, С. 83–91.

7. Tang Hong, Liu Zuodong, Han Xiaoju, Shen Xueqiang, Liu Yuqiu, Wang Siyuan, Xu Zhiming. Experimental study on combustion characteristics of a 40 MW pulverized coal boiler based on a new low NOx burner with preheating function. Energy, Volume 305, 1 October 2024, 132319.

8. Liang Xu, Guangqing Zhu, Yanqing Niu. Effect of preheating Co-firing of biomass and coal on the synergistic reduction of PM and NO source emissions. Journal of Cleaner Production. Volume 414, 15 August 2023, 137562.

9. Yao, Guojia & Han, Xiaoju & Liu, Zuodong & Tang, Hong & Zhou, Yongqing & Wang, Zhi. (2023). Low-NOx study of a 600 MW tangentially fired boiler based on pulver-

ized coal preheating method. Case Studies in Thermal Engineering. 48. 103156. 10.1016/j.csite.2023.103156.

10. Yao G., Han X., Tang H., Qu J. Numerical and Experimental Study on Preheating Burner Characteristics for Peak Shaving. Processes, 2024, 12.

11. Jicheng Hui, Shujun Zhu, Zhaoyang Li, Xiaoyang Cao, Qinggang Lyu. Mechanism of preheating modification on NOx emission reduction during peak shaving of different coal ranks. Process Safety and Environmental Protection 193 (2025). P. 432–445.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ ХЛОРИСТОЛИТЕВЫХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Д. Г. Мухин[1, 2*], С. Л. Елистратов[1], К. И. Степанов[2]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** mukhindg@mail.ru*

В качестве основного рабочего тела в абсорбционных термотрансформаторах используется водный раствор бромида лития. Однако данный раствор в России не производится. В качестве альтернативы можно использовать водный раствор LiCl, который, по сравнению с LiBr, имеет стоимость существенно ниже, а также обладает более низкой коррозионной активностью. В работе проведены сравнительные теоретические исследования циклов абсорбционных термотрансформаторов с LiBr и LiCl в режимах холодильной машины и теплового насоса. Результаты расчетов показывают сопоставимые показатели энергетической эффективности абсорбционных термотрансформаторов с LiBr и LiCl, что указывает на возможность использования в промышленности и теплоэнергетике. Для продолжения работы предполагается создание стенда и проведение экспериментальных исследований.

Абсорбционные термотрансформаторы (АТТ) представляют собой высокоэффективное энергосберегающее оборудование, использующее для своей работы тепловую энергию. Так как на многих предприятиях и теплоэнергетических станциях часть тепловой энергии является избыточной либо сбросной, АТТ могут быть серьезной альтернативой электроиспользующим парокомпрессионным термотрансформаторам (ПКТТ) при выработке искусственного холода положительных температур (холодильные машины) и трансформации сбросного тепла на более высокий температурный уровень (тепловые насосы). В АТТ всех мировых производителей используется две рабочие пары: $LiBr+H_2O$ и H_2O+NH_3, однако основное применение получили именно абсорбционные бромистолитевые холодильные машины (АБХМ) и тепловые насосы (АБТН). Водоаммиачные АТТ используются в качестве холодильных машин (АВХМ) для выработки холода отрицательных температур (до минус 60 ºС) и широкого распространения в мире не получили. Применение водоаммиачных АТТ для выработки холода положительных температур (от 4 °С и выше) и в теплонасосных режимах нецелесообразно, так как по сравнению с АБХМ и АБТН они обладают существенно большей габаритами и массой, а также из-за того, что в них используется ядовитый хладагент NH_3. Кроме того, в аппаратах АВХМ с повышенной температурой рабочее давление в межтрубном пространстве может быть свыше 1,0 МПа, в то же самое время в АБХМ и АБТН в межтрубном пространстве разрежение.

В качестве альтернативной рабочей пары для АБХМ и АБТН может быть использована пара LiCl + H2O. Абсорбент водный раствор соли LiCl, по сравнению с раствором LiBr, имеет меньшую коррозионную активностью и существенно меньшую стоимость. Кроме того, LiBr в России не производится и поставляется из-за рубежа, что вызывает соответствующие ограничения. К примеру, иностранные производители поставляют АБТТ уже с заправленным раствором LiBr, соответственно для АБТТ российского производства раствор LiBr может поставляться из-за рубежа только в таре, что не исключает того, что он будет некачественным или бывшим в употреблении.

© Мухин Д. Г., Елистратов С. Л., Степанов К. И., 2025

В данном сравнительном исследовании произведен расчет цикла АБХМ и АБТН для абсорбентов LiBr и LiCl (АХХМ и АХТН) и определены значения показателей энергетической эффективности при параметрах использования в промышленности и теплоэнергетике. Показателями энергетической эффективности АТТ являются тепловой коэффициент для холодильной машины и коэффициент трансформации для теплового насоса [1].

Тепловой коэффициент показывает отношение произведенного холода к подведенному теплу:

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_h}, \quad (1)$$

где Q_0 – холодопроизводительность, Вт; Q_h – подводимая тепловая мощность, Вт.

В промышленных образцах АБХМ коэффициент может составлять 0,75 для одноступенчатого цикла и 1,25 для двухступенчатого.

Коэффициент трансформации показывает отношение произведенного тепла к подведенной тепловой мощности:

$$\xi = \frac{Q_{\text{НГ}}}{Q_h}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{НГ}}$ – теплопроизводительность, Вт; Q_h – подводимая тепловая мощность, Вт.

В промышленных образцах коэффициент может составлять 1,75 для понижающих АБТН и 0,5 для повышающих АБТН.

Значения η и ξ зависят от параметров внешних теплоносителей и совершенства теплообменного оборудования.

Для расчета циклов АБТТ были использованы данные по теплофизическим свойствам водного раствора LiBr из [2]. Теплофизические свойства водного раствора LiCl были взяты из [3]. По данным из [4] были определены значения энтальпий раствора LiCl, необходимые для расчета циклов АХТТ.

Расчеты показали, что значения тепловых коэффициентов и коэффициентов трансформации для АБТТ и АХТТ являются сопоставимыми. Однако следует также отметить, что соль LiCl, по сравнению с LiBr, имеет более низкую растворимость в воде, а соответственно и меньшую абсорбционную способность. Поэтому при сравнимых коэффициентах для сохранения производительности АХТТ потребуется увеличение поверхности теплообмена, которое может быть определено в результате экспериментальных исследований. Дальнейшим продолжением данной работы предполагается создание стенда и проведение на нем сравнительных испытаний АТТ с LiCl и LiBr.

Список источников

1. Бараненко А. В., Тимофеевский Л. С., Долотов А. В., Попов А. В. Абсорбционные преобразователи теплоты : монография. СПб. : СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.

2. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, 1997.

3. Conde-Petit M.R. Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Property formulations for use in air conditioning equipment design. – Zurich, Switzerland : M. Conde Engineering, 2014. 29 p. URL: http://www.mrc-eng.com/Downloads/Aqueous%20LiCl &CaCl2%20Solution%20Props.pdf.

4. Partek J., Klomfar J. Thermodynamic properties of the LiCl–H2O system at vapor–liquid equilibrium from 273 K to 400 K. International journal of refrigeration 31 (2008) P. 287–303. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2007.05.003

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ (ОБЗОР)

А. С. Аньшаков, П. В. Домаров*, Д. М. Маркович, Л. Н. Перепечко

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** domaroff@yandex.ru*

Приведен обзор технологий получения тугоплавких металлов в рудотермических печах и плазменных установках из золошлаковых отходов угольных ТЭЦ, мусоросжигательных заводов, металлургических комбинатов.

К тугоплавким (огнеупорным) металлам (ТМ) относят металлы, имеющие температуру плавления выше 1650 °С, в частности вольфрам, молибден, ванадий, титан, тантал, ниобий, рений, рутений, цирконий, гафний, хром. ТМ необходимы для производства высококачественного оборудования и материалов. Основными потребителями ТМ являются отрасли, где требуется высокая устойчивость к температуре и коррозии (авиастроение, энергетика, производство специальных материалов).

В настоящее время отечественное производство ТМ не обеспечивает потребности отечественной промышленности (см.: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/09/13/940517-sozdat-dobichu-redkih-metallov). При этом намечающийся рост производства в РФ подтверждает остроту и актуальность проблемы снабжения промышленности дефицитными металлами, получения ТМ способом, эффективным с точки зрения сырья и затрат. Таким способом является утилизация золошлаковых отходов ТЭС, мусоросжигательных заводов и металлургических комбинатов, которые содержат значительное количество соединений ценных металлов, включая ТМ.

Угли Сибири и, в первую очередь, угли Кузнецкого бассейна содержат многие ценные редкие металлы, в т. ч. тугоплавкие [1]. Однако уровень переработки золошлаковых отходов (ЗШО) и других отходов в РФ остается неизменным с 1990 г. В Энергетической стратегии РФ (https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/#1000) в 2020 г. поставлена задача – к 2035 г. выйти на уровень переработки ЗШО не менее 50 % ежегодного объема образования.

Следует отметить, что не может быть универсальной плазменной технологии получения металлов или их соединений, под каждый вид сырья и требования к конечному продукту разрабатывается своя технология, отличающаяся по температуре, давлению, используемым присадкам. В настоящее время наиболее распространенными являются электрохимические технологии получения соединений тугоплавких металлов.

В области гораздо более высоких температур реально, например, быстрое превращение необработанной руды или даже наиболее тугоплавких полезных ископаемых в пар, состоящий в т. ч. из ионизированных атомов, без какого бы то ни было химического взаимодействия. Например, плазменный способ получения титановых порошков позволил повысить температуру процесса восстановления окислов титана до 3450 К, что приводит к существенному увеличению степени восстановления при получении на атмосферном давлении.

По плазменным технологиям наблюдается рост исследований и их результатов – с 2005 г. примерно трехкратный рост патентов, но при этом технологии находятся в стадии НИОКР. К основному преимуществу плазменного нагрева относится возможность получения высоких и сверхвысоких температур и концентраций мощности; бла-

© Аньшаков А. С., Домаров П. В., Маркович Д. М., Перепечко Л. Н., 2025

годаря чему можно получить любые графики температурного режима в высокотемпературной области для проведения технологических процессов (рис. 1) и отсутствие продуктов сгорания [2]. Процессы с использованием низкотемпературной плазмы перспективны для восстановления, при котором равновесие смещено в сторону высоких температур.

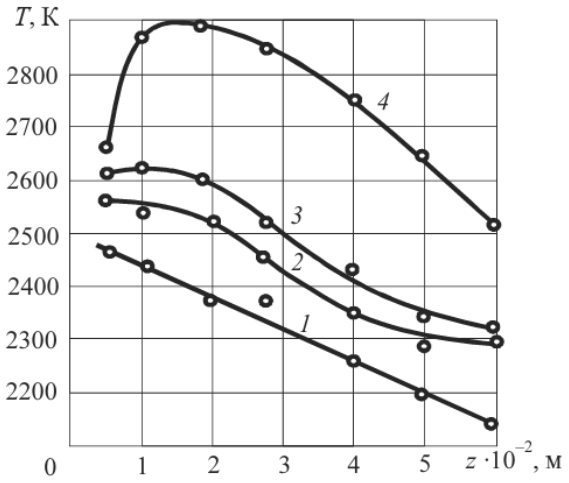


Рис. 1. Распределение температуры частиц порошка по длине столба разряда:
1 – I = 2000 А, $q_п$ = 2,1 кг/ч; *2* – *I* = 2400 А, $q_п$ = 2,1 кг/ч; *3* – *I* = 2600 А, $q_п$ = 2,1 кг/ч;
4 – *I* = 2900 А, $q_п$ = 1,2 кг/ч, где *I* – сила тока, $q_п$ – расход порошка

Утилизация золошлаковых отходов может стать экономически выгодным предприятием, учитывая растущую стоимость тугоплавких и цветных металлов, а также введение экологических норм для управления отходами.

В ИТ СО РАН совместно с НГТУ проводятся исследования по разработке руднотермических печей и плазменных установок по получению окислов металлов, карбидов, чистых веществ и редких элементов. На плазменно-дуговой установке на 10 кг/ч по исходному сырью проведены опыты по переработке летучей и подовой золы угольных электростанций (ЗШО) с получением оксидов металлов, содержащихся в исходном сырье. Температуры: до 2500°С. Новизна и конкурентные преимущества технологии: универсальность по исходному сырью, простота конструкции.

Далее будет отработана плазменно-дуговая технология для получения карбида тугоплавких металлов производительностью до 20 кг/ч по исходному сырью в защитной атмосфере аргона с применением двуструйного плазмотрона (например, карбида вольфрама и др.). Предполагается отработка плазменно-вакуумной технологии получения особо чистых тугоплавких металлов, таких как титан, ниобий, цирконий со степенью чистоты 99,999 %. Преимущества технологий ИТ СО РАН: плазмотроны с высоким ресурсом работы электродов; выполненные лабораторные испытания установок и запатентованные результаты, возможность получения в качестве продукта порошка частиц металлов в виде сфер или чешуек, слитков металлов в зависимости от характеристик процесса, высокая скорость процесса.

Список источников

1. Нифантов Б. Ф., Потапов В. П., Анфёров Б. А., Кузнецова Л. В. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений. Кемерово : ИУ СО РАН, 2011.

2. Чередниченко В. С., Чередниченко В. С., Аньшаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки : учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011.

3. Каренгин А. Г. Плазменные процессы и технологии. Часть 2 : учеб. пособие. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 144 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА СОСТАВ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА

Д. М. Божеева[1, 2*], В. А. Кузнецов[1, 2], А. А. Дектерев[1, 2]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** dbozheeva@sfu-kras.ru*

Проведено численное исследование влияния температуры нагрева угольной пыли на состав газообразных продуктов пиролиза. Разработана комплексная математическая модель описания процесса пиролиза. Проведена апробация выбранной математической модели на основе экспериментальных данных. Установлена зависимость состава продуктов термоподготовки от температуры подогрева.

Крупные стационарные энергетические установки, такие как тепловые электростанции, работающие на угле, являются значительными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Среди них особое внимание уделяется оксидам азота (NOx), представляющим серьезную угрозу для экологии и здоровья человека.

Одним из наиболее эффективных методов снижения выбросов оксидов азота является предварительная термическая обработка угольного топлива. Этот процесс включает в себя нагрев угольной пыли до температур в диапазоне 600–800 К. При таких температурах при недостатке кислорода происходит частичное разложение азотосодержащих органических соединений, которые присутствуют в угле. В результате этого разложения значительно снижается образование NOx при последующем сжигании угля, что является важным аспектом для экологически чистой энергетики. Этот метод предложен в конце 1980-х гг. специалистами ВТИ [1; 2], исследования, проведенные в различных научных институтах по всему миру [3–5], подтверждают эффективность данного метода. Экспериментальные данные показывают, что термическая подготовка угля может привести к снижению выбросов NOx на уровне до 40 %. Однако, чтобы максимально эффективно использовать этот метод, необходимо глубже понять физико-химические процессы, происходящие во время пиролиза угольного топлива. Целью данной работы является разработка численной методики, которая будет предназначена для описания физико-химических процессов пиролиза. В частности, важным является изучение зависимости состава газообразных продуктов пиролиза угля от температуры нагрева угольной пыли.

Для апробации математической модели пиролиза угольной пыли были использованы экспериментальные данные, полученные ВТИ [6]. В качестве объекта исследования был выбран экспериментальный стенд, представляющий собой пылеподогреватель диаметром 12 мм и длиной 13 м. Температура стенок пылеподогревателя варьировалась в пределах 600–970 К, что позволяло исследовать влияние различных температур на состав газообразных продуктов пиролиза.

Для описания процессов пиролиза угольной пыли была предложена комплексная математическая модель, основанная на ращении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, замкнутых при помощи SST k-omega модели. Для описания физико-химических процессов, происходящих внутри пылеподогревателя, использовались следующие модели. Для расчета скорости выхода летучих веществ используется двух-

© Божеева Д. М., Кузнецов В. А., Дектерев А. А., 2025

стадийное приближение на основе модели CPD (chemical percolation devolatilization). Эта модель позволяет учитывать сложные взаимодействия между твердыми частицами угля и выделяющимися газами. Описание процессов газового горения базируется на модели концепции вихревой диссипации (EDC). Скорость выгорания коксового остатка рассчитывается с использованием диффузионно-кинетического подхода, который учитывает, как диффузию газовых компонент, так и химические реакции, происходящие в процессе горения. Все исследования были выполнены с использованием программного продукта ANSYS Fluent.

На рис. 1 представлено влияние температуры предварительного нагрева угольного топлива на газообразные продукты пиролиза.

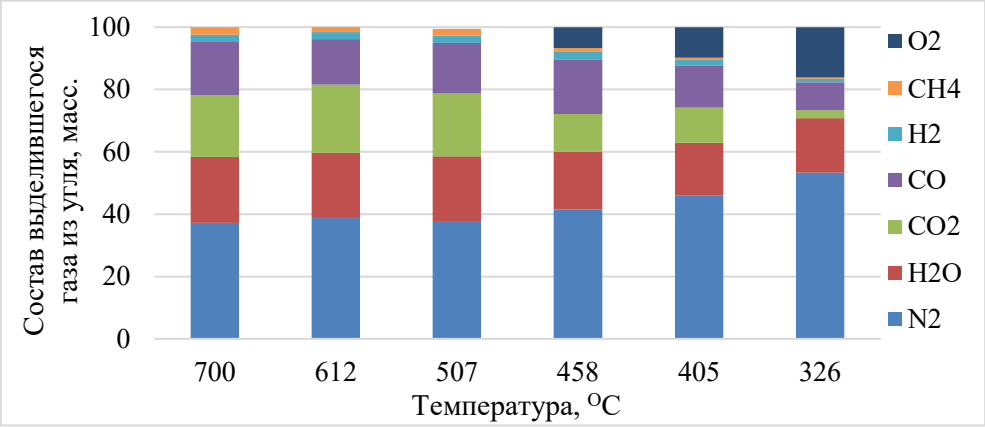


Рис. 1. Зависимости состава газообразных продуктов пиролиза угля от температуры нагрева угольной пыли

Разработана численная методика расчета процессов пиролиза угольного топлива. Результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными, полученные ВТИ. Проведено численное исследование зависимости состава газообразных продуктов пиролиза угля от температуры нагрева угольной пыли.

Работы выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список источников

1. Verbovetsky E. Kh, Investigation of the NOx Reduction Method by Thermal Pulverized Coal Pretreatment. Design and Testing of the Pulverized Coal Burner, Moscow, VTI Proceedings, 1999.

2. Babiy V. I., Verbovetsky E. Kh., Artemyev Yu. P., Tumanovsky A. G. Patent Application #99114725/06, A Method of Reduction of Nitrogen Oxide formation in Pulverized Fuel. Combustion and Low-NOx Burners, 07/07/199.

3. Rabovitser J., Bryan B., Knight R., Nester S., Wohadlo S., Tumanovsky A. G., Tolchinsky E. N., Verbovetsky E. H., Lisauskas R., Beittel R. Development and testing of a novel coal preheating technology for NOx reduction from pulverized coal-fired boilers. Gas 2003, 1, 4.

4. Rabovitser J., Bryan B., Wohadlo S., Nester S., Vaught J., Tartan M. et al. Development of METHANE de-NOX Reburn Process for Wood Waste and Biomass Fired Stoker Boilers-Final Report-METHANE de-NOX Reburn Technology Manual, Gas Technology Institute, 2007.

5. Shuai Wang, Yanqing Niu, Tian Li, Denghui Wang, Shi'en Hui. Experimental and kinetic study on the transformation of coal nitrogen in the preheating stage of preheating-combustion coupling process, Fuel, Volume 275, 2020, 117924, ISSN 0016-2361, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117924.

6. Бабий В. И., Алавердов П. И., Барбараш В. М., Канаева Т. В. Влияние предварительного подогрева угольной пыли на выход «топливных» окислов азота // Теплоэнергетика. 1983. № 9. С. 10–13.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ПРИ РАЗНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ O_2 И CO_2

В. А. Кузнецов*, Д. М. Божеева,
Ш. О. Маадыр-оол, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
**Vakuznetsov@sfu-kras.ru*

В работе проведено экспериментальное и расчетное исследование процессов воспламенения жидкого топлива (водоугольная суспензия и дизельное топливо) в условиях трубчатого реактора применительно к перспективным технологиям переработки. Исследована зависимость периода индукции воспламенения от концентрации кислорода и диоксида углерода в потоке.

Развитие перспективных технологий, таких как кислородно-капельно-факельное сжигание, позволит решить ряд проблем и улучшить экологическую картину при сжигании углеводородного топлива (в т. ч. различные измельченные отходы) на энергетических станциях [1]. Известно, что повышение O_2 в дутье позволяет снизить время воспламенения, а при повышении концентрации CO_2 в дутье (в технологии кислородного сжигания) возникает ингибирующий эффект процесса воспламенения. Учитывая вышеприведенные эффекты, возникает интерес исследовать процесс воспламенения топлива в среде с повышенной концентрацией диоксида углерода и кислорода в потоке применительно к перспективным технологиям.

Разработана экспериментальная и численная методика изучения процесса самовоспламенения дискретного потока капель жидкого топлива (водоугольная суспензия, дизель) в адиабатических условиях при разных параметрах среды (температура, скорость, концентрации CO_2, O_2, N_2 и т. д.). Экспериментально установлена зависимость времени и режимов воспламенения от параметров среды в реакционной камере. На рис. 1 представлены результаты экспериментального исследования самовоспламенения потока капель дизельного топлива в условиях лабораторного трубчатого реактора.

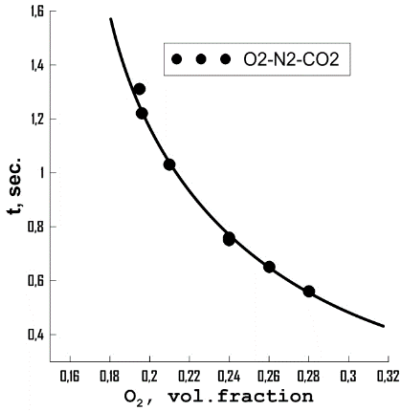


Рис. 1. Зависимость периода индукции воспламенения дизельного топлива от концентрации кислорода

© Кузнецов В. А., Божеева Д. М., Маадыр-оол Ш. О., Минаков А. В., 2025

На основе экспериментальных данных была протестирована комплексная математическая модель описания процесса воспламенения и горения рассматриваемых топлив в потоке. Проведены численные исследования зависимости процессов воспламенения топлива от параметров среды в широком диапазоне.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2024–0004.

Список источников

1. Kuznetsov V. A, Bozheeva D. M, Minakov A. V. Numerical study on processes of oxy-fuel combustion of coal-water slurry in the furnace chamber. Fuel 2024;371:132034. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132034.

ОСНОВЫ МЕХАНОАКТИВАЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ И СЖИГАНИЯ КОМПОЗИТНОГО ПОРОШКОВОГО ТОПЛИВА ИЗ УГЛЯ И ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ

А. В. Кузнецов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
temkansu@yandex.ru

Изучение основных процессов, связанных с механохимическим получением и горением композитного порошкообразного топлива, состоящего из угля и отходов деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности и сельского хозяйства, является актуальной задачей. Процессы горения композитных частиц порошкообразного топлива на основе лигноцеллюлозы и угля изучены недостаточно. В данной работе проанализированы процессы термического разложения, воспламенения и факельного горения образцов композитного топлива, созданных из опилок и угля.

Энергетический потенциал биомассы делает ее важным возобновляемым ресурсом будущего [1; 2]: по прогнозам к 2050 г. человечество сможет получать из нее до 38 % топлива и до 17 % электроэнергии [3; 4]. Возобновляемые растительные ресурсы являются практически неисчерпаемым источником биополимеров, которые могут быть переработаны в полезные материалы или использованы в электростанциях для получения энергии. Одним из перспективных направлений в тепловой энергетике является комбинированное сжигание угля и биомассы (*co-fireing*), которое уже успешно применяется в европейских странах. Этот метод позволяет утилизировать сельскохозяйственные и промышленные отходы без существенных изменений в энергоустановках и повышает эффективность процесса сжигания до 35–40 % [5].

Исследования проводились с использованием отходов деревообрабатывающих предприятий города, которые образуются в больших объемах, таких как сосновые опилки, а также углей различных марок.

В работе предложены три метода исследования: синхронный термический анализ для контроля процесса термоокислительной деструкции; воспламенение пылевзвеси в вертикальной трубчатой печи и факельное сжигание в двухступенчатой горелке с тангенциальной подачей топлива.

Результаты сравнительного термогравиметрического анализа (ТГА) показывают, что процесс термического разложения имеет несколько стадий (рис. 1). Первая стадия – выделение летучих фракций; вторая стадия – разложение коксового остатка и реакция активных центров с кислородом; третья стадия – разложение углеродной части угля.

При анализе времени вспышки (рис. 2) композита установлено, что оно ниже, чем у смеси, что в совокупности с результатами ТГА свидетельствует о неаддитивном сложении свойств, которое происходит за счет появления общей поверхности угольных частиц и опилок в результате обработки.

Кроме того, добавление угля к опилкам снижает время вспышки по сравнению с чистыми опилками, что происходит за счет реакции кислорода и радикальных центров на поверхности угля, количество которых существенно выше, чем у опилок, реакция которых инициирует горение опилочного компонента в образце.

Исследования факельного сжигания (рис. 3) полученного композитного топлива показали более полное сгорание, чем у смеси, о чем свидетельствуют температура процесса, а также данные газоанализатора.

© Кузнецов А. В., 2025

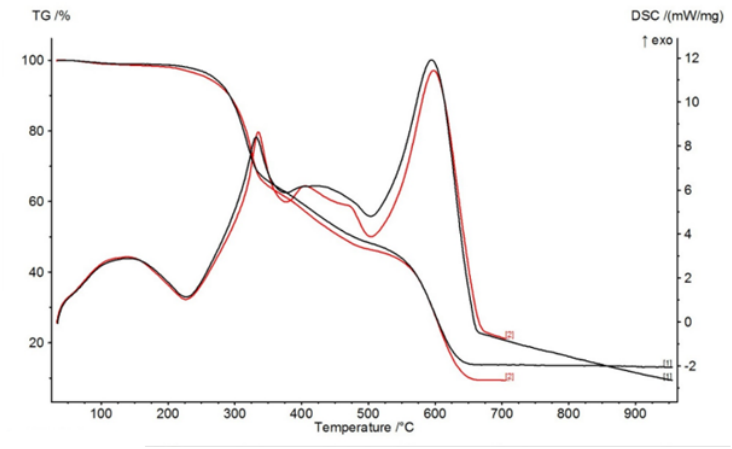


Рис. 1. Сравнение ТГА смеси и композита:
черная кривая – композит, красная кривая – смесь

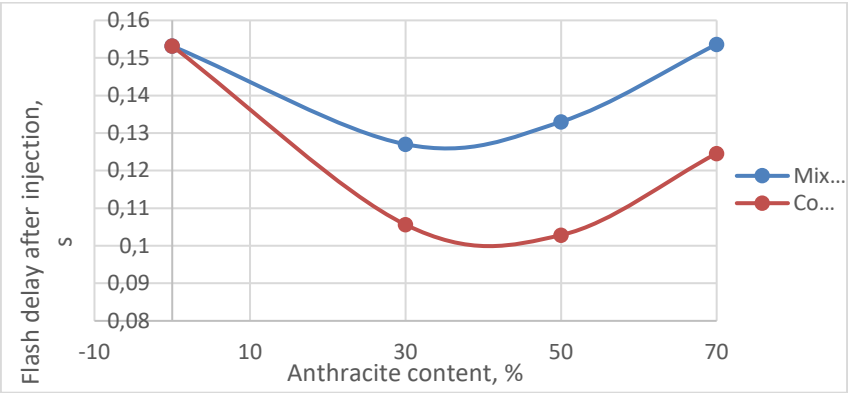


Рис. 2. Время задержки вспышки смеси и композита в зависимости
от содержания угля в образце

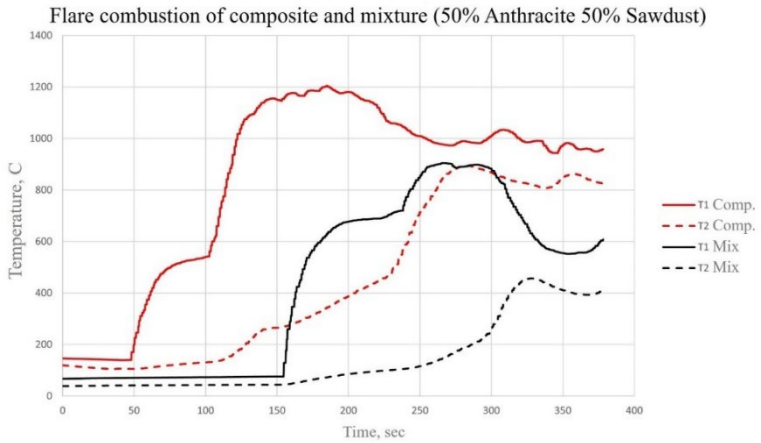


Рис. 3. Температурные кривые процесса факельного горения образцов смеси и композита

В результате установлено, что композитное топливо обладает повышенной горючестью за счет неаддитивного взаимодействия компонентов, что позволяет эффективнее сжигать твердое органическое топливо и отходы, открывая новые возможности его использования.

Список источников

1. Aiymgul Kerimray, Luis Rojas-Solórzano, Mehdi Amouei Torkmahalleh, Philip K. Hopke, Brian P. Ó Gallachóir, Coal use for residential heating: Patterns, health implications and lessons learned // Energy for Sustainable Development. 2017. Vol. 40. P. 19–30.

2. Lin C., Huang RJ., Ceburnis D. et al. Extreme air pollution from residential solid fuel burning // Nat Sustain. 2018. Vol. 1. P. 512–517.

3. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

4. Demirbas A. Biomass resources for energy and chemical industry // Energy Education Science and Technology. 2000. Vol. 5. P. 21–45.

5. Grass S. W., Jenkins B. M. Biomass fueled fluidized bed com-bustion: Atmospheric emissions, emission control devices and environmental).

Секция 2
Теплофизика и гидродинамика в многофазных средах

МОДЕЛЬ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ГОМОГЕННОЙ НУКЛЕАЦИИ В ПЕРЕСЫЩЕННОМ ПАРЕ

К. А. Финников

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
kfinnikov@sfu-kras.ru

Проведено численное моделирование роста и испарения капель в пересыщенном паре, происходящее в результате стохастических процессов поглощения и испускания молекул пара каплями. Показано, что по мере роста капель увеличивается их температура. Результатом расчетов является зависимость скорости образования стабильно растущих капель от температуры и давления пересыщенного пара. Полученная расчетная зависимость использована в модели парокапельного течения. Использование расчетной зависимости при моделировании сверхзвукового течения пара в расширяющемся канале позволило достичь лучшего согласия с экспериментом в сравнении с известными аналитическими выражениями для скорости образования капель.

Образование зародышей жидкой фазы в пересыщенном паре, изначально свободном от включений жидкой и твердой фазы, называется гомогенной нуклеацией. Этот процесс является определяющим в переходе от однофазного парового состояния к двухфазному парокапельному в условиях быстрого снижения давления, происходящего, в частности, в паровых турбинах. Растущая капля должна пройти этап, на котором суммарная энергия Гиббса капли и пара, из которого она образуется, увеличивается по причине увеличения энергии поверхности капли. Только начиная с некоторого критического размера капли эта энергия начнет падать. Классическая теория нуклеации [1] рассматривает этот этап как стохастический. Вероятность его прохождения сильно зависит от степени пересыщения, принимая ничтожно малые значения вплоть до $S = P/P_{\text{насыщ.пара}}(T) = 3 \div 4$. Вследствие этого переход от сильно пересыщенного состояния пара к двухфазному происходит через резко ограниченный во времени этап интенсивного образования капель, необратимость которого отражается, в частности, в потерях работы расширения пара в турбинах. Наличие же этапа высокой пересыщенности пара обуславливает выделение жидкой фазы на твердых поверхностях – лопатках ступеней ротора и статора, что влечет за собой проблемы капельной эрозии.

В отличие от случая нуклеации пара, являющегося малой примесью в газе (например, случай пара в атмосфере), при нуклеации в чистом паре образующиеся капли нельзя считать находящимися в тепловом равновесии с газовой фазой. В практических приложениях получил применение подход Кантровица [2], дополняющий классическую теорию учетом перепада температур между каплями и паром, который устанавливается в процессе обмена молекулами между ними. Повышенная температура капли приводит, в случае воды, к снижению скорости нуклеации на два порядка в сравнении с изотермическим случаем. Эти результаты качественно согласуются с экспериментальными данными, однако теория Кантровица противоречит классической теории, которую она использует в качестве отправной точки, в принципе своего построения, не учитывая влияние температуры капли на ее критический размер, определяющий начало стабильного роста капли. Кроме того, подход Кантровица предполагает, что температура капли является постоянной, а это справедливо лишь для капель, которые находятся на этапе стабильного роста, на котором масса испускаемого каплей пара пропорциональна массе поглощаемого. Непротиворечивое расширение классической

© Финников К. А., 2025

теории на неизотермический случай требует рассмотрения стохастического перемещения капли в пространстве «масса – энергия». В работе [3] такое расширение было выполнено, но результаты работы не получили широкого практического применения.

В настоящей работе проведено численное моделирование диффузии и направленного движения капель в пространстве «масса – энергия», проводимое с учетом реальных свойств воды. Расчеты показывают, что температура (мера средней энергии) капель растет по мере роста их размера (рис. 1).

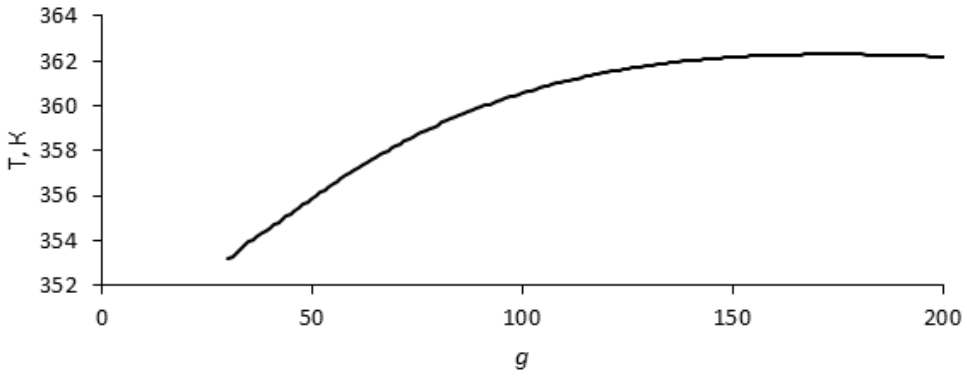


Рис. 1. Расчетная температура капель в зависимости от числа молекул.
Температура пара 353 К, температура насыщения 387 К (пересыщение $S = 3$)

Температура капель малого размера близка к температуре пара. По мере увеличения размера, температура стремится к постоянному значению. В результате расчетов получена интенсивность нуклеации (количество капель, достигающих стадии детерминированного роста в единице объема в единицу времени) как функция температуры и давления, $I(P,T)$. Расчетная зависимость $I(P,T)$ использована как составная часть модели двухфазного парокапельного течения. Рассмотрено течение пара в сверхзвуковом сопле и расширяющемся канале, сопровождаемое образованием капель и их ростом. Для определения скорости нуклеации, наряду с рассчитанной в данной работе $I(P,T)$, использовались известные аналитические выражения, полученные с помощью теории Кантровица с различными модификациями. Модель, включающая рассчитанную зависимость $I(P,T)$, показала наилучшее согласие с экспериментами (рис. 2).

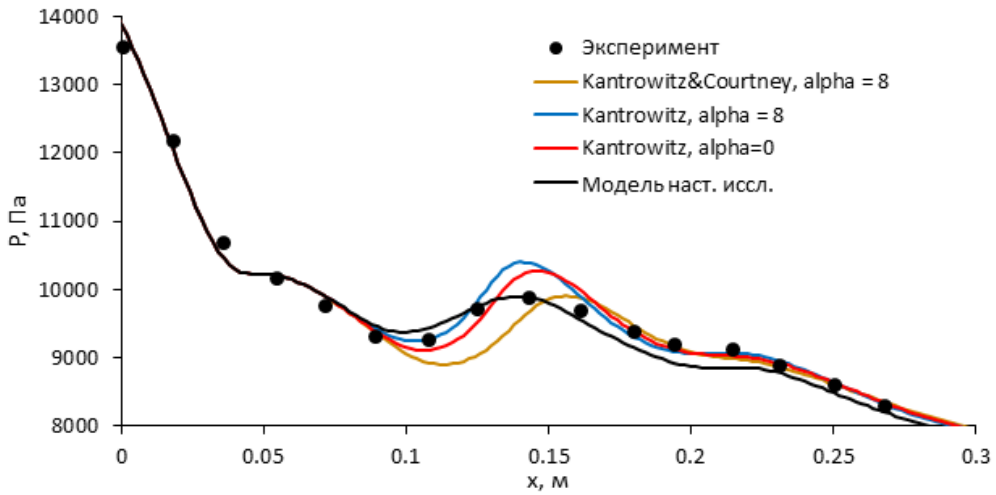


Рис. 2. Распределение давления вдоль направления течения

Список источников

1. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. М. : Изд-во АН СССР, 1946. Гл. 7.

2. Kantrowitz A. Nucleation in very rapid vapor expansions // The Journal of chemical physics. 1951. V. 19. N 9. P. 1097–1100.

3. Feder J., Russell K. C., Lothe J., Pound G. M. Homogeneous nucleation and growth of droplets in vapours // Advances in Physics. 1966. N 15 (57). P. 111–178.

4. Moore M. J. Walters P. T., Crane R. I.; Davidson B. J. Predicting The Fog-Drop Size In Wet-Steam Turbines, in: Proc. of IMECHE Conf. Wet Steam 4, Coventry, UK, 1973.

МИКРОВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ КАПЕЛЬ В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д. В. Антонов[1*], П. А. Стрижак[1, 2]

[1]Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** antonovdv132@gmail.com*

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по характеристикам паффинга/микровзрыва капель несмешивающихся жидкостей при микроволновом нагреве. Экспериментальные исследования проведены при прогреве, испарении и взрывной фрагментации капель несмешивающихся жидкостей в микроволновом волноводе в диапазонах мощности нагревателя от 500 до 800 Вт. Теоретические оценки проведены в программном комплексе *Comsol Multiphysics*, где была разработана модель прогрева, испарения и взрывной фрагментации капель несмешивающихся жидкостей при микроволновом нагреве. В качестве материалов несмешивающихся жидкостей использованы: вода, керосин, рапсовое масло, метанол. Получена удовлетворительные корреляция результатов опытов и моделирования. Сформулированы практические рекомендации для обеспечения условий оптимальной работы камер сгорания газотурбинных установок.

Микроволновый нагрев материалов активно исследуется в связи с его потенциальным применением в различных технологических процессах, включая синтез наночастиц, распылительную сушку и управление горением [1; 2]. Изучение характеристик взрывного вскипания жидкостей при микроволновом нагреве является важной задачей для понимания механизмов интенсификации фазовых переходов в условиях интенсивного нагрева [3–5]. Особый интерес представляет паффинг или микровзрыв капель несмешивающихся жидкостей, поскольку эти эффекты играют ключевую роль в процессах формирования топливовоздушной смеси в камерах сгорания газотурбинных установок [6]. Цель настоящей работы – исследование паффинга/микровзрыва капель несмешивающихся жидкостей при микроволновом нагреве при варьировании мощности микроволнового нагрева в диапазонах от 500 до 800 Вт.

Модельная камера сгорания, используемая в эксперименте, представляла собой прямоугольный волновод, изготовленный из стали, для обеспечения эффективного распространения электромагнитных волн и минимизации потерь энергии. Геометрические размеры волновода определены с учетом рабочей частоты магнетрона (2,45 ГГц) для обеспечения резонанса и максимальной концентрации электромагнитного поля в зоне расположения исследуемых капель. В качестве модельных жидкостей использовались следующие вещества: авиационный керосин ТС-1, рапсовое масло, метанол и дистиллированная вода.

На рис. 1 представлена физическая модель процесса микровзрывной фрагментации капель в условиях микроволнового нагрева, на основе которой разработана математическая модель, включающая решение уравнений энергии, диффузии компонентов, электромагнитных волн. На первом этапе исследуемая капля прогревается от комнатной температуры до достижения условий микровзрывной фрагментации. В процессе прогрева температурное поле капель становится существенно неоднородным. Прогрев протекает, как правило, от центра до границы раздела материалов. Физический меха-

© Антонов Д. В., Стрижак П. А., 2025

низм реализации микровзрывной фрагментации капель заключается в достижении на границе раздела двух жидкостей температуры нуклеации низкокипящего компонента [6]. Поскольку граница раздела жидкостей чаще всего имеет волнообразную структуру, то неоднородности границы раздела выступают в качестве готовых центров парообразования. В результате внешнего микроволнового воздействия происходит цепная активация низкотемпературных центров парообразования и формирование парового буферного слоя между жидкостями, рост давления в которых приводит к интенсивной фрагментации с образованием вторичных фрагментов.

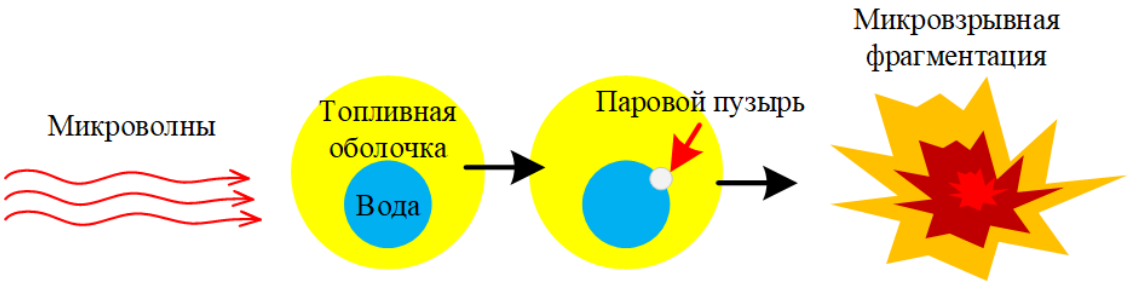


Рис. 1. Физическая модель микровзрывной фрагментации капель в условиях микроволнового нагрева

Получена удовлетворительная корреляция результатов опытов и моделирования, отличия не превышали 20 %. Сформулированы практические рекомендации для обеспечения условий работы камер сгорания газотурбинных установок при внедрении в них микроволновых излучателей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-79-10031 (https://rscf.ru/project/24-79-10031).

Список источников

1. Shahrab F., Tadjarodi A. Exploring the role of fuel in the synthesis of bismuth ferrite nanoparticles by microwave-assisted combustion in solid state and the study of photocatalytic degradation of Brilliant Blue // J. Mol. Struct., 1295, 136806, 2024.

2. Duan M., Ren C., Zheng N., Omran M., Tang J., Zhang F., Chen G. Experimental investigation and statistical analysis of the microwave drying process on the physical properties of Y_2O_3–Al_2O_3–ZrO_2 composite ceramic powder // J. Mater. Res. Technol., 32, C. 3980-3993, 2024.

3. Khan Md. I. H., Welsh Z., Gu Y., Karim M. A., Bhandari B. Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying // Int. J. Heat Mass Transf. 153, 119668, 2020.

4. Sazzad Parveg A. S. M., Ratner A. A comprehensive review of liquid fuel droplet evaporation and combustion behavior with carbon-based nanoparticles // Prog. Energy Combust. Sci. 106, 101198, 2025.

5. Tian S., Gu Y., Ju S., Xu L., Zhang L., Zhang L., YuWen C. Study on heat transfer process of microwave flash evaporation using water as medium // Int. J. Heat Mass Transf. 166, 120795, 2021.

6. Antonov D. V., Voytkov I. S., Strizhak P. A. Behavior of child droplets during micro-explosion and puffing of suspension fuel droplets: The impact of the component mixing sequence // Int. J. Heat Mass Transf, 197, 123371, 2022.

МОРФОЛОГИЯ ЧАСТИЦ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПРИ ПОТОЧНОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОГО ОПИЛА

Д. А. Баранов[1], О. Нордин[1],
М. И. Ершов[1, 2*], В. Г. Тупоногов[1], А. Ф. Рыжков[1]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
[2]ООО «ПЛМ Урал»
620131, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Металлургов, д. 16б
** miershov@urfu.ru*

Представлены результаты исследований теплофизических характеристик опила сосны и твердых продуктов его воздушной газификации в пилотной и опытно-промышленной установках. Показана трансформация размеров, формы и элементного состава частиц исходного опила по стадиям термической конверсии с построением маршрутов трансформации в диаграмме Гелдарта. Разработана модифицированная диаграмма гидродинамических режимов Грейса – Олазара, на основе которой выполнен гидродинамический анализ состояний исследуемых твердых дисперсий и скоростей газовых потоков в пилотной и опытно-промышленной установках.

В газификаторах поточного типа частицы исходного древесного топлива в процессе термической конверсии последовательно проходят стадии превращения в полукокс, летучую золу, шлаковые образования, а также возможные оплавленные настенные отложения. Происходящая при этом конверсия твердой массы частиц в газовую фазу с изменением размеров, формы и плотности частиц приводит к изменению их гидродинамических параметров, которые определяют режимы течения газодисперсного потока и должны учитываться при разработке конструкции проточной части реактора.

Исследования древесного опила по стандартным методикам показали, что опил сосны имеет типичную для древесины [1] низкую зольность 1,3 % и высокий уровень выхода летучих около 90 %. Проведенные электронные сканирования образцов установили, что в процессе определения выхода летучих (t = 950 °C) в газовую фазу переходят Al, S, P, Na, которые сохранялись в зольном остатке опила при лабораторном определении его зольности (t = 580 °C). В процессе термической конверсии частицы опила сначала обугливаются до полукокса с содержанием углерода C = 90–93 % и O = 6–9 %, уменьшаются в размерах на 10–20 % и приобретают более рыхлую структуру. Далее при переходе в белую хлопьеобразную летучую золу основной элементный состав принимает значения C = 14–24 %, O = 48–49 %, Ca = 18–19 %, K = 9–17 %. Серый донный шлак, имеющий грансостав аналогичный исходному опилу и состоящий из темно- серых твердых частиц округлой чешуйчатой формы с кажущейся плотностью ρ = 1800–2150 кг/м^3 и основным элементным составом: C = 6–28 %, O = 50–54 %, Si = 12–24 %, является продуктом разрушительного взаимодействия газа и частиц с настенной обмуровкой (поэтому высокое содержание Si), содержащем в своем составе следы органической и минеральной части опила (C, P, Mg). Крупные куски черных настенных отложений с основным элементным составом C = 27–38 %, O = 41–46 %, Ca = 10–13 %, Si = 0,6–2,5 %, K = 2–4 %, являются продуктом пиролиза опила, сползающего с наклонных стенок реактора. Коричневый шлак настенного настыля толщиной 1–2 мм, содержащий C= 36–51 %, O = 35–42 %, Si = 7–12 %, Ca = 1,8–3,1 %, Mg = 0,9–1,1 %, является оплавленным и застывшим продуктом взаимодействия коксовых частиц, обмуровки

© Баранов Д. А., Нордин О., Ершов М. И., Тупоногов В. Г., Рыжков А. Ф., 2025

и реакторного газа. Под настылем образуется промежуточный желтый слой обмуровки толщиной 2–3 мм, содержащий перешедший из настыля Mg = 0,3–0,55 %. Далее следует светлый неразрушенный слой огнеупорной массы.

Положение частиц опила с переходом в продукты газификации показаны на диаграмме Гелдарта (рис. 1), имеющей координатные оси d_s – диаметр частиц, ρ_s, ρ_g – плотности частиц и газа.

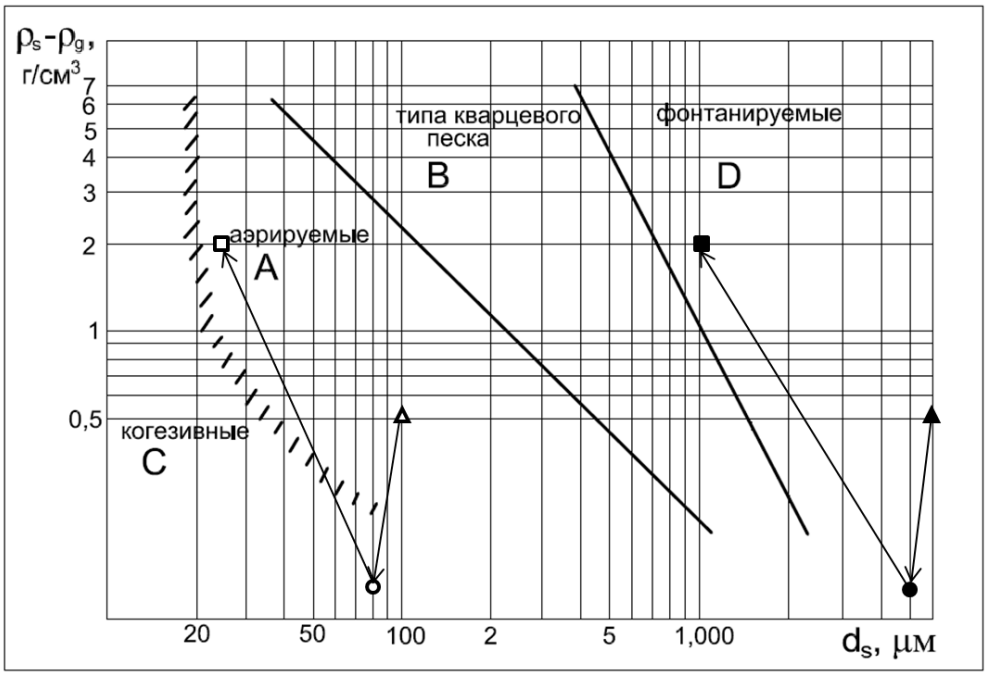


Рис. 1. Положение и маршруты перемещения реакторных частиц в диаграмме Гелдарта:
○ – кокс; □ – летучая зола; Δ – опил; светлые точки – частицы с d_s^{min}; темные – с d_s^{max}

Полученные данные по изменению морфологии частиц в реакторе были использованы при разработке модифицированной диаграммы гидродинамических режимов Грейса – Олазара [2], охватывающей область значений параметров, классифицированных по группам Гелдарта исследуемых твердых дисперсий и скоростей газовых потоков. На основе созданной модифицированной диаграммы выполнен гидродинамический анализ состояний древесной дисперсии в пилотной установке, показавший, что двухконусное профилирование проточного канала реактора высотой 1,5 м исключает унос и обеспечивает необходимое для завершения термической конверсии время пребывания в установке всего исходного полидисперсного состава твердых частиц без образования залежей и застойных зон в реакторном объеме.

В выбранных гидродинамических режимах опытно-промышленной установки создаются условия для достаточного времени пребывания крупных частиц групп B-D Гелдарта в нижнем конусе и завершения реакций конверсии для всего группового состава частиц за время транспортировки в газодисперсном потоке реактора.

В пилотной и опытно-промышленной установках в процессе работы реализуется мультирежимное газодисперсное течение, состоящее из позонных фракционных режимов пневмотранспорта, ЦКС и режима фонтанирующего слоя.

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».

Список источников

1. Кузнецов Г. В., Янковский С. А., Толоконников А. А., Чередник И. В. Механизм подавления оксидов серы в продуктах окислительного термолиза углей при их сжигании в смеси с диспергированной древесиной // Химия твердого топлива. 2020. № 5. С. 64–70.

2. Grace J. R. Contacting modes and behaviour classification gas-solid jnd other two-phase suspensions // The Canadian journal of chemical engineering. 1986. V. 64. P. 35–363.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПЛЫТИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ЖИДКОСТИ С ПАВ С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЙ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е. И. Борзенко*, А. С. Усанина

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36
** borzenko@ftf.tsu.ru*

Выполнено численное исследование течения, реализующегося при осесимметричном всплытии газового пузырька в вязкой жидкости с растворенным в ней поверхностно-активным веществом (ПАВ). Математическую основу задачи образуют уравнения Навье – Стокса, неразрывности и конвективной диффузии. На свободной поверхности граничные условия для напряжений записаны с учетом лапласовского давления и эффекта Марангони, возникающего вследствие неоднородной концентрации ПАВ вдоль границы. Численное решение основано на оригинальной лагранже-эйлеровой методике с использованием метода контрольного объема для расчета объемной фазы и метода инвариантов для расчета на межфазной границе. Выполнены параметрические исследования процесса установления скорости на начальном этапе движения, сопровождающиеся затухающими колебаниями формы границы.

Процессы взаимодействия пузырьков газа с потоком вязкой жидкости широко реализуются в природе и различных технологичных приложениях, таких как технологии обогащения полезных ископаемых флотационным методом, химическая индустрия, фармацевтика и т. п. Первые результаты по движению пузырька в присутствии ПАВ получены В. Г. Левичем [1]. Целью настоящей работы является численное моделирование задачи о всплытии одиночного газового пузырька в вязкой среде в присутствии растворенного ПАВ и построение критериальных зависимостей описывающих процесс с учетом затухающих колебаний формы свободной границы.

Движение жидкости считается осесимметричным, а газ в пузырьке – идеальным. Течение среды описывается системой уравнений Навье – Стокса и неразрывности, а перенос поверхностно-активного вещества – уравнением конвективной диффузии:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U}\cdot\nabla\mathbf{U} = -\nabla P + \frac{1}{\mathrm{Ga}}\nabla^2\mathbf{U} + \mathbf{e},\ \ \nabla\cdot\mathbf{U} = 0,\ \ \mathrm{Pe}\left(\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U}\cdot\nabla C\right) = \nabla^2 C.$$

,

где $\mathbf{e} = \mathbf{g}/g$; $\mathrm{Ga} = \dfrac{\rho_l\sqrt{gR^3}}{\mu_l}$ – число Галилея; $\mathrm{Pe} = \dfrac{\sqrt{gR^3}}{D_f}$ – объемное число Пекле; $\mathbf{U}$ – вектор скорости; t – время; P – гидродинамическое давление; D_f – коэффициент объемной диффузии; $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения; ρ_l, μ_l – плотность и вязкость жидкости соответственно; C – объемная концентрация ПАВ.

Газ в пузырьке описывается уравнением состояния Менделеева – Клапейрона.

Область течения представляет собой цилиндр. На оси симметрии выполняются условия симметрии, на внешних границах – жидкость покоится. Границы удалены на достаточное расстояние от пузырька, исключающее их влияние на динамику его всплытия. Граничные условия на свободной поверхности для нормального и касательного напряжений записаны с учетом лапласовского давления и эффекта Марангони

© Борзенко Е. И., Усанина А. С., 2025

$$-P+\frac{2}{\mathrm{Ga}}\frac{\partial U_n}{\partial n}=-P^*+\frac{\sigma}{\mathrm{Bo}}\left(k_1+k_2\right),\quad \left(\frac{\partial U_n}{\partial s}+\frac{\partial U_s}{\partial n}\right)=-\frac{\mathrm{Ga}}{\mathrm{Bo}}\nabla_s\sigma,$$

где $\mathrm{Bo}=\dfrac{g\rho_l R^2}{\sigma_0}$ – число Бонда; P^* – давление газа в пузырьке; k_1, k_2 – главные кривизны свободной поверхности; n, s – нормальное и касательное направление на свободной поверхности соответственно.

Движение поверхности описывается кинематическим граничным условием. Значение коэффициента σ определяется по формуле [2]

$$\sigma=1+\mathrm{Ma}\cdot\ln\left(1-\Gamma\right),$$

где $\mathrm{Ma}=\dfrac{R_G T\Gamma_\infty}{\sigma_0}$ – число Марангони; σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения для чистой жидкости; Γ – поверхностная концентрация ПАВ; R_G – универсальная газовая постоянная; T – температура. Поверхностная концентрация Γ рассчитывается в соответствии со следующим уравнением переноса вещества вдоль свободной границы [3]:

$$\mathrm{Pe}^\Sigma\left(\frac{\partial\Gamma}{\partial t}+\nabla_s\cdot\left(\mathbf{U}_s\Gamma\right)+\Gamma\nabla_s\cdot\mathbf{n}\left(\mathbf{U}\cdot\mathbf{n}\right)-\mathbf{U}\cdot\nabla_s\Gamma\right)=\nabla_s^2\Gamma+\frac{S^\Sigma}{\mathrm{K}},$$

$$S^\Sigma=-\nabla C^{|\Sigma}\cdot\mathbf{n},\qquad -\nabla C^{|\Sigma}\cdot\mathbf{n}=\mathrm{Pe}\cdot\mathrm{Ha}\cdot\mathrm{K}\left[C^{|\Sigma}\left(1-\Gamma\right)-\frac{1}{\mathrm{La}}\Gamma\right].$$

Здесь $\mathrm{K}=\dfrac{C_\infty^\Sigma}{C_0 R}$ – безразмерная длина адсорбции; $\mathrm{Pe}^\Sigma=\dfrac{\sqrt{gR^3}}{D^\Sigma}$ – поверхностное число Пекле; $\mathrm{Ha}=\dfrac{Rk_aC_0}{\sqrt{gR}}$ – число Хатта; $\mathrm{La}=\dfrac{C_0k_a}{k_d}$ – число Ленгмюра; D^Σ – поверхностный коэффициент диффузии; $\nabla_s=\left(\mathbf{I}-\mathbf{nn}\right)\cdot\nabla$; $\mathbf{u}_s=\left(\mathbf{I}-\mathbf{nn}\right)\cdot\mathbf{u}$; S^Σ – источниковый член; $C^{|\Sigma}$ – объемная концентрация поверхностно-активного вещества вблизи границы; C_∞^Σ – поверхностная концентрация насыщения; k_a – константа скорости адсорбции; k_d – константа скорости десорбции.

В начальный момент времени пузырек имеет форму сплюснутого эллипсоида, с объемом эквивалентным сфере радиуса R, и находится в покоящейся жидкости на глубине H. При этом объемная концентрация поверхностно-активного вещества равна C_0, а поверхностная концентрация равна нулю. Физическое содержание представленной математической модели описано в [4].

Для решения поставленной задачи использовалась оригинальная численная методика, в основе которой лежит смешанный лагранже-эйлеровый подход [5], который позволяет выделять точно межфазную границу на дискретном уровне и задавать естественные граничные условия на ней.

Анализ результатов расчетов показал, что движение газового пузырька в жидкости, не содержащей ПАВ, в поле силы тяжести характеризуется монотонным ростом скорости всплытия с последующим ее выходом на стационарное значение. Деформация поверхности пузырька сопровождается затухающими колебаниями. Введение в жидкость ПАВ даже в небольшом количестве приводит к изменению динамики всплытия,

связанному с проявлением эффекта Марангони на межфазной границе вследствие неоднородности коэффициента поверхностного натяжения.

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

Список источников

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М. : Физматлит, 1959. 700 с.

2. Chang C.-H., Franses E. I. Adsorption dynamics of surfactants at the air/water interface: a critical review of mathematical models, data, and mechanisms // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol.100, pp. 1-45, 1995.

3. Langmur I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // American Chemical Society, Vol. 40(9), pp. 1361–1401, 1918.

4. Manikantan H., Squires T. M. Surfactant dynamics: hidden variables controlling fluid flows // J. Fluid Mech, Vol. 892, 2020.

5. Борзенко Е. И., Шрагер Г. Р. Течения неньютоновской жидкости со свободной поверхностью. Томск : Издательство ТГУ, 2022. 208 с.

ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Э. Р. Зайнуллина*, В. Ю. Митяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б
** zajnullina_er@spbstu.ru*

Исследован теплообмен при пленочной конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы из нержавеющей стали. Выполнены прямое измерение местной плотности теплового потока с помощью градиентных датчиков теплового потока из монокристаллического висмута и наблюдение за ходом конденсации с использованием видеосъемки. Измерения осуществлены при повороте трубы в диапазоне полярного угла ф = 0–180° с шагом в 15°. Опыты проведены в диапазоне расходов насыщенного водяного пара от 1,7 до 2,8 г/с и охлаждающей воды – от 40 до 170 мл/с. Обнаружено, что при низком расходе пара (1,7 г/с) на поверхности горизонтальной трубы образуются отдельные капли несферической формы, смачивающие поверхность, при этом средняя по сечению местная плотность теплового потока составляет 156 кВт/м^2. Увеличение расхода пара приводит к образованию единой конденсатной пленки, а средняя плотность теплового потока снижается до 128 кВт/м^2. При возникновении пленки наблюдается образование поддонной зоны в нижней части трубы, на нижней образующей при ф = 180° зарегистрированы пульсации местной плотности теплового потока с частотой около 1 Гц, обусловленные отрывом конденсата, что подтверждает визуализация. Относительная неопределенность прямого измерения местной плотности теплового потока не превышает 6 %.

В зависимости от режимных параметров, ориентации и состояния поверхности пленочная конденсация может иметь разные формы. Конденсат на поверхности может создавать единую пленку [1] или образовывать отдельные несферической капли [2], ручейки, сухие участки и жидкие мостики [3]. В промышленных пароводяных теплообменниках вид и интенсивность конденсации изменяется во времени [4]: в начальный период может наблюдаться капельная конденсация, которая постепенно переходит в пленочную. Разнообразие форм пленочной конденсации требует разработки и внедрения универсального метода, позволяющего определить характер пленочной конденсации без визуального наблюдения.

Представленное исследование посвящено измерению местной плотности теплового потока (ПТП) при конденсации насыщенного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы. Измерительный участок собран по схеме «труба в трубе»: внутренняя труба выполнена из нержавеющей стали d_1/d_2 = 16/20 мм, наружная – из оптически прозрачного стекла d_1/d_2 = 105/110 мм. Длина измерительного участка составила 450 мм. В межтрубное пространство подавался насыщенный водяной пар с температурой около 100°С, расход пара регулировался в диапазоне от 1,7 до 2,8 г/с. Охлаждающая вода с температурой на входе 20°С подавалась в трубу из нержавеющей стали, ее расход менялся в диапазоне от 40 до 170 мл/с. Местная ПТП измерена с помощью градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута, установленных заподлицо с наружной поверхностью трубы из нержавеющей стали на расстояниях 100, 225 и 350 мм от входа в измерительный участок. Размеры ГДТП: ширина – 2,9 мм, длина – 6 мм, толщина – 0,3 мм; вольт-ваттная чувствительность составила 0,118 мВ/Вт. Относительная неопределенность измерения ПТП не превышает 6 %.

© Зайнуллина Э. Р., Митяков В. Ю., 2025

Для оценки распределения местной ПТП по периметру трубы предусмотрена возможность поворота трубы из нержавеющей стали вокруг собственной оси. В виду симметрии процесса измерения выполнены в диапазоне полярного угла φ = 0–180° с шагом в 15°.

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты измерений, выполненных ГДТП, установленным на расстоянии 100 мм от входа в измерительный участок, при подводе в измерительный участок насыщенного водяного пара с расходом 2,8 г/с и охлаждающей воды – 40 мл/с. На рис. 1, *а,* приведена угловая теплограмма – осредненные по времени местные ПТП в зависимости от полярного угла φ. Наблюдается образование поддонной зоны – области скопления жидкой пленки под действием силы тяжести, для которой характерно снижение интенсивности теплообмена и местной ПТП. Наибольшие значения ПТП q = 149,2 кВт/м^2 соответствуют полярному углу φ = 30°, что согласуется с теоретическими представлениями о пленочной конденсации на горизонтальной трубе. Осредненная по поверхности ПТП составляет 128 кВт/м^2.

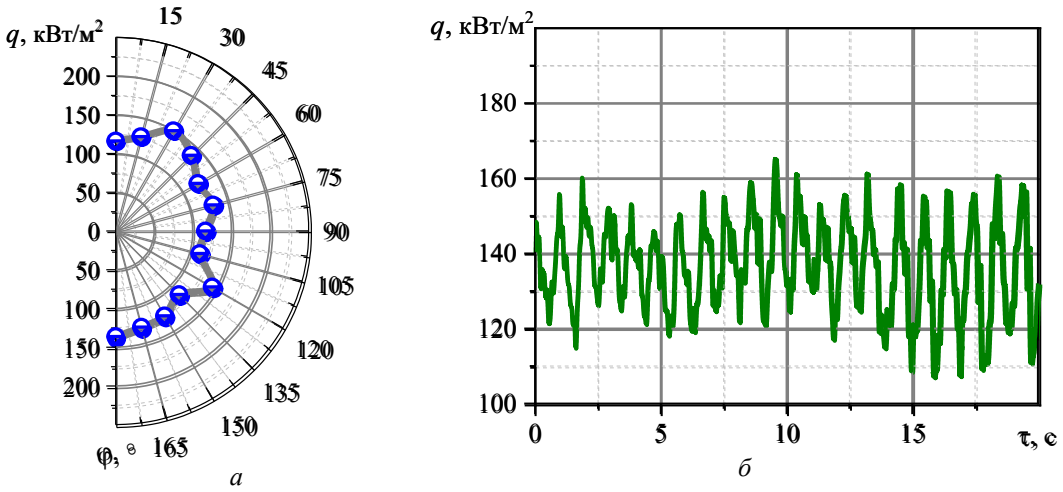


Рис. 1. Результаты теплометрии при конденсации насыщенного водяного пара с расходом 2,8 г/с: *а* – угловая теплограмма; *б* – временная теплограмма при φ = 180°

На рис. 1, *б,* приведена временная теплограмма – изменение местной плотности теплового потока во времени при расположении ГДТП на нижней образующей трубы при φ = 180°. Наблюдаются пульсации ПТП с амплитудой до 50 кВт/м^2 и частотой около 1 Гц, которые, согласно видеонаблюдению, соответствуют отрыву капель конденсата от трубы. В момент отрыва капли ПТП резко увеличивается, что обусловлено уменьшением толщины конденсатной пленки, после чего наблюдается снижение значения до первоначального уровня, связанное с натеканием и скоплением конденсата в очаге отрыва.

Характер конденсации существенно меняется при снижении расхода насыщенного водяного пара до 1,7 г/с: на поверхности возникают отдельные несферические капли конденсата, которые со временем увеличиваются в размерах, объединяются и стекают в виде ручейков; развития поддонной зоны не наблюдается. При этом осредненная по поверхности ПТП составляет 156 кВт/м^2, что обусловлено меньшим количеством конденсата.

Выявлено, что применение прямого измерения местной ПТП позволяет оценить характер пленочной конденсации без применения визуализации. Подтверждено, что при низком расходе насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе образуются

отдельные капли; при этом средняя по поверхности ПТП оказывается выше, чем при формировании единой конденсатной пленки.

Список источников

1. Swartz M. M., Yao Sh.-Ch. Experimental study of turbulent natural-convective condensation on a vertical wall with smooth and wavy film interface // Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 113, pp. 943–960, 2017.
2. Baojin Q., Zhang L., Hong X., Yan S. Experimental study on condensation heat transfer of steam on vertical titanium plates with different surface energies // Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 35, pp. 211–218, 2011.
3. Kuznetsov G. V., Ponomare K. O., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Lyulin Yu. V., Ouerdane H. Heat transfer in a two-phase closed thermosyphon working in Polar Regions // Therm. Sci. Eng. Prog., Vol. 22, 2021.
4. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. М. : Энергия, 1977. 240 с.

СПОНТАННОЕ ВСКИПАНИЕ ПЕРЕГРЕТЫХ РАСТВОРОВ ПРОПАН-ГЕЛИЙ И ПРОПАН-ВОДОРОД

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

Институт теплофизики УО РАН
620016, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а
** kav@itpuran.ru*

Экспериментально изучена кинетика флуктуационного вскипания растворов пропан-гелий и пропан-водород. Определена граница достижимого перегрева растворов.

Методом измерения времени жизни исследована кинетика спонтанного вскипания перегретых растворов пропан-гелий [1] и пропан-водород. Жидкость объемом $V = 63$ и 120 мм^3 перегревалась в стеклянных капиллярах. Заход в метастабильную область осуществлялся резким понижением давления, после чего измерялось время τ до вскипания раствора. При заданных температуре и давлении проводилось от $N = 20$ до 100 измерений τ, рассчитывались среднее время жизни перегретой жидкости $\overline{\tau} = \sum_i \tau_i / N$ и частота зародышеобразования $J = (V\overline{\tau})^{-1}$. Концентрация легкокипящего компонента в растворе x задавалась составом конденсируемой газовой смеси и контролировалась в специальных опытах по давлению насыщения.

Измерения времени жизни раствора пропан-гелий проведены по изобарам 1,6 и 1,9 МПа при x = 0,05 и 0,11 мол %, раствора пропан-водород – по изобарам 1,3; 1,6 и 1,9 МПа при x = 0,08 и 0,25 мол %. Исследованный интервал частот зародышеобразования $3\cdot10^4 \ldots 1\cdot10^8$ м$^{-3}$с$^{-1}$. На экспериментальных изобарах выделены участки гомогенного и инициированного зародышеобразования. Гомогенное зародышеобразование наблюдается при $J > 3\cdot10^6$ м$^{-3}$с$^{-1}$ и характеризуется резкой зависимостью частоты нуклеации от температуры ($\mathrm{d}\lg J/\mathrm{d}T$ = 5–8). По результатам измерений определена температура достижимого перегрева раствора $T_n^{эксп}$, соответствующая частоте $J = 10^7$ м$^{-3}$с$^{-1}$. Растворение гелия в пропане приводит к понижению $T_n^{эксп}$ на 1,6–1,8 К, водорода на изобарах 1,6 и 1,9 МПа – на 2,0 К.

Экспериментальные данные сопоставлены с результатами расчетов по классической теории нуклеации [2] в приближении отсутствия зависимости поверхностного натяжения от кривизны межфазной границы раствор – зародыш $T_n^{теор}$. Для раствора пропан-гелий значения $T_n^{эксп}$ ниже, чем $T_n^{теор}$ на 0,4–0,7 К. В чистом пропане и в растворе пропан-водород соотношение между $T_n^{эксп}$ и $T_n^{теор}$ неоднозначно, однако расхождения не превышают 0.8 К. Для исследованных растворов наблюдается хорошее согласие экспериментальных и теоретических значений $\mathrm{d}\lg J/\mathrm{d}T$.

Анализируется влияние процессов диффузионного подвода к пузырьку молекул легкокипящего компонента и свободномолекулярного обмена между растущим пузырьком и окружающим раствором на формирование критического зародыша. Обсуждаются возможные причины рассогласования значений $T_n^{эксп}$ и $T_n^{теор}$: неучет в теории зависимости поверхностного натяжения от кривизны поверхности раздела фаз, неравновесный состав пара в критическом пузырьке и другие факторы.

© Каверин А. М., Панков А. С., Байдаков В. Г., 2025

Список источников

1. Baidakov V. G., Kaverin A. V., Pankov A. S. Superheating and spontaneous boiling-up of liquid propane (R-290) saturated with helium // Int. J. Refrigeration, Vol. 98, pp. 494–499, 2019.

2. Baidakov V. G. Explosive Boiling of Superheated Cryogenic Liquids. Wiley-VCH. Weinheim. 340 p., 2007.

СПРЕЙНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ И ИХ АДРЕСНАЯ ДОСТАВКА В ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПУТИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д. В. Антонов[1, 2*], П. А. Стрижак[1,2], С. С. Сажин[1, 2, 3]

[1]Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Advanced Engineering Centre, School of Architecture, Technology and Engineering
University of Brighton, Brighton, BN2 4GJ, UK
** antonovdv132@gmail.com*

Ингаляционный способ доставки лекарственных средств становится все более и более предпочтительным при лечении целого ряда заболеваний, в т. ч. топически не связанных с дыхательной системой. Ключевым параметром, определяющим эффективность таргетной терапии в дыхательные пути, является депозиция. Несмотря на эволюцию портативных устройств доставки лекарственных средств, депозиция в терапевтической мишени дыхательных путей обычно не превышает 60 %. В данной работе предложен теплофизический подход к управлению потоками аэрозоля в дыхательных путях для достижения максимальной депозиции с учетом индивидуальных особенностей пациента (физиологии дыхательных путей и архитектуры дыхательных путей человека). Разработан прогностический математический аппарат на базе трехмерного моделирования в Comsol Multiphysics с использованием модулей Heat Transfer, Fluid Flow, Particle Tracing и User Defined Functions. Проведен блок экспериментальных исследований для получения входных параметров модели и ее валидации. С использованием полученной в ходе анализа базы данных, сформулированы условия, позволяющие повысить депозицию лекарственных препаратов в дыхательные пути.

В настоящее время одной из самых важных задач ингаляционной терапии является адресная доставка лекарственного средства в дыхательные пути. Несмотря на эволюцию в устройствах доставки и разработку новых молекул активных веществ, ингаляция остается одним из самых сложных видов лекарственной терапии для пациентов. Широкий спектр физических факторов, влияющих на образование аэрозоля лекарственного средства, его доставку до мишени в определенных зонах дыхательных путей, в т. ч. включают выполнение техники ингаляции пациентом, вариабельность легочной функции и физические свойства дыхательных путей [1]. В настоящий момент депозиция ингаляционных препаратов находится в пределах от 2 до 60 % [2–4]. На эффективность адресной доставки лекарственного средства в легкие с помощью конкретного устройства влияют анатомические особенности (геометрия дыхательных путей, влажность, механизмы выведения), физиологические (например, температура тела человека) и иммунологические барьеры дыхательных путей [5]. Актуальной задачей является создание прогностической математической модели (рис. 1) для адресной доставки лекарственного средства в дыхательные пути с учетом упомянутых выше фармакологических и физико-химических особенностей как лекарственного средства, так и дыхательных путей.

© Антонов Д. В., Стрижак П. А., Сажин С. С., 2025

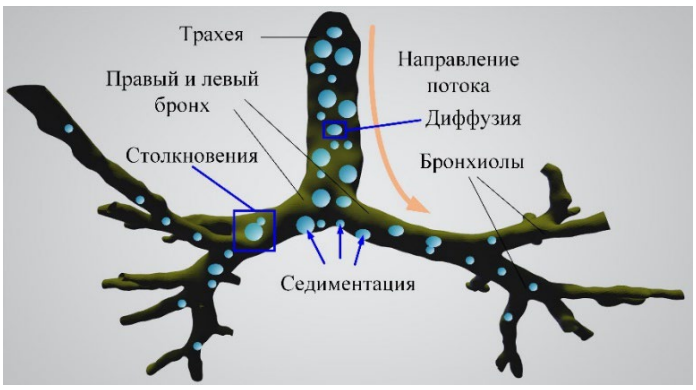


Рис. 1. Физическая модель спрейного распыления лекарственных препаратов и их адресной доставки в дыхательные пути

Предложена математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса потоков аэрозолей лекарственного средства для адресной доставки в дыхательные пути на базе трехмерного моделирования в Comsol Multiphysics с использованием модулей Heat Transfer, Fluid Flow, Particle Tracing и User Defined Functions. Численные расчеты проводились при температуре тела человека от 309,75 К до 312,15 К. В соответствии с рекомендациями в [6; 7] скорость вдоха принималась равной 0,5 м/с во всех расчетах, а скорость потока лекарственного средства – 8 м/с. В качестве модели лекарственного средства принимались капли воды. Предполагается, что физико-химические свойства воды близки к свойствам большинства наиболее распространенных лекарственных средств, в которых вода выступает в качестве несущей среды и одновременно является вспомогательным веществом (доля воды, как правило, составляет до 90 %). В начальный момент времени вводилось допущение, что капли модельных лекарственных средств прогреты до комнатной температуры (300 К). Распределение капель модельных лекарственных средств по размерам задавалось в соответствии с логнормальным распределением (средний размер капель принимался 4,5 мкм, а дисперсия – 1 мкм, начальное суммарное количество капель – 10^5). Испарение задавалось в соответствии с моделью Максвелла. В качестве модели потока использована ламинарная модель, поскольку числа Рейнольдса в большей части дыхательных путей не превышают 2300. Критические числа Рейнольдса (>2300) встречаются, как правило, только в области крупных бронхов и при больших расходах лекарственного средства и скоростях вдоха [6; 7]. Принято допущение, что капли, попадая на стенку бронхов сразу осаждаются, контактные взаимодействия между каплями не учитываются в силу того, что для типичного медицинского ингалятора объемная доля капель (частиц) аэрозоля во вдыхаемом воздухе очень мала и составляет порядка 10^{-5} [6; 7]. С использованием полученной в ходе анализа базы данных, сформулированы условия, позволяющие повысить депозицию лекарственных препаратов в дыхательные пути. В частности, с увеличением тела человека на выходе из устройства доставки важно задавать размеры капель на 10–15 % выше, чем традиционный диапазон размеров капель от 0.5 до 5 мкм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-45-00012 (https://rscf.ru/project/24-45-00012/).

Список источников

1. Newman S. P. A comparison of lung deposition patterns between different asthma inhalers // J. Aerosol Med., 8(3), 1995.

2. Leach C. L., Davidson P. J., Hasselquist B. E., Boudreau R. J. Lung deposition of hydrofluoroalkane-134a beclomethasone is greater than that of chlorofluo- rocarbon fluti-

casone and chlorofluorocarbon beclomethasone: a cross-over study in healthy volunteers // Chest., 122, P. 510–516, 2002.

3. Daley-Yates P. T., Price A. C., Sisson J. R., Pereira A., Dallow N. Beclomethasone dipropionate: absolute bioavailability, pharmacokinetics and metabolism following intravenous, oral, intranasal and inhaled administration in man // Br. J. Clin. Pharmacol. 51, p. 400–409, 2001.

4. Anderson P. Use of Respimat Soft Mist inhaler in COPD patients // Int J Chron Obs. Pulmon Dis. 1, p. 251–259, 2006.

5. Liang L. J., Pan H. W., Vllasaliu D. Pulmonary Delivery of Biological Drugs // Pharmaceutics. 12, 1025, 2020.

6. Zhang Z., Kleinstreuer C., Kim C. Micro-particle transport and deposition in a human oral airway model // J. Aerosol Sci., 33, p. 1635–1652, 2002.

7. Stapleton K. W., Guentsch E., Hoskinson M. K., Finlay W. H. On the suitability of k-ε turbulence modeling for aerosol deposition in the mouth and throat: a comparison with experiment // J. Aerosol Sci. 31, p. 739–749, 2000.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ С ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗАКРУТКОЙ

М. А. Пахомов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
pma41976@yandex.ru

Выполнено численное исследование влияния закрутки периферийного потока в цилиндрическом канале на локальную структуру течения и теплообмен в турбулентном газокапельном потоке с использованием эйлерова и лагранжева подходов. Показано, что добавление капель приводит к существенному росту теплообмена (более 2,5 раз) в сравнении с однофазным закрученным течением. Закономерности теплообмена в газокапельных течениях при наличии закрутки и ее отсутствии имеют качественно подобный вид. Эффект интенсификации теплообмена за счет закрутки газокапельного потока достигает 50 % при $M_{L1} = 0{,}1$. Первоначально с ростом размера капель происходит значительная интенсификация теплообмена в закрученном течении. Максимальный теплообмен получен при $d_1 \approx 50$ мкм для всех интенсивностей закрутки двухфазного потока.

Закрученные двухфазные течения с твердыми или жидким частицами широко используются в различных практических приложениях, например, при стабилизации процесса горения в промышленных горелочных устройствах и в сепараторах [1; 2]. Наличие закрутки потока оказывает заметное влияние на интенсивность процессов переноса и распространение дисперсной фазы и в существенно усложняет математическое описание. Поэтому, несмотря на широкое применение двухфазных закрученных течений при наличии испарения частиц в различных практических приложениях, процессы турбулентного тепломассопереноса в таких потоках остаются еще недостаточно изученными.

Целью данной работы было выполнение численного моделирования влияния закрутки потока на распределение дисперсной фазы, структуру течения, турбулентность и интенсификацию теплопереноса в газокапельном течении с использованием эйлерова и лагранжева описаний.

Рассмотрена задача о динамике двухфазного закрученного турбулентного газокапельного потока при наличии теплообмена со стенками трубы. Газовая фаза описывается системой нестационарных трехмерных RANS уравнений с учетом влияния частиц на процессы переноса в газовой фазе [3]. Турбулентность газовой фазы рассчитывается по эллиптической модели переноса рейнольдсовых напряжений [4] с учетом влияния дисперсной фазы на турбулентные характеристики [3]. Для описания двухфазного потока используются: эйлеров континуальный (так называемые двухжидкостные модели) [3; 5] и лагранжев (траекторный) [6] подходы. Оба эти метода имеют свои плюсы и минусы, и, как правило, дополняют друг друга. Для расчета кинетических напряжений и пульсаций температуры и турбулентного тепловой поток в дисперсной фазе используется модель [5].

В лагранжевом подходе учитывалось действие следующих силовых факторов на частицу: сил сопротивления, тяжести, турбофореза и Сэффмена. При расчете динамики дисперсной фазы с использованием стохастического лагранжева подхода будет применена модель Continuous Random Walk [6]. Этот метод учитывает стохастическое влияние турбулентности газа на движение частицы и межфазное взаимодействие пред-

© Пахомов М. А., 2025

ставляет собой непрерывный процесс. Все расчеты проводились на сетке 400x80x80 = 2.56 млн. контрольных объемов.

Закрученное газокапельное двухфазное течение в трубе исследовано в опускном режиме течения. Основная однофазная воздушная струя подается в центральный канал ($2R_1$). Закрученный поток воздуха и капель воды поступает в расчетную область через кольцевой канал (R_3–R_2). Геометрия расчетной области: $2R_1 = 80$ мм, $2R_2 = 84$ мм, $2R_3 = 100$ мм. Степень закрутки потока варьировалась в диапазоне $S = 0$–0.5. Число Рейнольдса газовой фазы $\mathrm{Re} = U_{m1}2R_1/\nu = 3.2\times10^4$. Начальный диаметр капель воды $d_1 = 10$–100 мкм, их массовая концентрация $M_{L1} = 0$–0.1. Температура стенки была постоянной по всей длине расчетной области и составляла $T_W = \mathrm{const} = 373$ K. Температура воздуха и капель на входе $T_1 = T_{L1} = T_2 = 293$ K.

Отметим наличие двух групп линий, поведение которых принципиально отличается друг от друга (рис. 1). К первой относятся распределения продольной компоненты скорости газовой фазы, ее температуры и полной энтальпии смеси газа, пара и жидкости.

Эти профили имеют вид, характерный для пограничных слоев без заметного влияния на течение и теплоперенос периферийной части потока. Это говорит об интенсивном процессе смешения между основным и пристенным потоками, который практически завершается к рассматриваемому сечению $x/(2R_1) = 20$. Показано значительное неподобие между процессами тепло- и массообмена и трения. При этом расчеты, выполненные по полным энтальпиям (4) и температурам газа (5) весьма близки между собой в закрученном потоке.

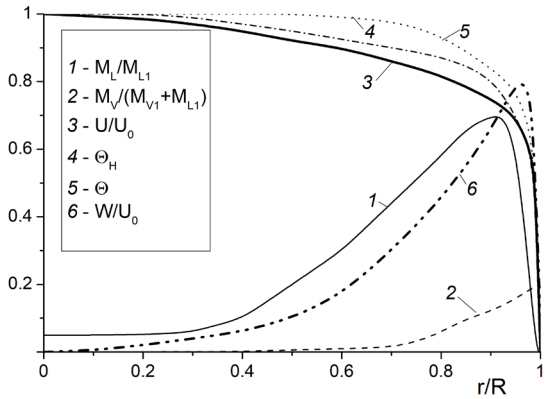


Рис. 1. Распределения по сечению трубы параметров двухфазного газокапельного закрученного потока. *1* – массовая концентрация капель, *2* – концентрация водяного пара, *3* и *6* – аксиальная и тангенциальная осредненные скорости газовой фазы, *4* – полная энтальпия газокапельного потока, *5* – температура газа. d_1=30 мкм, $M_{L1} = 0.05$, $x/(2R_1) = 20$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (код проекта РНФ 24-19-00358).

Список источников

1. Кутателадзе С. С., Волчков Э. П., Терехов В. И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск : Изд-во ИТ СО АН СССР, 1987. 282 с.

2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М. : Мир, 1987. 588 с.

3. Pakhomov M. A., Terekhov V. I. The Effect of Droplets Thermophysical Properties oOn Turbulent Heat Transfer in a Swirling Separated Mist Flow // Int. J. Thermal Sci., Vol. 149, paper 106180, 2020.

4. Manceau R., Hanjalic K. Elliptic Blending Model: A New Near-Wall Reynolds-Stress Turbulence Closure // Phys. Fluids., Vol. 14, pp. 744–754, 2002.

5. Zaichik L. I. A Statistical Model of Particle Transport and Heat Transfer in Turbulent Shear Flows // Phys. Fluids., Vol. 11, pp. 1521–1534, 1999.

6. Moissette S., Oesterle B., Boulet P. Temperature Fluctuations of Discrete Particles in a Homogeneous Turbulent Flow: A Lagrangian Model // Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 22, pp. 220–226, 2001.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА МИКРОМАСШТАБЕ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

В. С. Сердюков[1*], И. А. Косовских[1, 2], И. П. Малахов[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1
** vsserd@gmail.com*

Проведено экспериментальное исследование с помощью интерферометрии влияния понижения давления ниже атмосферного на толщину микрослоя и интенсивность локального теплообмена в окрестности тройной контактной линии жидкость – стенка – пар при кипении жидкости в условиях свободной конвекции. Полученные результаты дают новую информацию об особенностях локального теплообмена в области тройной контактной линии, а также эволюции и структуры микрослоя при кипении жидкости при варьировании давления. Появляется возможность более глубоко выявить взаимосвязь между характеристиками локального теплообмена и интегральной интенсивностью теплоотдачи при кипении и создать более обобщенные модели теплообмена, учитывающие в том числе влияние давления в системе.

Кипение жидкости является сложным нестационарным процессом, при описании которого необходимо учитывать эффекты, проявляющиеся на различных пространственных и временных масштабах. На сегодняшний день общепризнано, что при кипении в процессе роста парового пузыря в его основании образуется тонкий слой жидкости, вследствие малой толщины именуемый в литературе микрослоем. Помимо того, что процесс формирования и испарения микрослоя является неотъемлемой частью динамики паровых пузырей, он также играет важную роль в теплообмене при кипении жидкости. Так, многими авторами был отмечен существенный вклад испарения микрослоя в общую интенсивность теплоотдачи при кипении жидкости (до 50–70 % [1; 2]). Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных экспериментальному и численному исследованию особенностей эволюции и структуры микрослоя, сегодня ряд вопросов остается открытым. Одним из таких вопросов является влияние измерения параметров системы, в частности, давления на эволюцию и структуру микрослоя.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование с помощью интерферометрии влияния понижения давления ниже атмосферного на толщину микрослоя и интенсивность локального теплообмена в окрестности тройной контактной линии жидкость – стенка – пар при кипении жидкости в условиях свободной конвекции.

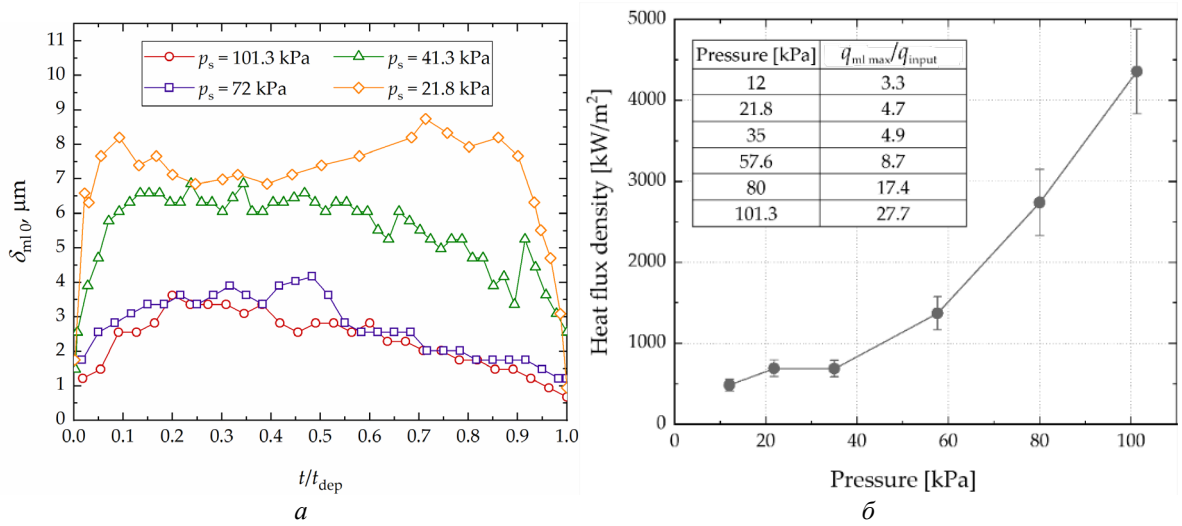
Эксперименты были проведены с использованием установки, схематический вид и описание которой приведены в [3]. Прозрачная проводящая пленка из оксида индия-олова (ITO) толщиной 1 мкм, напыленная методом ионно-плазменного распыления на сапфировую подложку толщиной 3 мм, была использована в качестве нагревателя. Для проведения экспериментов по кипению воды непосредственно на поверхности нагревателя на поверхность ITO-пленки методом ионного распыления было синтезировано устойчивое прозрачное покрытие на основе окси-нитрида алюминия (AlON).

Для получения интерференционных картин был использован метод светодиодной (LED) интерферометрии, предложенный авторами [4] как альтернатива трудозатратному методу лазерной интерферометрии. В настоящей работе использован красный светодиод ($\lambda_{LED} = 630$ нм, 200 люмен). Запись интерференционных картин была выпол-

© Сердюков В. С., Косовских И. А., Малахов И. П., 2025

нена с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom VEO 410 с частотой съемки 7500 кадров в секунду. Пространственное разрешение видеосъемки при использовании объектива AF Micro-Nikkor 200 mm f/4D IF-ED составило 15 мкм на пиксель. Запись температурного поля поверхности проводилась с частотой 1500 кадров в секунду с помощью камеры FLIR X6530s. В качестве рабочей жидкости в работе была использована деионизированная вода на линии насыщения. В работе были изучены давления p_s в диапазоне от 12 до 101,3 кПа.

На основе анализа массива данных в работе были получены зависимости толщины микрослоя от давления. На рис. 1, *а,* приведено обобщение результатов по эволюции начальной толщины микрослоя для изученных давлений. Для удобства при проведении сравнения время представлено в безразмерном виде t/t_{dep}, где t_{dep} – момент начала стадии отрыва парового пузыря от поверхности. На рис. 1 отчетливо видно, что с понижением давления начальная толщина микрослоя возрастает. Если понижение давления от атмосферного до 73 кПа несущественно влияет на толщину микрослоя, то дальнейшее снижение давления приводит к заметному росту толщину микрослоя.



а *б*

Рис. 1. Эволюция начальной толщины микрослоя при различных давлениях (*а*); зависимость максимального теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя при кипении этилового спирта, от давления: q_{input} = 150 кВт/м^2 (*б*)

Использование в работе высокоскоростной термографии позволило восстановить поле распределения теплового потока и провести исследование влияния давления на интенсивность локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями (рис. 1, *б*). Анализ полученных результатов показывает, что с понижением давления максимальная плотность теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя, заметно снижается.

Полученные в настоящей работе результаты дают новую информацию об особенностях локального теплообмена в области тройной контактной линии, а также эволюции и структуры микрослоя при кипении жидкости при варьировании давления. С их использованием становится возможным более глубоко выявить взаимосвязь между характеристиками локального теплообмена и интегральной интенсивностью теплоотдачи при кипении, что, как надеются авторы, позволит создать более обобщенные модели теплообмена, учитывающие в том числе влияние давления в системе.

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

Список источников

1. Yabuki T., Nakabeppu O. Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. V. 76. P. 286–297.

2. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M., Chen Z. Heat transfer characteristics based on mi-crolayer structure in nucleate pool boiling for water and ethanol // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. V. 68. P. 479–488.

3. Serdyukov V., Kosovskih I., Malakhov I. Experimental study of the pressure reduction effect on the microlayer thickness during pool boiling using LED interferometry technique // Journal of Engineering Thermophysics. 2025. V. 34. № 1. *in press*.

4. Kossolapov A., Phillips B., Bucci M. Can LED lights replace lasers for detailed investigations of boiling phenomena? // Int. J. Multiph. Flow. 2021. V. 135. Paper № 103522.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ В КАПЛЯХ СУСПЕНЗИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С. А. Шуляев*, Н. Е. Шлегель, А. Г. Исламова

Томский политехнический университет
660074, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 30
** sas77@tpu.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния концентрации и размеров частиц, а также размеров исходных капель на характеристики их взаимодействия в газовой среде. Размеры частиц каменного угля варьировались от 60 до 120 мкм с концентрацией в суспензии от 0,01 до 0,5 %. Зарегистрированы закономерности столкновения капель низкоконцентрированных суспензий. Установлены четыре режима соударения капель: отскок, коагуляция, разлет и дробление. Построена карта режимов взаимодействия капель суспензий при варьировании значений числа Вебера от 0 до 100.

Проблемы пылеулавливания при добыче полезных ископаемых остаются довольно острыми [1]. В связи с текущим энергетическим и геополитическим кризисами прогнозируется рост темпов добычи угля в мире и его широкое использование в ближайшие несколько лет [2]. Однако известные результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик соударений капель с твердыми частицами пока не позволяют достоверно прогнозировать последствия столкновений капель, содержащих твердые частицы, между собой. Это стало мотивацией настоящего исследования.

Цель настоящей работы состояла в построении карт режимов соударений капель жидкостей, содержащих твердые угольные частицы малой концентрации, между собой в газовой среде при варьировании размеров и концентрации твердых частиц.

В качестве жидкостей при проведении экспериментов использовались суспензии каменного тощего угля (марка «Т») с фракционным составом $R_р$ = 60–120 мкм. Концентрация твердых частиц $c_р$ в суспензии варьировалась в диапазоне от 0,01 до 0,5 %. Такая концентрация характерна для пылеулавливающих установок и составов, используемых в пищевой промышленности. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, выбор которой обоснован ее инертностью и применением в реальных составах.

Схема экспериментальной установки по определению характеристик бинарных столкновений капель суспензий представлена на рис. 1.

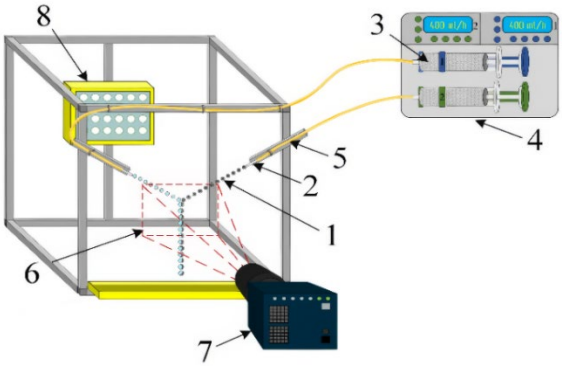


Рис. 1. Схема стенда с основными элементами: *1* – капли, содержащие твердые частицы; *2* – сменные сопла различного диаметра; *3* – шприц с жидкостью; *4* – шприцевой насос; *5* – силиконовые трубки; *6* – область регистрации; *7* – высокоскоростная видеокамера; *8* – диодный прожектор

© Шуляев С. А., Шлегель Н. Е., Исламова А. Г., 2025

Капли суспензий *1* генерировались через сменные сопла *2* с различными внутренними диаметрами (0,51–1,12 мм). Экспериментальный состав подавался в сопла из шприцов *3*, установленных в насосе *4*, с поддержанием постоянного расхода 600–1200 мл/ч. Область регистрации *6* выбиралась и настраивалась таким образом, чтобы отследить параметры исходных капель и параметры сформировавшихся вторичных фрагментов. Характеристики процесса соударения регистрировались высокоскоростной видеокамерой *7*. Съемка осуществлялась с частотой 5 000 к/с и межкадровой задержкой 1/20 000. Для подсветки использовался прожектор *8* мощностью 50 Вт.

В результате проведения экспериментов выделены четыре режима взаимодействия: отскок, коагуляция, разлет и дробление. Построена карта режимов (рис. 2), учитывающая число Вебера (We) и линейный параметр взаимодействия капель ($B = b / (R_{d1} + R_{d2})$, где b – линейный параметр сближения, мм; R_{d1}, R_{d2} – радиусы взаимодействующих капель, мм).

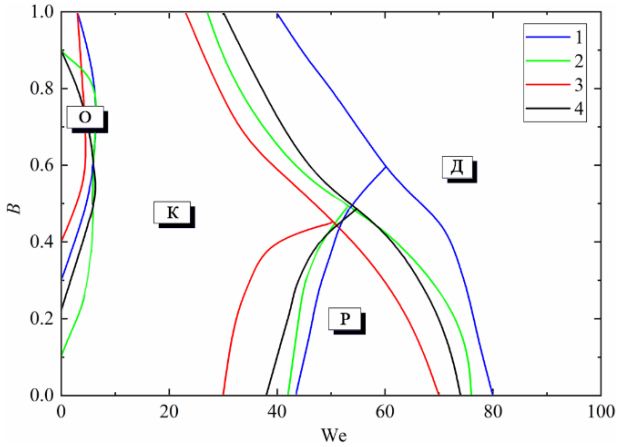


Рис. 2. Карта режимов взаимодействия суспензионных капель между собой в системе B(We): *1* – вода; *2* – суспензия c_p=0,1 масс. %, размер частиц R_p = 60 мкм; *3* – суспензия c_p = 0, масс. %, размер частиц R_p=60 мкм; *4* – суспензия c_p=0,5 масс. %, размер частиц R_p=120 мкм. Режимы: О – отскок, К – коагуляция, Р – разлет, Д – дробление

Установлено, что увеличение концентрации c_p с 0,1 до 0,5 масс. % и размеров твердых частиц R_p с 60 до 120 мкм в составе капель суспензий привело к существенному смещению границ реализации режима дробления, т. е. при меньших скоростях относительного движения и размерах родительских капель. Эти закономерности можно объяснить эффектом агломерации твердых частиц в каплях. Чем выше их концентрация и размеры, тем значительнее вклад этого процесса в трансформацию формирующейся общей капли. Этим можно объяснить наглядное смещение критических значений We, которые соответствуют переходу от коагуляции и разлета к дроблению.

Показано, что снижение концентрации твердых частиц в составе суспензий существенно нелинейно уменьшает вязкость. Проявляются синергетические эффекты от взаимного влияния твердых частиц в каплях. В частности, видеокадры опытов показали, что последовательно движущиеся твердые частицы в каплях непрерывно меняют свою траекторию относительно впереди идущих и существенно смещаются при любом взаимодействии частиц в капле между собой. Возникают гидродинамические течения вследствие разности давлений, которые определяют закономерности относительного смещения частиц в капле. Эти же течения приводят к существенному изменению концентрации частиц в разных сечениях капли. Как следствие, капли с такими неоднородными слоями по сечениям подвержены разрушению даже при относительно небольших внешних воздействиях, что приводит к смещению границы между режимами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10040 (https://rscf.ru/project/23-71-10040).

Список источников

1. Nie W. et al. A multi-indicator orthogonal investigation into the dust suppression effect of a shearer-mounted negative-pressure spraying device // Powder Technol., Vol. 399, P. 117135, 2022.

2. Suvorova I. et al. Criteria for assessing the energy-ecological effectiveness of using the sludge of waste treatment plants as components of liquid composite fuels // Eur. J. Sustain. Dev., Vol. 9, № 4, pp. 328–336, 2020.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ КАПЛИ

В. А. Архипов, А. С. Усанина*

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36
** usaninaanna@mail.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования процесса потери устойчивости формы одиночной капли жидкости в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Проанализированы закономерности деформации капли при ее гравитационном осаждении в другой несмешивающейся жидкости, при ее движении в поле центробежных массовых сил, а также при ее осаждении в воздухе в условиях обдува встречным потоком. Экспериментально получены критические значения чисел Бонда и Вебера, характеризующие начало деформации капли по механизму Рэлея – Тейлора и Кельвина – Гельмгольца соответственно.

Актуальность исследований закономерностей потери устойчивости капель связана с необходимостью повышения достоверности результатов расчетов характеристик двухфазных течений в целом ряде технологических процессов и технических систем [1]. Потеря устойчивости формы капли, приводящая к процессам ее деформации и дробления, является одним из ключевых факторов, влияющих на коэффициент сопротивления и дисперсный состав образующихся капель в двухфазном потоке. Эти процессы необходимо учитывать при расчете скорости движения частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде.

Анализ опубликованных работ показывает, что основная масса исследований посвящена изучению условий дробления капли. В настоящей работе проведено экспериментальное исследований деформации одиночной капли в широком диапазоне чисел Рейнольдса, Бонда и Вебера:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho(u+u_p)D}{\mu},$$

$$\mathrm{Bo} = \frac{g\left|\rho_p - \rho\right|D^2}{\sigma},$$

$$\mathrm{We} = \frac{\rho(u+u_p)^2 D}{\sigma},$$

где ρ, μ – плотность и коэффициент динамической вязкости внешней среды, u_p – скорость капли; D – диаметр капли; g – ускорение свободного падения; σ – коэффициент поверхностного натяжения на граничной поверхности; u – скорость внешней среды.

Для расширения диапазонов чисел Бонда и Вебера использовались экспериментальные установки, реализующие движение капли в поле силы тяжести, в поле центробежных массовых сил [2], а также осаждение в условиях обдува встречным потоком воздуха [3].

В диапазоне чисел Рейнольдса Re=0.01÷1800, Бонда Bo=3÷300 и Вебера $\mathrm{We}=6.8\cdot10^{-3}\div6.9$ экспериментально реализованы два механизма потери устойчивости

© Архипов В. А., Усанина А. С., 2025

формы капли – развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора или неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [4].

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в процессе гравитационного движения капли и при движении капли в поле центробежных массовых сил потеря устойчивости формы капли характеризуется развитием неустойчивости Рэлея – Тейлора; при движении капли в условиях обдува внешним потоком воздуха деформация капли возникает за счет возникновения неустойчивости Кельвина – Гельмгольца.

Экспериментально выявлено, что в поле силы тяжести при достижении критического значения числа Бонда, соответствующего началу потери устойчивости формы капли, капля принимает форму сплюснутого эллипсоида вращения в отсутствие или при малых скоростях внешнего потока *u*. При больших значениях *u* в тыловой части капли формируется «каверна». Деформация капли в поле массовых сил проявляется в образовании осесимметричной «каверны» на поверхности капли и ее сплющиванием.

На основе регрессионного анализа полученных экспериментальных данных по движению капли в поле силы тяжести, движению капли в поле центробежных массовых сил и движению капли в условиях обдува потоком воздуха получена эмпирическая зависимость критического числа Бонда

$$\mathrm{Bo}_{\text{кр}} = 288 \cdot \exp\left(\frac{-\mathrm{Re}}{5}\right) + 3.5,$$

соответствующего началу деформации капли. Выявлено монотонное уменьшение значения числа $\mathrm{Bo}_{\text{кр}}$ от 300 до 3 по мере увеличения числа Re от 0,03 до 770.

Экспериментально выявлено, что критическое значение числа Вебера $\mathrm{We}_{\text{кр}}$, соответствующее началу деформации капли, не зависит от числа Рейнольдса и составляет $\mathrm{We}_{\text{кр}} \approx 1 \pm 0{,}2$ в диапазоне чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = (0{,}01–1800)$. При движении капли в воздухе наблюдалась большее значение степени ее деформации

$$\varepsilon = \frac{D_m}{D_0},$$

где D_m – диаметр миделева сечения деформированной капли; D_0 – диаметр исходной сферической капли, чем при движении капли в другой несмешивающейся жидкости для идентичных чисел Вебера (рис. 1).

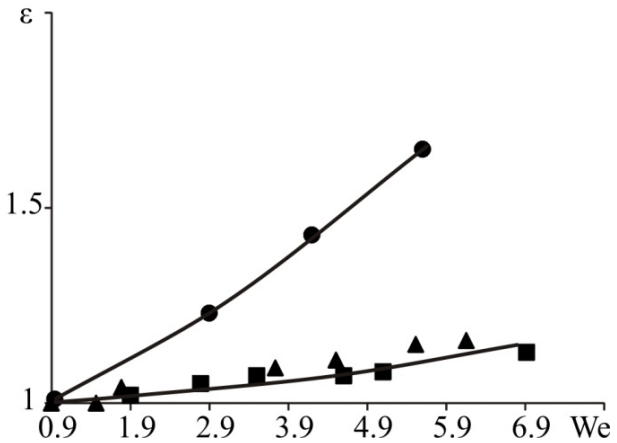


Рис. 1. Зависимость степени деформации капли от числа Вебера: ● – движение в условиях обдува встречным потоком воздуха; ■ – движение в поле центробежных массовых сил; ▲ – осаждение/всплытие в другой несмешивающейся жидкости (сплошные линии – аппроксимационные кривые)

Список источников

1. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения газа с частицами. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2008. 600 с.

2. Архипов В. А., Березиков А. П., Васенин И. М., Трофимов В. Ф., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. Устройство для исследования устойчивости движения капель // Патент 2394649 РФ / 2010. Бюл. № 20.

3. Архипов В. А., Перфильева К. Г., Басалаев С. А., Шрагер Г. Р., Поленчук С. Н., Усанина А. С. Стенд для исследования деформации капель аэродинамическими силами. // Патент 2638376 РФ / 2017. Бюл. № 35.

4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М. : Наука, 1987. 464 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ КИПЕНИЯ В ЗАЗОРЕ МАЛОЙ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ, УСТАНОВЛЕННОЙ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ КИПЕНИЯ

М. Д. Филиппов*, А. В. Никулин, А. В. Беляев, А. В. Дедов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
** filippovmd@mpei.ru*

Проведено экспериментальное исследование кипения воды на гладкой поверхности, над которой по центру была установлена небольшая круглая пластина. Высота зазора регулировалась от 0,0 до 0,6 мм. Установлено, что в результате создания подобных стесненных условий повышается интенсивность парообразования и, как следствие, уменьшается температурный напор. В результате проведенных экспериментов снижение температурного напора достигало 17–20 %, что демонстрирует перспективность таких исследований.

Исследование процессов кипения на структурированных поверхностях с различными геометрическими параметрами остается одной из наиболее востребованных задач уже более 10 лет. Современные тенденции направлены на поиск новых технических решений для повышения эффективности теплообмена, где ключевыми показателями выступают коэффициент теплоотдачи (КТО), критические тепловой поток (КТП), долговечность и простота обслуживания поверхности кипения. Выбор способа модификации поверхности, формы и размера структур, типов жидкостей фактически ограничивается только техническими возможностями. Поэтому в литературе появилось огромное количество исследований процессов кипения на поверхностях с различными модификациями, что подтверждается множеством подобных обзоров [1; 2]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в процессе кипения воды при атмосферном давлении на образце с регулируемым зазором. Описание такого способа интенсификации кипения в литературе не обнаружено, что открывает новое направление для исследований. Наиболее близкая по характеру конструкция была реализована в работе [3].

Экспериментальный стенд представлял собой нагревательный блок с исследуемым образцом, помещенный в сосуд с дистиллированной водой при атмосферном давлении. Температура воды была близка к температуре кипения. Подробное описание стенда и методики проведения опытов изложено в [4]. В работе были использованы два типа образцов – с регулируемым зазором (рис. 1) и гладкая медная пластина для сравнительного анализа. Конструктивно образец с регулируемым зазором представляет собой медную нагреваемую пластину-основание с диаметром 30 мм и толщиной 2,8 мм, в центральной части которой выполнено резьбовое отверстие. В отверстие вкручен винт с круглой пластиной диаметром $d_п = 10$ мм. Регулировка величины зазора h осуществляется путем вращения винта. В экспериментах величина зазора h варьировалась от 0 до 0,6 мм. Высота зазора контролировалась калибровочными щупами.

© Филиппов М. Д., Никулин А. В., Беляев А. В., Дедов А. В., 2025

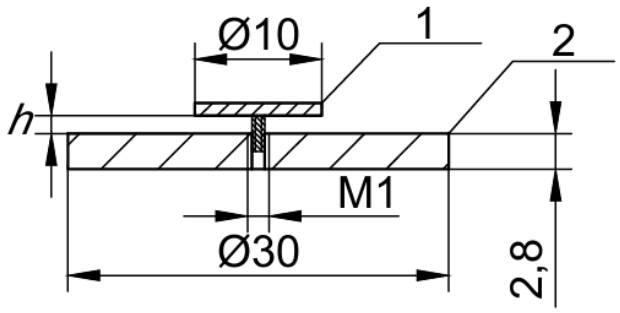


Рис. 1. Схема образца с регулируемым зазором: *1* – винт с круглой пластиной (латунь) диаметром $d_п$ = 10 мм; *2* – медная нагреваемая пластина-основание

В результате экспериментов были получены прямым ходом кривые кипения воды при атмосферном давлении для разной высоты зазора *h*. Были измерены среднеинтегральные значения температуры стенки медной пластины-основание и плотности теплового потока. Опыты повторялись несколько раз для проверки воспроизводимости результатов. На рис. 2 представлены кривые кипения для гладкой поверхности, образцов с нулевым зазором и максимальным *h* = 0,6 мм.

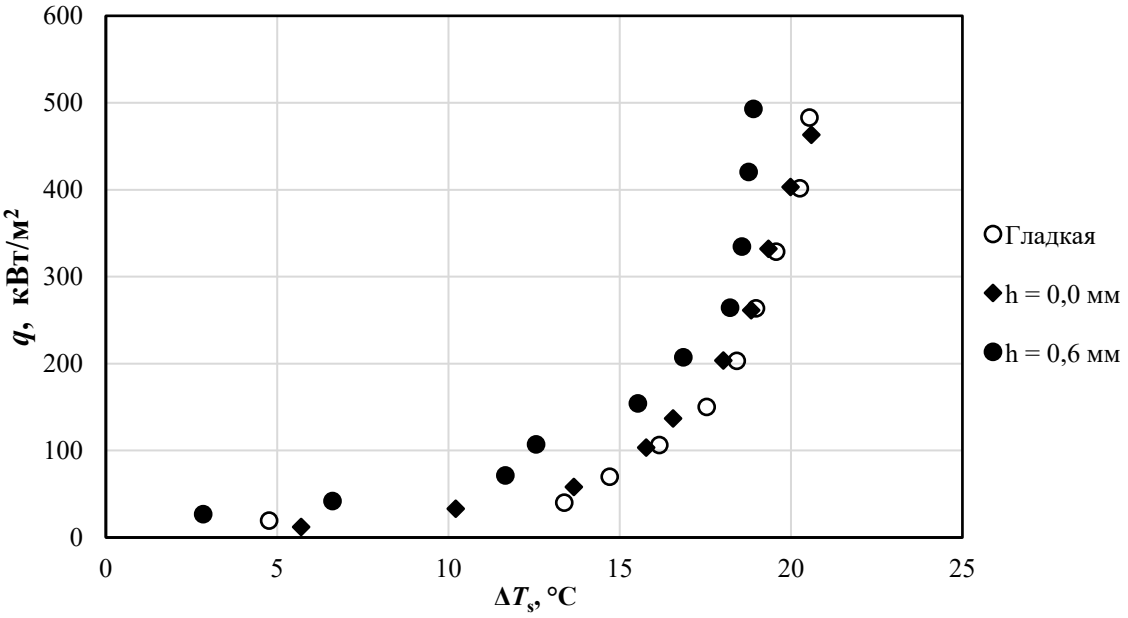


Рис. 2. Кривые кипения

Кривые кипения для гладкой поверхности и образца с нулевым зазором почти полностью совпадают. Можно сделать вывод, что присутствие винта с пластиной не повлияло на теплоотдачу. В диапазоне перегревов $\Delta T_s = (T_{ст} - T_s)$ от 10 до 20 °C наблюдалось существенное различие в интенсивности теплоотдачи: образец с зазором демонстрирует более высокие значения плотности теплового потока *q* при одинаковых перегревах ΔT_s. Использование данного способа интенсификации кипения позволило снизить температурный напор в среднем на 17 %, с максимальным эффектом до 20 %.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00403.

Список источников

1. Дедов А. В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика, 2019. Т. 66. № 12. С. 881–915.

2. Володин О. А., Печеркин Н. И., Павленко А. Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 2. С. 280–312.

3. Aranya Chauhan, Satish G. Kandlikar, Geometrical effects on heat transfer mechanisms during pool boiling in Dual Tapered Microgap with HFE7000, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 183, Part B, February 2022, 122165, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122165.

4. Дедов А. В., Филиппов М. Д. Простой способ увеличения критического теплового потока при кипении // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 99–108.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ СВЕРХИНТЕНСИВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. А. Левин*, И. И. Чупин

Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН
664033, Российская Федерация, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130
** lirt@mail.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарного теплообмена между потоком сильно недогретой до температуры насыщения жидкости и стальной поверхностью в проточном канале. Установлено образование паровой оболочки с развитием существенных колебаний давления, создающих условия для протекания сверхинтенсивного теплообмена. Изучались характерные особенности развития колебаний межфазной поверхности, связанные с возникновением условий вынужденного взаимодействия объема недогретой жидкости с поверхностью металлического нагревателя, обладающего высоким перегревом.

Процессы, протекающие в условиях нестационарного теплообмена, привлекают пристальное внимание многих ученых. Среди перспективных вопросов, возникающих в рамках этих исследований, большой интерес вызывает режим сверхинтенсивного охлаждения металлической поверхности, исследованный в разнообразных экспериментальных постановках, теоретических и численных моделях [1–4]. Ключевым условием реализации взаимодействия сред с различием их температуры в сотню и более градусов является поведение паровой пленки и/или свойства самой поверхности и охлаждающей жидкости.

Ранее в проведенных опытах [2] и последующем анализе на основе реализованной численной модели [3] была отмечена взаимосвязь между реализаций автоколебаний давления и визуально наблюдаемых мелкомасштабных возмущений на поверхности паровой пленки. Оценка динамики этих мелкомасштабных возмущений была ограничена возможностями оптической диагностики (20 кГц). В рамках представляемой работы исследуется поведение межфазной границы паровой пленки с привлечением средств высокоскоростной визуализации вплоть до 400 000 кадров в секунду, что позволяет фиксировать распространение колебаний вплоть до сотен метров в секунду.

Исследования проведены на экспериментальном стенде, созданном для изучения режимов нагрева и охлаждения металлической поверхности, нагреваемой до заданных значений температуры. В качестве охлаждаемой среды использовался движущийся поток недогретой до температуры насыщения воды. Опыты выполнялись в вертикально ориентированном канале, являющемся частью замкнутого контура с общим объемом 20 л, в составе которого также находятся: конденсатор, центробежный насос и промежуточный нагреватель для поддержания заданного уровня температуры жидкости. Рабочий канал (см. рис. 1) длиной 450 мм имеет сечение в виде квадрата со стороной 18 мм, в центре которого расположена тепловыделяющая трубка из нержавеющей стали Х18Н10Т с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм, соединенная с токоподводами. Нагрев происходит в результате импульсного протекания управляемого трехфазного выпрямленного электрического тока с различной длительностью импульса. В результате достигается высокий темп нагрева металла, вплоть до 20 К/мс, что позволяет создать существенно неравновесные условия для теплообмена в системе нагреватель – жидкость. Рабочий участок обладает оптически прозрачными окнами для вы-

© Левин А. А., Чупин И. И., 2025

сокоскоростной видеосъемки (частота съемки камерой до 600 кГц) и датчиками измерения динамики температуры и давления. Условия экспериментов следующие: начальное давление в контуре $p_0 = 0{,}3$ МПа (соответствующая температура насыщения 134 °C); величина недогрева жидкости до температуры насыщения $\Delta T_{sub} = 70$ К и 110 К; начальная скорость движения воды $w_0 = 0{,}22$ м/с.

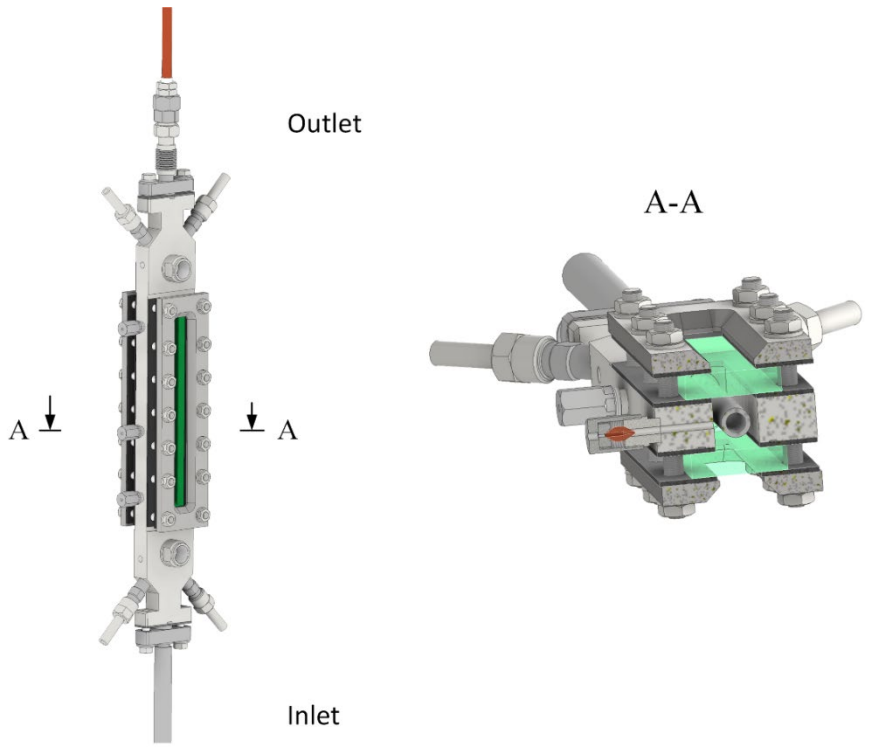


Рис. 1. Схема рабочего канала для экспериментов с нестационарным теплообменом

Список источников

1. Yagov V. V., Lexin M. A., Zabirov A. R., Kaban'kov O. N. Film boiling of subcooled liquids. Part I: Leidenfrost phenomenon and experimental results for subcooled water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 100. Pp. 908–917.

2. Levin A. A., Tairov E. A., Spiryaev V. A. Self-excited pressure pulsations in ethanol under heater subcooling // Thermophysics and Aeromechanics, 24(1), pp. 61–71, 2017.

3. Aktershev S. P., Levin A. A., Mesentsev I. V., Mesentseva N. N. Self-oscillatory regime of boiling of a highly subcooled liquid in a flow-passage annular duct // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. N 25 (6). Pp. 875–887.

4. Kanin P. K., Yagov V. V., Zabirov A. R. etc. On the Vapor Film Destabilization Mechanism during Unsteady Film Boiling // High Temperature. 2023. Vol. 61 (2). Pp. 220–228.

МОДЕЛЬ ОБЪЕМНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА: СТАДИЯ НУКЛЕАЦИИ

А. А. Чернов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
chernov@itp.nsc.ru

Представлена модель объемной кристаллизации переохлажденного расплава, корректно учитывающая изменение степени метастабильности материнской фазы в процессе зарождения и роста центров новой фазы. Рассматриваются однокомпонентные расплавы чистых металлов, подвергающиеся мгновенному переохлаждению. Показано, что на стадии нуклеации возможны принципиально различные сценарии протекания фазового превращения. Это определяется соотношением между длительностью этой стадии и характерным временем выхода на тепловую стадию роста кристалла. Различие между этими сценариями заключается в том, что в первом сценарии температурное поле в расплаве на протяжении стадии нуклеации практически однородно, а во втором – существенно неоднородно. Получены простые инженерные зависимости для доли кристаллической фазы от времени, продолжительности стадии нуклеации, а также числа образующихся в процессе центров кристаллизации от переохлаждения расплава в широком диапазоне чисел Стефана.

Фазовые переходы первого рода происходят путем флуктуационного зарождения и роста центров новой фазы. Предшествует этому создание метастабильного состояния вещества. Сам процесс фазового превращения можно условно разделить на две стадии. Первая из них – стадия нуклеации, на которой образуется основное количество устойчиво растущих центров новой фазы, как правило, скоротечна в масштабах характерного времени всего фазового превращения. И если начало стадии нуклеации вызвано действием факторов, создающих метастабильность, то ее окончание обусловлено снижением степени метастабильности в результате образования и роста новой фазы. Вторая, наиболее длительная, стадия фазового перехода происходит за счет дальнейшего роста образовавшихся на начальной стадии зародышей при практически неизменном их количестве. Наибольший интерес и наибольшую сложность при изучении фазовых переходов представляет стадия нуклеации. Здесь тесно переплетаются вопросы термодинамики малых систем, кинетики нуклеации зародышей новой фазы и механизма их роста в широком диапазоне пересыщений [1], корректного учета эффекта коллективного влияния ансамбля растущих зародышей новой фазы на состояние исходной метастабильной фазы [2] и т. д. Исследованию всех этих вопросов применительно к задаче об объемной кристаллизации переохлажденного расплава и посвящена настоящая работа.

В работе рассмотрен процесс роста одиночного кристалла в переохлажденном расплаве. На основе найденного ранее аналитического решения задачи [1] получена аналитическая зависимость для времени выхода на тепловую стадию роста, а также аппроксимационная зависимость для коэффициента пропорциональности в законе роста кристалла на тепловой стадии от переохлаждения расплава в широком диапазоне чисел Стефана.

Сформулирована модель объемной кристаллизации переохлажденного расплава, корректно учитывающая изменение степени метастабильности материнской фазы в процессе зарождения и роста центров новой фазы. Модель может быть использована как для гомогенного, так и для гетерогенного зарождения. В случае охлаждения расплава с конечной скоростью показано, что переохлаждение, при котором начинается

© Чернов А. А., 2025

нуклеация, существенно зависит от скорости охлаждения расплава, а также от объема, где ожидается появление зародышей кристаллизации. Продемонстрировано, что для малых объемов и больших скоростей охлаждения гомогенная нуклеация превалирует над гетерогенной.

Показано, что на стадии нуклеации можно выделить два принципиально различных сценария протекания фазового превращения. В первом сценарии, реализующемся при больших переохлаждениях, время стадии нуклеации много меньше времени выхода на тепловую стадию роста кристалла. В данном случае кристаллы на протяжении всего процесса растут в неравновесном режиме, температурное поле в расплаве практически однородно, а окончание стадии нуклеации определяется интегральным уменьшением переохлаждения расплава вследствие выделения скрытой теплоты фазового перехода.

Во втором сценарии, реализующемся при умеренных и малых переохлаждениях, время стадии нуклеации много больше времени выхода на тепловую стадию роста кристалла. В данном случае кристаллы на протяжении всего времени растут в равновесном режиме, вокруг кристаллов формируются квазистационарные температурные погранслои, температурное поле в объеме расплава при этом существенно неоднородно. Чтобы учесть этот факт, в работе используется подход, предложенный в [2; 3]. Надо отметить, что подобный подход применяется и для других физических систем, где протекает интенсивный фазовый переход (например, [4; 5]). Данный подход заключается в следующем. В уравнениях, описывающих процесс суммарной кристаллизации, тепловыделение учитывается посредством выделения в объеме кристаллизующегося расплава «исключенного» объема, нуклеации новых зародышей в котором не происходит. Окончание стадии нуклеации в данном случае определяется трансформацией большей доли объема расплава в «исключенный».

В результате получены простые инженерные зависимости для длительности стадии нуклеации, числа образующихся в процессе центров кристаллизации (которое определяет средний размер зерна затвердевшего материала) от переохлаждения расплава, достигнутого либо в случае мгновенного охлаждения, либо охлаждения с конечной скоростью, а также зависимость доли кристаллической фазы от времени. Полученные зависимости могут быть использованы при моделировании кристаллизации малых объемов расплавов металлов при их сверхбыстрой закалке из жидкого состояния в различных технологических процессах.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт с ИТ СО РАН).

Список источников

1. Chernov A. A., Pil'nik A. A. Mechanism of Growth of a Crystalline Nucleus in a Supercooled Melt at Large Deviations from Equilibrium // JETP Letters. 2015. Vol. 102 (8). Pp. 526–529.

2. Chernov A. A. Theory of volumetric crystallization of the undercooled melt // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52 (13-14). Pp. 3290–3296.

3. Chernov A. A., Pil’nik A. A., Islamov D. R. Initial stage of nucleation-mediated crystallization of a supercooled melt // Journal of Crystal Growth. 2006. Vol. 450. Pp. 45–49.

4. 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 26. 2014. Vol. 11. Pp. 116602.

5. Kuchma A. E., Shchekin A. K., Bulgakov M. Yu. The theory of degassing and swelling of a supersaturated-by-gas solution // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 468. Pp. 228–237.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

А. А. Чернова

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
426069, Российская Федерация, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7
** alicaaa@gmail.com*

Рассматриваются вопросы оценки величины удаления границ расчетной области от обтекаемых объектов простой формы при решении задач аэродинамики, а именно аэродинамики ближнего следа, в многофазных средах в рамках эйлерового подхода. Приводятся результаты анализа сеточной сходимости. Работа направлена на обобщение особенностей построения и декомпозиции расчетной области с учетом разрешения ближнего следа в многофазных средах.

Обтекание тел различной геометрии многофазным потоком сопряжено с формированием вихревого следа за обтекаемым объектом и взаимовлиянием движущихся в несущем газовом потоке полидисперсных жидких и твердых частиц как на динамику потока, так и на обтекаемое тело. Взаимодействия гетерогенных частиц между собой, со спутным потоком газа и обтекаемым телом могут проявляться в виде явлений фазовых переходов, нарушения сплошности среды и, как следствие, в виде изменения характера обтекания тела и его аэродинамических характеристик. При этом воздух представляет собой аэровзвесь с полидисперсными включениями жидких и твердых частиц различной природы. Совокупность вышеизложенных факторов приводит к существенной математической сложности описания таких процессов в сопряженной, полной постановке и, как следствие, к высокой вычислительной трудоемкости при численном моделировании. Вследствие чего вопросы исследования процессов аэродинамики многофазных сред имеют высокую актуальность, а вопросы аэродинамики ближнего следа в многофазных средах характеризуются также значительной практической важностью. Настоящая работа направлена на формирование подхода к численному моделированию аэродинамики ближнего следа в многофазных средах.

Необходимо отметить, что корректное математическое моделирование физических процессов любой природы требует учета особенностей данного процесса при построении допущений, расчетной области, а также формирования начальных и граничных условий. Известно, что корректное моделирование процесса обтекания потоком жидкости/газа некоторого твердого непроницаемого предмета требует обязательного увеличения расчетной области на расстояние не менее 1 характерного размера обтекаемого тела в направлениях, нормальных к вектору скорости потока, а более чем в 1,5 характерного размера в направлениях по потоку и против потока. Известно достаточное количество работ, содержащих рекомендации по размерам расчетных областей для корректного моделирования однофазной аэродинамики в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса. Однако применение данных рекомендаций к построению расчетной области для аэродинамики многофазных сред не корректно, поскольку динамика отдельных дисперсных включений и ее влияние на ближний след остаются не исследованными.

Рассматривается плоская задача об обтекании потоком двухфазной среды (двухфазная аэровзвесь (капли воды в потоке воздуха) с фиксированным размером дисперсной фазы на границе подачи) тел простой геометрии (куб, цилиндр) с целью оценки корректного удаления границ расчетной области от поверхности обтекаемого тела. За-

© Чернова А. А., 2025

дача решается в рамках Эйлерового подхода, с применением метода VOF [1]. Расчетная область представляет собой параллелепипед, внутри которого расположено обтекаемое тело. Шероховатость тела не учитывается, процессы теплопередачи не рассматриваются. Таким образом, поставленная задача может быть описана системой уравнений Навье – Стокса с добавлением уравнения концентрации и соответствующих фазам уравнений состояния. Граничные условия определены следующим образом: на непроницаемых стенках использовалось условие прилипания и непротекания, во входном сечении был задан массовый расход и концентрации фаз в потоке, на боковых границах (плоскостях симметрии) задавалось условие симметрии, на входной, верхней и нижней границах использовались неотражающие граничные условия. Скорости потока двухфазной среды соответствовали ламинарному режиму.

Решение строилось с помощью модуля *multiphaseEulerFoam*, входящего в состав open sours пакета *openFoam*. Расчетная сетка для конечно-объемной дискретизации состояла из шестигранников и имела продольное и поперечное сгущение в области обтекаемого тела. Количество элементов сетки оценивалось через требуемое количество ячеек по высоте (диаметру) обтекаемого тела, на основании анализа сеточной сходимости. Решение строилось с применением методов контрольного объема для дискретизации исходных уравнений по пространству и Эйлера – для разрешения уравнений во времени, линейной семы Гаусса для градиентов, по времени и по пространству в *openFoam*. Дискретизация конвективных слагаемых по пространству производится схемой Ван Лира второго порядка точности. Реконструкция потоков на гранях ячеек производится с использованием схемы TVD с ограничением градиентов [2], в которой аппроксимация строится на основе центральных разностей, а в качестве ограничителя используется функция Ван Лира *minmod* [3]. Полученная система алгебраических уравнений решается численно методом сопряженных градиентов с неполным диагональным предобусловливателем Холецкого.

В результате численного моделирования получены поля распределения в рассматриваемой области давления аэровзвеси (до и после обтекаемого тела, в т. ч. в ближнем следе), поля скоростей фаз и распределения концентраций фаз по области во времени. Построены коэффициенты сопротивления рассматриваемых тел. Анализ изменения коэффициентов сопротивления и концентрационных характеристик во времени позволил оценить период установления течения за обтекаемым следом как 15–71 с.

На основании анализа чувствительности коэффициентов сопротивления к размерам расчетной области (до, после и над обтекаемым телом) определены корректные размеры расчетной области для рассматриваемых тел – куба и цилиндра. Для сферы размеры области рекомендовано принять по цилиндру. Оценка разброса дисперсности жидкой фазы в ближнем следе позволила ввести дополнительный параметр оценки сеточной сходимости. Таким образом, показано и рекомендовано для построения анализа сеточной сходимости в задачах аэродинамики ближнего следа многофазных сред в качестве критерия использовать комплекс параметров, а именно: коэффициент отклонения для полей концентрации, относительный разброс дисперсного размера фазовых включений (вода, пыль и т. д.) в сочетании с чувствительностью коэффициента лобового сопротивления относительно количества элементов сетки для разрешения обтекаемого тела.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00067 (https://rscf.ru/project/25-21-00067).

Список источников

1. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. Vol. 39, no. 1. Pp. 201–225.

2. Toro E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: A practical introduction. 3rd ed. Berlin: Springer, 2009. 724 pp

3. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme: 3. Upstream-centered finitedifference schemes for ideal compressible flow // J. Comput. Phys. 1977. Vol. 23, no. 3. Pp. 263–275.

Секция 3
Экология и безопасность

ДИРИЖАБЛЬ С ЦИКЛОИДАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ – ПРОАКТИВНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ

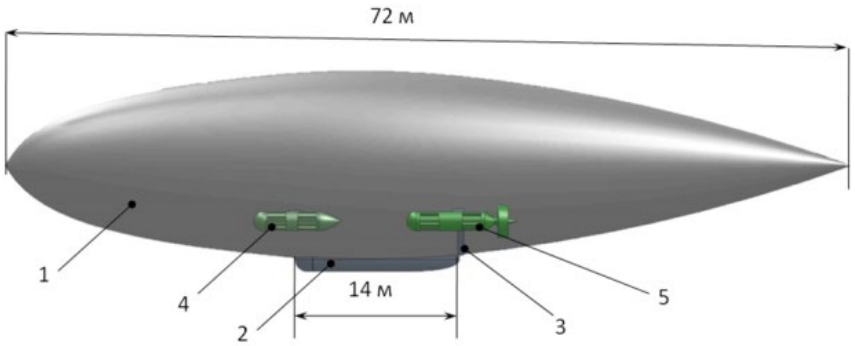
И. С. Ким[1*], А. А. Дектерев[1], И. Д. Зверков[2], Д. А. Дектерев[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1
** kim@itp.nsc.ru*

В последние годы вновь повысился интерес к дирижаблям как альтернативным летательным аппаратам. Появление новых материалов и систем автоматического управления полетом, повышение уровня достоверности метеорологических прогнозов позволяют надеяться, что современные дирижабельные системы смогут найти свою нишу при освоении воздушного пространства. В статье предлагается использование циклоидальных (циклороторных) движителей для решения задачи управления дирижаблями для стабилизации в воздушном потоке и на инверсионных скоростях вплоть до нулевых вблизи земной поверхности при стоянке, взлете и посадке, а также для аэродинамической балластировки дирижабля.

Основными проблемами при эксплуатации дирижаблей является движение на инверсионных скоростях, при котором резко ухудшается управляемость и устойчивость, а также сильная зависимость от ветровых порывов, что особенно актуально вблизи земной поверхности при взлете, посадке и в процессе погрузочно-разгрузочных работ. В мире сделаны попытки решить эту проблему с использованием циклоидальных роторов, как основных пропульсивных движителей [1–3], но эти работы не имели значимого успеха.

В Институте теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН предложена и запатентована конструкция дирижабля с циклическими движителями, оси вращения которых расположены не поперек, как в предыдущих исследованиях, а вдоль фюзеляжа дирижабля (рис. 1), что позволяет эффективно создавать поперечную тягу в широком диапазоне углов, практически от 0° до 360°.



1-мягкая оболочка с датчиками давления на поверхности. 2- грузовая кабина.3- балки крепления обшивки и силовых установок. 4- четырёхвекторная пропульсивная установка. 5 –шестивекторная пропульсивная установка

Рис. 1. Дирижабль с циклическими движителями

© Ким И. С., Дектерев А. А., Зверков И. Д., Дектерев Д. А., 2025

Система создания тяги для управления дирижаблем состоит из четырех постов (рис. 1), оптимизированных исходя из соотношения динамических и аэродинамических сил, при осуществлении маневров стабилизации, учитывая полную и частичную загрузку дирижабля и его размерности. На задних постах устанавливаются шестивекторные пропульсивные установки (рис. 2), которые состоят из двух циклоидальных движителей *2*, расположенных друг за другом и позволяющих независимо менять вектор тяги, и воздушного винта *4*. На передних постах устанавливаются четырехвекторные пропульсивные установки, в задачи которых входят только поперечные маневры дирижабля. Четыре поста могут создавать вертикальную тягу, что дает возможность обеспечить точное позиционирование дирижабля вблизи земной поверхности при взлете и посадке.

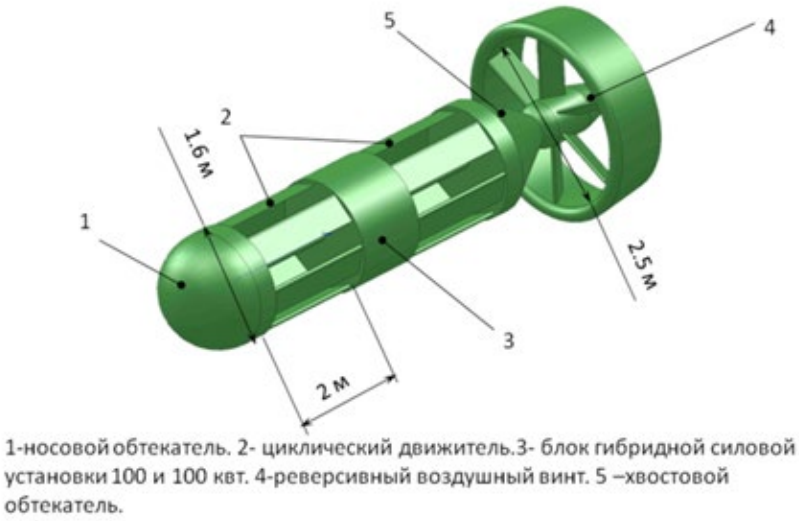


Рис. 2. Шестивекторная пропульсивная силовая установка

Применение на дирижаблях циклоидальных движителей, обеспечивающих уверенное маневрирование по курсу, тангажу и в некоторых пределах по крену, позволяет создавать проактивные автономные платформы для мониторинга окружающей обстановки. Автоматическая система управления (АСУ) дирижабля, оснащенная датчиками, расположенными на внешней стороне оболочки дирижабля, передающими реальные показания давления воздуха на участок оболочки в блок обработки информации АСУ с элементами искусственного интеллекта (ИИ), позволяет осуществлять выбор режима полета и маневрирования. Такая система обучаема на оперативный анализ взаимодействия оболочки дирижабля с окружающим воздухом и выдачу команд на силовые установки для совершения маневров с целью занятия оптимального положения для снижения сопротивления, парирования ветра и других возмущений окружающей воздушной среды в полете, на этапах взлета и посадки, а также при временной стоянке на необорудованных посадочных площадках.

Достигается это за счет уникальных возможностей системы:

– регулировать угол атаки лопастей в разных фазах вращения, генерируя тягу в любом направлении без поворота самого движителя;

– за счет асимметричной работы движителей ориентировать и направлять дирижабль в нужную сторону, перераспределением тяги оперативно компенсируя боковой ветер, сдвиги ветра и прочие возмущения;

– отказаться от применения развитых рулевых поверхностей и поворотных гондол движителей.

Создание проактивной платформы воздушного базирования, оперирующей предсказательными моделями управления, на основе дирижабля с циклоидальными (циклороторными) движителями позволит сделать воздушное судно, использующее аэростатические принципы полета, безопасным и эффективным в эксплуатации.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Список источников

1. Roy P. Gibbens, “Improvements in Airship Control Using Vertical Axis Propellers,” AIAA’s 3rd Annual Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, 17–19 November 2003:

2. Trancossi M., Dumas A., Xisto C., Pascoa J. et al. Roto-Cycloid Propelled Airship Dimensioning and Energetic Equilibrium, *SAE Technical Paper* 2014-01-2107, 2014, doi:10.4271/2014-01-2107.

3. Hirohito Nozaki, Yuya Sekiguchi, Kazuo Matsuuchi Research and Development on Cycloidal Propellers for Airships. 18th AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference
 4–7 May 2009, Seattle, Washington.

ВЛИЯНИЕ СНЕГА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРЕСНОГО ВОДОЕМА

Е. Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
ven@icm.krasn.ru

На основе вычислительного моделирования оценено влияние высоты снежного покрова на динамику льдообразования с учетом комплекса основных метеорологических факторов. Определена зависимость максимальной толщины слоя льда от высоты снежного покрова. Результаты анализа могут быть полезны для оценки безопасности хозяйственной деятельности на водоемах в холодное время года.

Во многих регионах ледовые переправы и зимники обеспечивают доступ к удаленным населенным пунктам, обеспечивая грузовое снабжение и транспортировку людей в холодное время года. Для безопасности использования ледовых переправ и других хозяйственных объектов необходимо прогнозирование состояния ледяного покрова и оценка его прочности. Эти характеристики ледяного покрова зависят как от метеорологических условий, так и толщины снега. Настоящая работа посвящена вычислительному моделированию состояния ледяного покрова при наличии снега на его поверхности.

Моделирование динамики ледяного покрова водоема проведено на основе численного решения задачи Стефана в обобщенной формулировке [1–3], когда теплота фазового перехода учитывается в величине эффективной теплоемкости среды

$$c_s(z)\rho(z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + q_v(z),$$

здесь c_s, ρ – удельная эффективная теплоемкость и плотность среды; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; t – время; z – координата, направленная вертикально вниз от поверхности водоема; q_v – мощность объемного источника теплоты, связанного с поглощением потока солнечного излучения.

Неоднородность c_s, ρ и λ вызвана наличием фазового перехода и различием теплофизических свойств воды, льда и снега. Уравнение теплопроводности дополнено граничным условием на верхней границе водоема

$$\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_T T\right]_{z=0} = q\big|_{z=0},$$

которое позволяет учитывать теплообмен с окружающим воздухом с помощью коэффициента теплоотдачи α_T, величина q включает в себя тепловые потоки, обусловленные собственным излучением водоема, тепловым излучением атмосферы и испарением.

Интенсивность теплообмена поверхности водоема зависит от температуры воздуха, толщины и состояния слоя снега, интенсивности радиационного потока, теплофизических свойств воды, льда и снега, скорости ветра и состояния поверхности водоема. Климатические условия при моделировании учитывались в виде среднесуточных значений температуры, влажности, скорости ветра и мощности солнечного излучения. Расчеты проведены применительно к озеру Бугач (широта 56.04, долгота 92.44), при

© Васильев Е. Н., 2025

этом использованы климатические данные холодного периода (октябрь 2022 г. – апрель 2023 г.) метеостанции, которая находится вблизи данного водоема.

Температурный режим водоема и динамика ледяного покрова определяется балансом тепловых потоков, который в значительной степени зависит от наличия снега и его толщины d_s. Рассчитанные временные зависимости толщины льда $d_i(t)$ для трех значений d_s отображены на рис. 1, численные значения на графиках указывают высоту снежного покрова в сантиметрах. Из сравнения графиков видно существенное влияние высоты снежного покрова на динамику льдообразования. Более быстрое таяние ледяного покрова в весенний период при отсутствии снега обусловлено значительно большей мощностью солнечной радиации, проникающей в слои льда и воды.

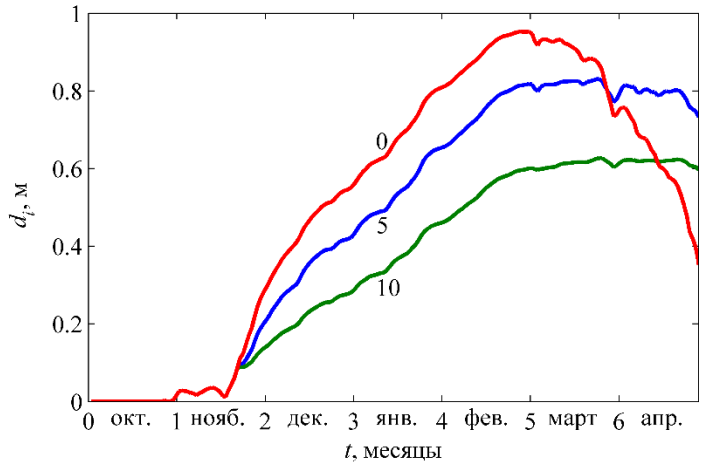


Рис. 1. Динамика ледяного покрова для заданных толщины снега d_s (указаны в сантиметрах)

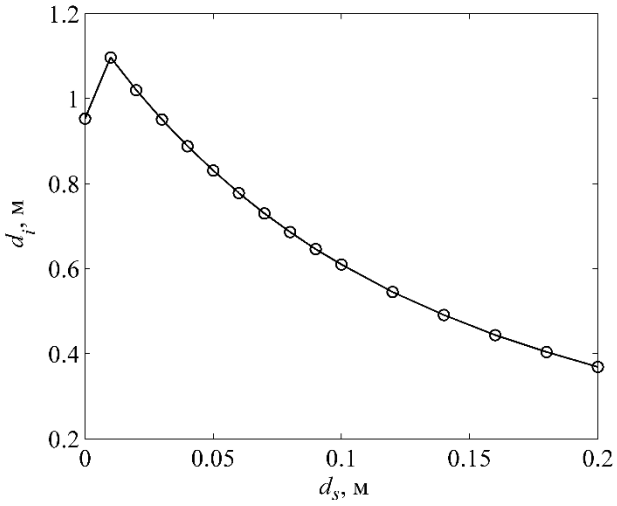


Рис. 2. Зависимость максимальных значений толщины льда от высоты снежного покрова

Представленные на рис. 1 зависимости $d_i(t)$ имеют максимумы, величина которых зависит от высоты слоя снега d_s. Рассчитанные значения максимальных значений d_i для различных толщин снежного покрова отображены на рис. 2. Наибольшие значения d_i соответствуют малым значениям высоты снежного покрова, в этом случае из-за низкого термического сопротивления слоя снега отвод теплоты во внешнюю среду максимален, а поступление солнечного излучения минимально вследствие высокой степени его отражения от поверхности снега. При увеличении высоты снежного покрова его термическое сопротивление возрастает, и связанное с этим уменьшение отводимого

во внешнюю среду теплового потока приводит к замедлению нарастания слоя льда. Результаты моделирования температурного режима и динамики льдообразования могут быть использованы для определения несущей способности ледяного покрова и оценки безопасности хозяйственной деятельности на водоемах.

Список источников

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

2. Васильев Е. Н., Макаров Д. С., Сорокин А. В. Моделирование динамики ледовых покровов и ГНСС рефлектометрия в мониторинге состояния льда // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. № 15 (2). С. 261–271.

3. Vasil'ev E. N. Modeling of the Ice Cover Dynamics of a Freshwater Reservoir, J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., Vol. 15(6), pp. 753–762, 2022

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ НА ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

В. З. Горина, А. Д. Гардер*,
Н. Д. Вилисов, А. Р. Богомолов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва
650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
** 212a03@kuzstu.ru*

Представлены результаты экспериментальных и численных исследований по выходу и свойствам пиролизной жидкости, твердому углеродистому остатку и содержанию летучих веществ в результате термического разложения резинотехнических отходов в цилиндрическом реакторе с неподвижным плотным слоем со скоростью нагрева 10–12 °С и выдержкой при температурах 550–700 °С. Определены компонентные составы и времена задержки зажигания полученных фракций, их можно использовать как добавку к традиционному топливу или в химической отрасли.

В данной работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований по выходу и свойствам пиролизной жидкости, твердому углеродистому остатку и содержанию летучих веществ в результате термического разложения резинотехнических отходов в цилиндрическом реакторе с неподвижным плотным слоем со скоростью нагрева 10–12 °С и выдержкой при температурах процесса 550, 600, 650 и 700 °С. Время выдержки определялось началом выделения летучих веществ и окончанием их выхода. Начало выхода летучих веществ контролировали и измеряли барабанным счетчиком БН-400 и перистальтическим насосом, с помощью которого часть газа подавали на газоанализатор «Тест-1». Образование пиролизного газа начиналось при достижении температуры в реакторе 300 °С. Гранулят резиновой крошки имел следующие диапазоны размеров: 0–1; 1–3; 2–3,5 и 2–4 мм. При охлаждении высокомолекулярная часть пиролизного газа конденсировалась в пиролизную жидкость по массе в материальном балансе более 40 %.

В связи с тем, что время выдержки проведения пиролиза было различным в зависимости от размера гранулята и температуры процесса по времени выдержки, балансовые составляющие образованных газообразных и жидких продуктов, а также твердого остатка были отнесены к времени выдержки процесса пиролиза. Таким образом, мы имеем данные по скорости образования веществ, состоящих из трех фаз для каждого размера гранулята при различных температурах процесса пиролиза. По известному объему и составу газа определяли плотность газовой смеси при нормальных условиях и проводили пересчет на массу. Результаты повторяющихся опытов по выходу продуктов пиролиза при одинаковых температурных условиях для каждого гранулята подвергали усреднению. Представлены наиболее характерные графики по скорости образования продуктов пиролиза в зависимости от температуры процесса для двух размеров гранулята 0–1 и 2–4 мм (рис. 1, *а*, *б*).

Из рис. 1 видно, что для двух размерных диапазонов частиц резиновой крошки происходит увеличение производительности образования трех фаз с повышением температуры процесса пиролиза. Интенсивность роста образования газовой фазы незначительна для представленных частиц, а кривые темпа роста выхода жидкой фазы и твердого остатка (рис. 1, *а*) проходят эквидистантно при повышении температуры от 550 до 700 °С, возрастают для крошки 0–1 и 2–4 мм в 4 и 2,5 раза соответственно. Для гранулята 2–4 мм (рис. 1, *б*) имеет место тождество темпов роста производительности вы-

© Горина В. З., Гардер А. Д., Вилисов Н. Д., Богомолов А. Р., 2025

хода жидкой и твердой фазы, что составляет прирост производительности почти в 5 раз.

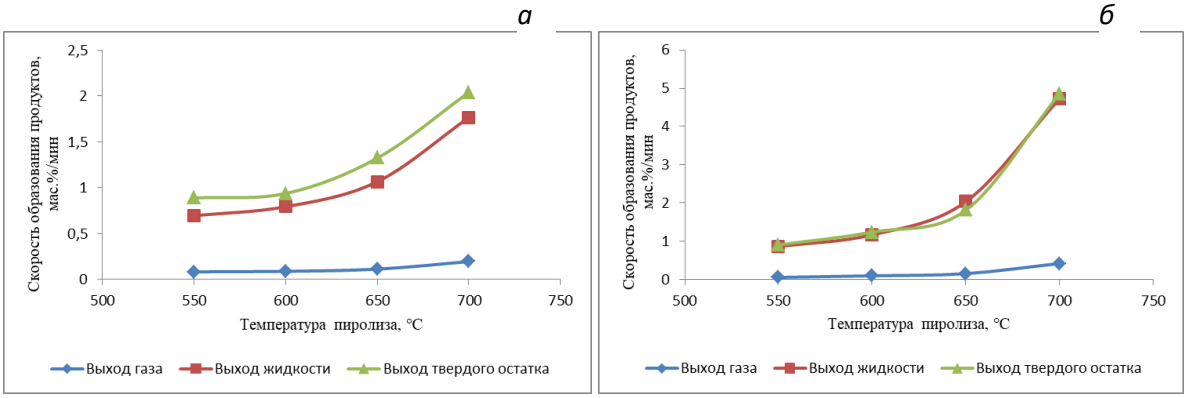


Рис. 1. Скорость образования продуктов пиролиза в зависимости от температуры процесса для гранулята: *а* – 0–1 мм; *б* – 2–4 мм

Была проведена сравнительная оценка экспериментальных данных с результатами численного моделирования процесса пиролиза в части выхода состава газовой фазы. Полученные результаты демонстрируют изменение состава выхода летучих веществ и общей потери массы твердого пористого образца в зависимости от температуры, а также качественное (твердое и газ) и количественное (по газу) согласование материальных балансов. Летучие продукты, образующиеся в результате пиролиза резинотехнических отходов крупногабаритных шин в виде гранулята, представляют собой область, где происходит движение газовой фазы летучих веществ в поровом пространстве зернистого слоя. В условиях ламинарного потока газовой фазы в структуре поровых каналов выводятся уравнения, описывающие сохранение массы, импульса и энергии [1]. Было установлено, что при температуре до 600–650 °С в анализируемом газе содержится водорода (47–64 об.%) и метана (31–45 об.%) при одновременном уменьшении двуокиси углерода и угарного газа.

Численные расчеты, которые были выполнены для условий, отражающих процесс пиролиза, исследованный в экспериментах, были основаны на предположении, что размер исходного твердого образца остается постоянным во время моделирования процесса пиролиза. Таким образом, пористость образцов измельченной шины изменялась в результате локальной реакции газообразования. Кроме того, предполагалось, что твердая фаза углеродного остатка рассматривается как часть нелетучих продуктов (твердых веществ), образующихся в процессе пиролиза. Для численного описания сопротивления неподвижного пористого слоя гранулята при движении газообразных летучих веществ используется уравнение Эргуна [2].

Наибольший выход жидких продуктов для гранулята 0–1 мм произошел при температуре 700 °С, для 1–3 мм – при 550 °С, для 2–3,5 и 2–4 мм – при 650 °С. Ограничение температуры пиролиза резиновой крошки принято 700 °С на основании данных [3], которые указывают, что с увеличением температуры до 750 °С содержание пиролизной жидкости практически не изменяется и составляет около 40 масс.%. С последующим повышением температур до 900 °С и более ароматические соединения, входящие в состав жидкого продукта, превращаются в частицы сажи.

В ходе анализа пиролизной жидкости была проведена вакуумная перегонка, в результате которой получено 9 фракций в зависимости от температур кипения при различных значениях разрежения. Теплотворная способность фракций пиролизной жидкости составила от 42 до 48 МДж/кг. Определены компонентные составы и времена

задержки зажигания полученных фракций, результаты которых показали, что их можно использовать как добавку к традиционному топливу или в химической отрасли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 (FZES-2024-0001).

Список источников

1. Rudniak L., Machniewski P. M. Modelling and experimental investigation of waste tyre pyrolysis process in a laboratory reactor. Chemical and Process Engineering. 2017. N 38 (3). P. 445–454. DOI: 10.1515/cpe-2017-0034.

2. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. Chem. Eng. Prog. 48(2). 89–94. 1952.

3. Fuentes-Cano D., Gómez-Barea A., Nilsson S., Ollero P. The influence of temperature and steam on the yields of tar and light hydrocarbon compounds during devolatilization of dried sewage sludge in a fluidized // Fuel. 2013. Vol. 108. P. 341–350.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РЕКИ ЕНИСЕЙ В ЧЕРТЕ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА В 2023–2024 ГОДАХ

В. В. Заворуев[1*], О. Э. Якубайлик[1], О. В. Соколова[2], К. В. Краснощеков[2], А. В. Дергунов[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
[2]ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
** valzav@icm.krasn.ru*

В течение двух лет осуществлялся непрерывный мониторинг температуры воды в фарватере реки Енисей, протекающей в районе центральной части города Красноярска. Установлено, что на фоне сезонной динамики существуют нерегулярные колебания температуры воды, которые наиболее выраженно проявляются в августе и сентябре.

Река Енисей в черте миллионного города Красноярска не покрывается льдом даже при сильных сибирских морозах. Это связано с конструктивными особенностями Красноярской ГЭС, которая расположена на расстоянии нескольких десятков километров выше по течению Енисея.

В некоторых модельных расчетах, посвященных изучению экологической ситуации с атмосферным воздухом в Красноярске, используется такой параметр, как температура реки Енисей. Для зимних условий применяются значения от 0 до 4 ºС. При этом не дается ссылка на научную публикацию. В данной работе представлена двухгодичная динамика температура воды в фарватере Енисея (рис. 1), протекающего в районе центральной части города.

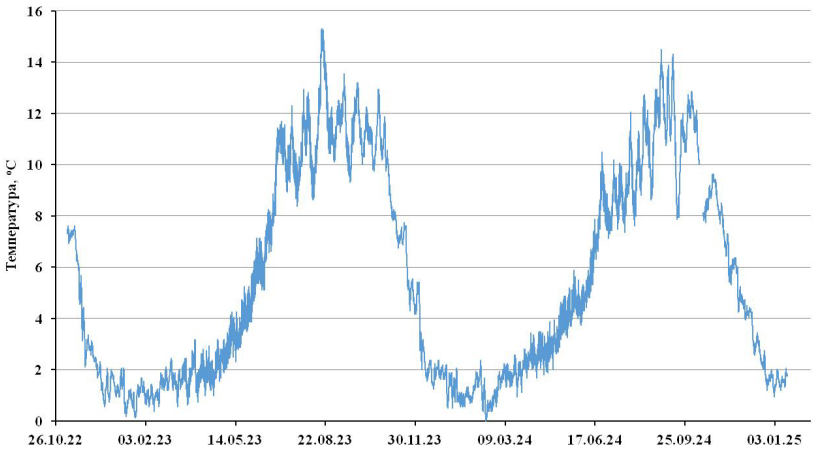


Рис. 1. Температура воды в фарватере реки Енисей в течение 2023–2024 гг.

Видно, что в течение зимнего периода (декабрь, январь, февраль) температура воды меняется почти на три градуса, достигая минимальных значений в феврале. При общем тренде к снижению температуры воды наблюдаются ее колебания с периодом от 1 до 3 суток и амплитудой до 2 ºС.

В период с 18–21 июня по 5–7 ноября температура воды понимается выше 8 ºС, достигая максимальных значений 15,25–15,31 ºС (17 августа 2023 г.) и 14,44–14,50 ºС (29 августа 2024 г.). В летне-осенний сезон наблюдаются нерегулярные колебания тем-

© Заворуев В. В., Якубайлик О. Э., Соколова О. В., Краснощеков К. В., Дергунов А. В., 2025

пературы воды с периодом 2–10 суток, максимальная амплитуда которых достигает 6,6 ºС. Причем в 2023 г. максимальная амплитуда была связана с прогревом воды, а в 2024 г. – с охлаждением.

В работе представлено сравнение двухлетних динамик температуры воды и атмосферного воздуха; оценивается влияния уровня воды в верхнем и нижнем бьефе Красноярской ГЭС на температурный режим Енисея в черте Красноярска; приведены значения среднемесячных температур воды, которые могут быть использованы в задачах моделирования атмосферных процессов в г. Красноярске.

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В 90-САНТИМЕТРОВОМ СЛОЕ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ РЕКИ ЕНИСЕЙ

В. В. Заворуев[1*], О. Э. Якубайлик[1], О. В. Соколова[2], К. В. Краснощеков[2], Т. В. Якубайлик[1], А. В. Дергунов[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
[2]ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
** valzav@icm.krasn.ru*

Исследование температуры воздуха над водной речной поверхностью позволяет изучить процессы теплообмена на границе раздела «вода – атмосфера». В работе использовалась плавающая термокоса – конструкция, состоящая из буя с закрепленными на стержне датчиками температуры. Измерения проводились в 2022–2023 гг. на реке Енисей в летний и зимний периоды. Результаты показали, что температура воды оказывает влияние на температуру воздуха в приповерхностном слое. Летом влияние температуры воды распространялось до высоты 70 см, а зимой – до 50 см. Средние значения температуры воздуха на разных высотах демонстрировали статистически достоверные различия, что подтверждает важность учета приповерхностных измерений для понимания теплообмена между водой и атмосферой.

Исследование температуры воздуха над водной речной поверхностью имеет высокую актуальность в связи с ее влиянием на климатические, экологические и гидрологические процессы.

Для изучения процесса теплообмена между водой и воздухом в приповерхностном слое атмосферы над водой, особенно при значительной разнице температур между ними, необходимы измерения температуры воздуха в непосредственной близости от поверхности воды. Подобные измерения могут быть выполнены с помощью термокосы – конструкции, состоящей из нескольких вертикально размещенных метеодатчиков (автономных дата-логгеров), которые с заданной периодичностью измеряют и записывают в свою память метеоданные (температура, влажность).

В настоящей работе использовалась «термокоса плавающая» – это «поплавок» (буй) с установленным на нем стержнем длиной около 1 м, на котором на разной высоте закреплены датчики-регистраторы температуры (дата-логгеры). «Поплавок» термокосы стальным тросом прикреплен к металлоконструкции на берегу. Измеряющие температуру дата-логгеры установлены на высотах 10, 30, 50, 70, 90 см над уровнем поверхности воды. Еще один дата-логгер, закрепленный на киле буя, измеряет температуру воды (рис. 1). Дата-логгеры ведут запись в свою память с периодичностью 1 час.

На удалении около 30 м от уреза воды на высоте около 2 м над сушей был установлен аналогичный дата-логгер. Измеренная им температура воздуха использовалась в качестве контроля (рис. 1).

Исследования температурного режима вблизи границы раздела «вода – атмосфера» осуществляли в 2022–2023 гг. В летний сезон температура енисейской воды была ниже, чем температура воздуха, но при этом они были выше 0 °С. В зимний период енисейская вода характеризовалась положительными температурами, а атмосферный воздух – отрицательными.

Распределения температуры воздуха над зеркалом воды летом и зимой представлены на рис. 2 и 3.

© Заворуев В. В., Якубайлик О. Э., Соколова О. В., Краснощеков К. В., Якубайлик Т. В., Дергунов А. В., 2025

Рис. 1. Внешний вид надводной (слева) и подводной (в центре) частей термокосы. Размещение температурного логгера над сушей (справа в красном кружке)

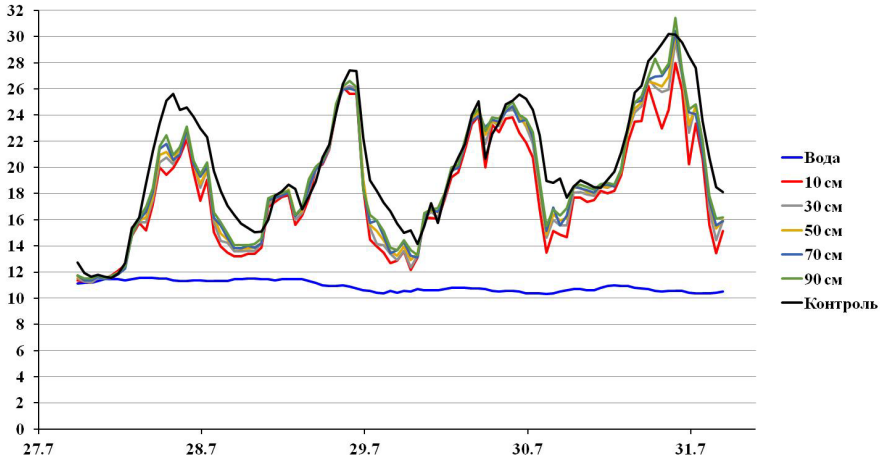


Рис. 2. Данные о температуре над зеркалом реки для летнего периода времени (27–31 июля 2022 г.)

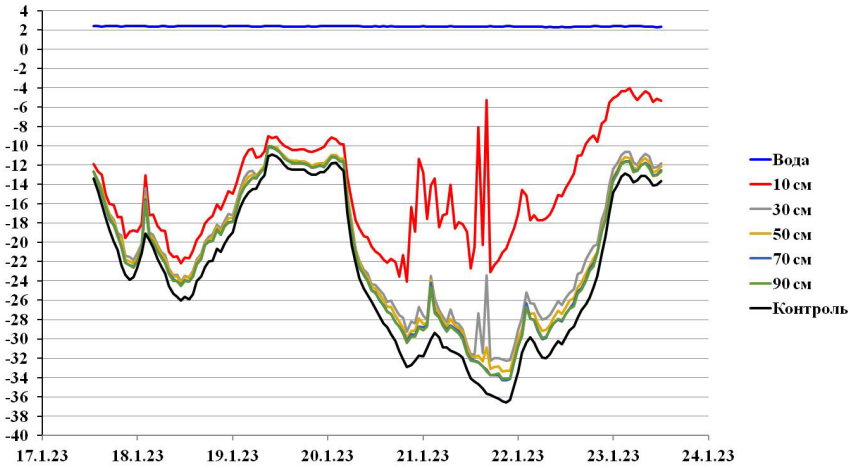


Рис. 3. Данные о температуре над зеркалом реки для зимнего периода времени (18–24 января 2023 г.)

Для данных, представленных на рис. 2 и 3, была выполнена статистическая обработка. Средние значения температур представлены в табл. 1. Видно, что чем выше положение датчика над зеркалом воды, тем меньше различие его показаний с температурой воздуха. Статистически достоверные различия в табл. 1 выделены жирным шрифтом. Видно, что летом влияние температуры реки Енисей проявляется до высоты 70 см, а зимой – до 50 см от водной поверхности.

Таблица 1

Средняя температура воздуха на различном расстоянии от поверхности воды летом (27–31 июля 2022 г.) и зимой (18–24 января 2023 г.)

Положение датчика		Лето	Зима
10 см	над водой	**18,0 ± 0,9**	**–14,6 ± 0,9**
30 см	над водой	**18,6 ± 0,9**	**–20,4 ± 1,1**
50 см	над водой	**18,8 ± 0,9**	**–20,9 ± 1,2**
70 см	над водой	**18,9 ± 0,9**	–21,3 ± 1,2
90 см	над водой	19,2 ± 0,9	–21,4 ± 1,2
200 см, контроль	над сушей	20,2 ± 1,0	–23,0 ± 1,3

Таким образом, полученные данные наглядно демонстрируют, что влияние температуры воды реки Енисей проявляется на высотах до 50 см от границы раздела «вода – атмосфера» при морозах около 40 °С, а летом – на высотах до 70 см при температурах воздуха до 30 °С.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОРБЕНТОВ ОТ СОВОКУПНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОВЫХ КАНАЛОВ

А. Б. Кузнецов*, К. Ю. Ушаков, А. Р. Богомолов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, д. 28.
** Shpala_04@mail.ru*

В работе исследованы зависимости сорбционной способности получаемых карбонизатов от состава функциональных групп на поверхности сырья, из которого они изготовлены, – углей различной степени метаморфизма. Показано, что при увеличении содержания метильных групп наблюдается снижение сорбционной активности по йоду, а при увеличении содержания гидроксильных групп – по метиленовому голубому.

Уголь является одним из основных энергетических ресурсов, около трети тепловой генерации приходится на угольные станции. Однако, ввиду ряда причин, сложившихся в мировой энергетике, в настоящий момент наблюдается тенденция к снижению востребованности данного сырья в качестве топлива, что оказывает негативное влияние на благосостояние угледобывающих регионов, в частности Кемеровской области – Кузбасса. В связи с чем появляется необходимость применения угля в качестве неэнергетического ресурса. Одним из способов решения данной проблемы является получение углеродных сорбентов на основе каменноугольного сырья. При апробации характеристик сорбентов, полученных по технологии паровой активации [1], было выявлено, что получаемые характеристики удельной поверхности сорбентов и их сорбционная активность по метиленовому голубому/йоду не коррелируют между собой, вместо ожидаемых пропорциональных зависимостей. В результате возникла гипотеза: сорбционная активность сорбента зависит от состава функциональных групп, находящихся на поверхности поровых каналов активированного карбонизата.

В качестве исходного сырья рассматривались угли марок «Д», «ДГ», «Т», бурые угли (Итатский «БИ» и месторождения респ. Хакасия «БХ»). Технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики исходных образцов углей

Образец	Элементный анализ			Технический анализ		
	C, %	H, %	N + S + O, %	A^d, %	W^a, %	V^a, %
«Д»	68,33	4,38	27,29	15,36	5,53	35,9
«ДГ»	70,18	4,79	25,03	12,07	4,67	33,1
«БИ»	80,48	6,26	13,26	15,8	12,1	40,6
«БХ»	65,78	5,43	28,79	11,5	25,1	41,2
«Т»	88,05	3,41	8,54	2,29	3,21	10,34

В результате исследования были получены и проанализированы ИКПФ-спектры представленных образцов (табл. 2). При анализе для унификации значений интенсивностей поглощения углей различных марок применялся коэффициент относительной интенсивности k_{oi} (1).

$$k_{oi} = \frac{i}{i_b}, \quad (1)$$

© Кузнецов А. Б., Ушаков К. Ю., Богомолов А. Р., 2025

где k_{oi} – коэффициент относительной интенсивности; i – интенсивность исследуемой группы; i_b – интенсивность базовой группы. В качестве базовой была выбрана C = C группа.

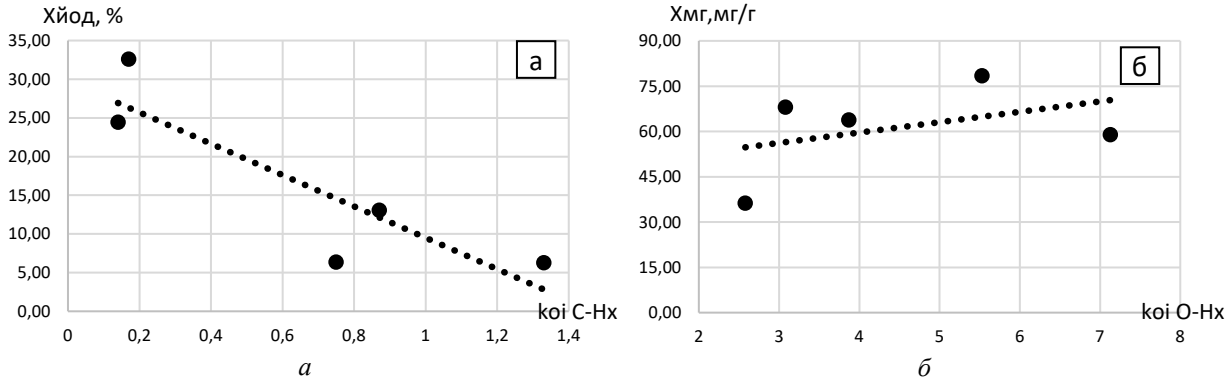
Для изучения и сопоставления сорбционных характеристик образцов был получен карбонизат путем удаления летучих веществ, его паровая активация и испытание сорбционной активности по метиленовому голубому, йоду и по нефтепродуктам (дизельное топливо).

Таблица 2

Значения коэффициента относительной интенсивности групп

Образец / Группа	Д	ДГ	БИ	БХ	Т
H-O-H	0,15	0,05	0,09	0,11	0,32
O-H	6,98	3,82	2,49	5,42	2,76
C-H$_x$	0,87	0,75	0,17	0,14	1,33
C-O	0,47	0,45	0,60	0,58	1,97
C-O-C	0,23	0,21	0,35	0,86	2,19
C-C	0,08	0,17	0,13	0,26	1,02
минералы	0,15	0,14	0,10	0,10	1,69
C=C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

На рис. 1 представлены полученные зависимости сорбционных свойств сорбентов после активации исследуемых марок углей от состава функциональных групп на поверхности поровых каналов.



а *б*

Рис. 1. Зависимость сорбционной активности: *а* – по йоду от содержания метильных групп; *б* – по метиленовому голубому от содержания гидроксильных групп

В результате сопоставления сорбционных характеристик сорбентов, полученных методом паровой активации карбонизата из каменноугольного сырья различных марок, по составу функциональных групп на поверхности их поровых каналов, были получены следующие зависимости:

– при увеличении содержания метильных (C-H$_x$) групп наблюдается снижение сорбционной активности по йоду (рис. 1, *а*);

– при увеличении содержания гидроксильных (O-H) групп наблюдается увеличение сорбционной активности по метиленовому голубому (рис. 1, *б*).

Полученные данные являются основой дальнейшего исследования о влиянии марки исходного сырья на характеристики сорбентов, полученных на его основе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 (FZES-2024-0001).

Список источников

1. Шевырев С. А., Азиханов С. С., Богомолов А. Р., Кузнецов А. Б. Перспективы получения углеродных сорбентов из углей марок Д и ДГ // Теплоэнергетика. 2024. № 3. С. 63–71. DOI 10.56304/S0040363624030081

ТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ НЕФТЕРАЗЛИВОВ

Т. А. Кулагина*, И. В. Кириллова, Р. В. Гурина

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** tak.sfu@gmail.com*

Красноярский край, являясь одним из регионов России с развитой лесоперерабатывающей промышленностью, накапливает значительные объемы отходов деревообработки, в частности древесные опилки. Вместе с тем в городе Красноярске есть проблема загрязнения водного объекта – реки Енисей, что требует разработки эффективных и экономически целесообразных методов очистки. В связи с этим проведена серия экспериментов, направленных на изучение возможности использования древесных опилок в качестве сорбента для удаления нефтяных загрязнений с последующей термической утилизацией отработанного материала.

Загрязнение водных объектов нефтью и нефтепродуктами (НП) представляет собой одну из наиболее серьезных экологических угроз, способную приводить к масштабным нарушениям экосистем и долгосрочным последствиям. Нефть, обладая высокой устойчивостью к естественному разложению, формирует на поверхности воды плотную гидрофобную пленку, которая блокирует газообмен и проникновение солнечного света, вызывая деградацию водных экосистем. Минимизация ущерба возможна лишь при условии своевременного и технологически обоснованного применения методов ликвидации таких загрязнений [1].

Ключевым направлением в устранении нефтяных загрязнений является применение сорбентов, среди которых выделяют синтетические (полипропилен, полиуретан), неорганические (перлит), органоминеральные (модифицированные глины) биологические (торф, углеродоокисляющие микроорганизмы). Однако многие из них обладают существенными недостатками, включая высокую стоимость, сложность утилизации или низкую эффективность. В связи с этим перспективным решением является использование отходов деревообработки – доступного и экономически выгодного материала.

В рамках исследования выполнена серия экспериментов, включающая подготовку сорбционного материала, определение нефтеемкости древесных опилок различных фракций; исследование сорбционных свойств; оценку эффективности термической утилизации отработанного сорбента. В эксперименте учувствовало три образца: 1 – опилки хвойных пород (мелкодисперсные, фракция 0,5 мм); 2 – опилки хвойных пород (крупнодисперсные, фракция 2 мм); 3 – опилки хвойных пород фракцией 2 мм, обработанные нефтяным парафином. Учитывая проведенные исследования в [2], все образцы подвергались термической активации (обработка в сушильном шкафу при температуре 100 °С в течение часа).

Нефтеемкость сорбентов – показатель, отвечающий за количество поглощаемого сорбентом НП на единицу его массы. Для определения нефтеемкости в статических условиях применялись методики, описанные в [3; 4].

В первой серии экспериментов испытуемый сорбент массой 10 г помещался в пакет из нетканого пропилена (предварительно определялась нефтеемкость пустого пакета), который затем помещали в стакан и заливали НП. По истечении времени (10 мин) пакет подвешивали к нижнему крюку весов RUNIS 6-140, значения фиксировали до постоянной массы, т. е. та, которая не изменялась в течение 3 мин. Расчет нефтеемкости определялся по формуле

©Кулагина Т. А., Кириллова И. В., Гурина Р. В., 2025

$$\text{НЕ} = \frac{m_1-(m_2+m_3)}{m_3}, \text{ г/г}, \quad (1)$$

где m_1 – масса пакета с навеской сорбента и удерживаемым НП, г; m_2 – масса пакета с учетом удерживаемого НП (холостая проба), г; m_3 – масса навески сорбента.

Во второй серии экспериментов по определению нефтеемкости испытуемый сорбент массой 10 г помещали на стекло и по каплям прибавляли нефтепродукт до полного впитывания в течение 30 с. Стекло с нефтепродуктом и сорбентом взвешивалось, затем производили расчет сорбционной емкости по формуле

$$\text{НЕ} = \frac{m_4}{m_5}, \text{ г/г}, \quad (2)$$

где m_4 – масса НП, поглощенная сорбентом, г; m_5 – масса навески сорбента, г.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по определению нефтеемкости сорбентов

№ образца	Нефтеемкость, г/г	
	по методике 1	по методике 2
1	1,641	1,620
2	2,454	2,412
3	2,271	2,214

Для подтверждения полученных значений нефтеемкости опилок были проведены эксперименты по определению сорбционных свойств отходов деревообработки в пробах, загрязненной нефтепродуктами воды с реки Енисей. Для этого опилки равномерно наносили на нефтяную пленку и выдерживали в течение 30 мин.

Из насыщенного нефтепродуктами природного сорбента в лаборатории с использованием специальных насадок-грануляторов были получены топливные пеллеты, которые исследовали на теплофизические свойства.

Полученные в процессе лабораторных опытов результаты указывают на перспективность использования древесных опилок в качестве сорбирующего материала. Их преимущества – доступность, низкая стоимость и возможность утилизации в качестве топливных пеллет.

Список источников

1. Кулагина Т. А., Дубровская О. Г., Зайцева Е. Н., Крылышкин Р. Н. Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 6. С. 46–54.

2. Филина Н. А. Исследование сорбционных свойств древесных отходов для сбора нефтепродуктов с последующей утилизацией их в виде топливных брикетов: спец. 03.02.08 Экология (в химии и нефтехимии) : дис. … канд. техн. наук. Пенза, 2011.

3. Standard Test Method for sorbent performance of adsorbents (AM F726-99).

4. ТУ 214-10942238-03-95 Методика определения нефтеемкости и влагоемкости.

ВЛИЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРИ РАБОТЕ ОТКРЫТОГО ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

В. И. Максимов*, Б. В. Борисов,
Г. В. Кузнецов, Т. А. Нагорнова, Ф. Ю. Салихов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** elf@tpu.ru*

Проведены экспериментальные и численные исследования процессов тепло- и массопереноса в локальной рабочей зоне, находящейся под влиянием газового инфракрасного излучателя светлого типа. Получены распределения концентраций CO_2 и температур в рабочих зонах с локальными ограждающими конструкциями. Исследованы закономерности температурных режимов в областях возможного размещения рабочего персонала и степеней загрязненности воздуха в рабочих зонах.

Создание оптимального микроклимата в рабочей зоне [1] остается одним из важнейших условий повышения производительности труда и продолжительности жизни рабочего персонала. Снижение потребления ресурсов возможно с использованием газовых инфракрасных излучателей открытого типа, с помощью которых можно создавать локальные тепловые зоны [2; 3], но за счет открытого горения природного газа генерируется и значительное количество антропогенных газов, в основном CO_2. Ранее [3] было установлено, что при работе ГИИ такого типа формируются обширные циркуляционные течения по всему объему помещения и антропогенные газы, выделяемые ГИИ, поступают в локальную рабочую зону, где находится работающий персонал. Ограждение локальной рабочей зоны от циркуляционных течений может привести не только к минимизации тепловых потерь рабочей зоны, но и к меньшей загрязненности воздуха в них.

Для анализа влияния ограждающих конструкций на температуру воздуха и концентрацию CO_2 в локальной рабочей зоне выбрано помещение (рис. 1) $10 \times 5 \times 4{,}4$ м с газовым инфракрасным излучателем мощностью 5 кВт, горизонтальной панелью, имитирующей оборудование, системой воздухообмена и локальным ограждением. Датчики CO_2 – двухлучевые оптические NDIR, температуры – хромель-копелевые термопары.

На рис. 2 приведены типичные значения концентраций CO_2 и температур воздуха в локальной рабочей зоне на расстоянии 20 см слева и справа от горизонтальной панели на высоте 1,3 и 1,7 м (соответствуют расположению органов дыхания для стоящего и сидящего работающего), полученных экспериментально. В результате численного моделирования (рис. 3), проведенного аналогично [3], получены поля концентраций и структура течения для рассматриваемой области.

© Максимов В. И., Борисов Б. В., Кузнецов Г. В., Нагорнова Т. А., Салихов Ф. Ю., 2025

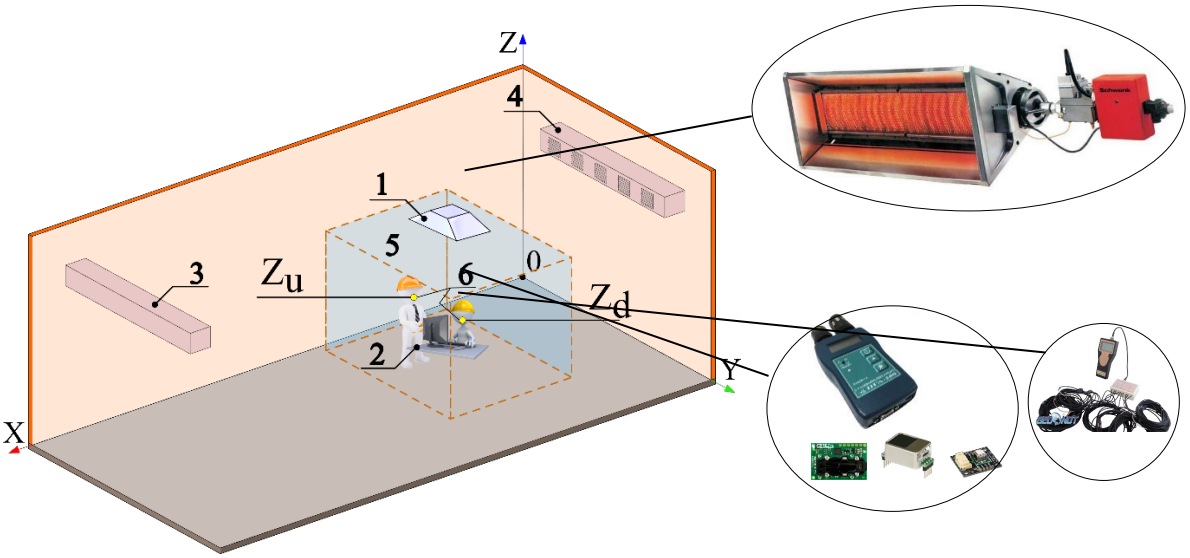
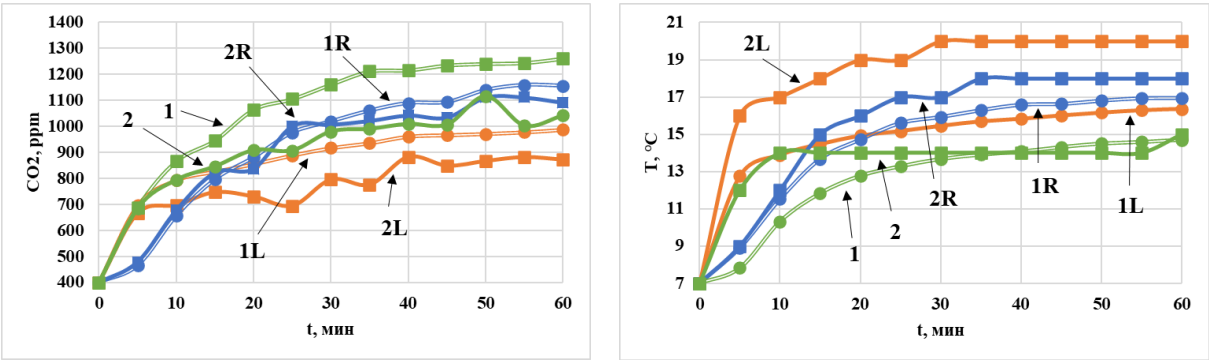


Рис. 1. Область эксперимента: *1* – ГИИ; *2* – горизонтальная панель; *3*, *4* –зоны приток и оттока воздуха; *5* – ограждающие конструкции; *6* – датчики CO_2 и температуры; Z_d, Z_u – высоты расположения датчиков CO_2 (1,3 и 1,7 м соответственно)



а б

Рис. 2. Изменение концентраций (а) и температур (б), полученных экспериментально в локальных рабочих зонах: 1R, 2R – 1,3 м и 1,75 м справа с ограждением; 1L, 2L – 1,3 м 1,75 м слева с ограждением, 1,2–1,3 м, 1,75 м по центру без ограждения

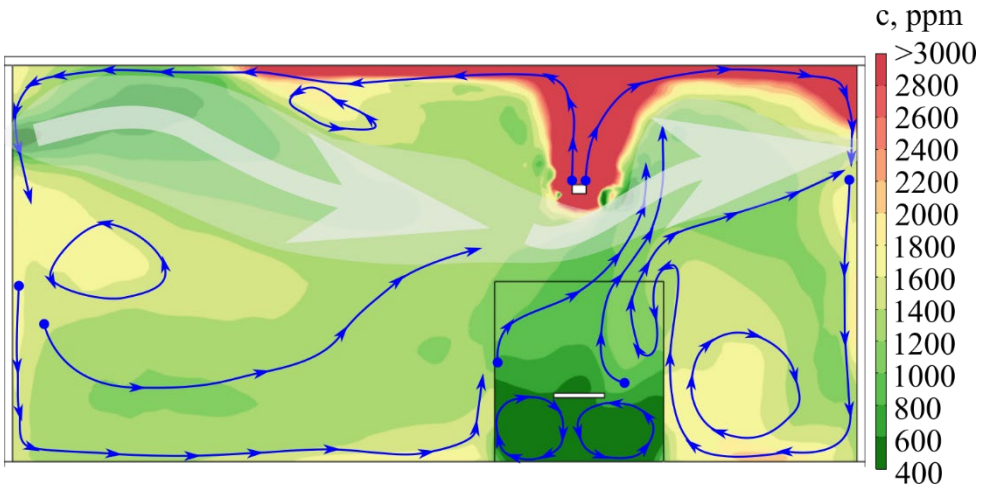


Рис. 3. Поле концентраций и структура течений, полученных в результате математического моделирования

Как показывает анализ полученных результатов, представленных на рис. 2 и 3, применение локальных ограждающих конструкций вследствие существенного изменения гидродинамики течения способствует росту максимальных температур воздуха в рабочей зоне. Работа системы воздухообмена приводит к существенно несимметричным распределениям концентраций CO_2 в локальной рабочей зоне (рис. 2, *а*; рис. 3), а их значения не превышают регламентных значений (< 1200 ppm).

Список источников

1. Karmann C., Schiavon S., Bauman F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review // Building and Environment. 2017. Vol. 111. Pp. 123–131. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.020.

2. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls // Therm. Sci. Engin. Progress. 2020. Vol. 18. URL: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100522.

3. Borisov B. V., Kuznetsov G. V., Maksimov V. I., Nagornova T. A., Salikhov F. Y. Concentration of CO_2 in the local working area during joint operation of the gas infrared heater and the air exchange system // Energies. 2024. Vol. 17 (1). P. 155. URL: https://doi.org/10.3390/en17010155.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОРБЕНТОВ ИЗ ЗОЛЫ УНОСА НА ПОГЛОЩЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

А. В. Полтавец, Е. Ю. Темникова*, М. И. Шиляев, А. Р. Богомолов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва
650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
** teu.pmahp@kuzstu.ru*

В работе исследованы сорбционные свойства золы уноса классов 0–50, 50–80 и 100–160 мкм на поглощение CO_2 из модельной газовоздушной среды. Показано, что наибольшей удельной поверхностью обладает зола уноса с классом 100–160 мкм. Определены константы фазового равновесия для золы уноса при адсорбции углекислоты в воздушно-CO_2 потоке при расходе адсорбента 2,41 г/с. Константы Генри в соответствии с увеличением класса крупности следующие: K_{50} = 1,706·10^5 Па; K_{80} = 1,429·10^5 Па; K_{160} = 2,625·10^5 Па. Результаты исследований показали, что предпочтительнее использовать в качестве адсорбента золу уноса класса 100–160 мкм.

Углекислый газ способствует возникновению парникового эффекта, приводящего к нагреванию поверхности планеты, таянию ледников, изменению климата и уровня мирового океана. Очистка дымовых газов от CO_2 является актуальной и обязательной при работе промышленных предприятий и энергетических станций. Под очисткой газа понимают отделение определенного компонента из состава смеси или превращение его в безвредную часть.

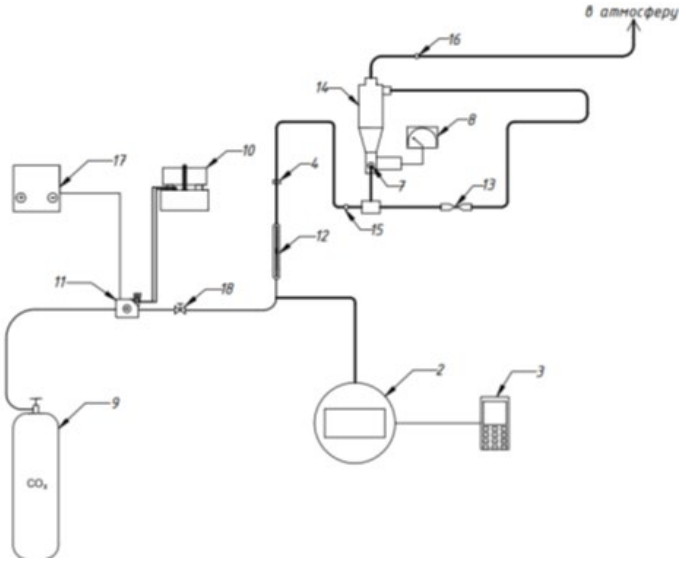


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для адсорбции СО2 на золу уноса ТЭЦ и ГРЭС
1 – трубопровод; *2* – воздуходувка; *3* – частотный преобразователь; *4* – диафрагма; *7* – спиральный дозатор; *8* –трансформатор; *9* – баллон с CO_2; *10* – термостат; *11* – редуктор; *12* – ротаметр; *13* – скруббер Вентури; *14* – циклон; *15*, *16* – газоанализаторы; *17* – электродвигатель

В данной работе исследованы сорбционные свойства золы уноса на поглощение CO_2 из модельной газовоздушной среды. В качестве сорбента использовали золу уноса Кемеровской ГРЭС сухого улавливания (К). Зола уноса имела в составе оксиды металлов. Процесс адсорбции CO_2 золой уноса в потоке газовоздушной среды проводили

© Полтавец А. В., Темникова Е. Ю., Шиляев М. И., Богомолов А. Р., 2025

на экспериментальной установке (рис. 1). Зола уноса подавалась спиральным дозатором в трубу Вентури (ТВ) и перемещалась газовоздушным потоком по кольцевому трубопроводу: ТВ – трубопровод – циклон – бункер – дозатор – ТВ. Циркуляция газовоздушной среды и золы уноса происходит до состояния насыщения адсорбента углекислым газом (равенство концентраций перед дозатором и после циклона).

Рабочий (замкнутый на циклон) транспортный участок адсорбента и модельной газовоздушной среды имел трубопровод внутренним диаметром 46,7 мм и общей длиной 7,35 м. Газовоздушная смесь подавалась с концентрацией CO_2 1,8 и 2,1 об.%. Скорость газовоздушной смеси в транспортном закольцованном канале для опытов с золой уноса классов 0–50, 50–80 и 100–160 мкм соответственно 4,41, 4,66 и 4,66 м/с. Начальная температура газовоздушной среды и температура адсорбента, инжектируемого в поток, была равна 24 °С.

Зола уноса включает в себя оксиды металлов и неметаллов и представляет собой комплексное соединение этих оксидов. Представлены (табл. 1) типичный оксидный состав золы уноса Кемеровской ГРЭС при сжигании угля марки Д и данные по текстурным характеристикам фракций 0–5, 50–80 и 100–160 мкм (табл. 2).

Видно (табл. 2), что наибольшей удельной поверхностью обладает зола уноса с классом 100–160 мкм и меньшим недожогом (потери массы при прокаливании (п.п.п.)).

Таблица 1

Типичный оксидный состав золы уноса Кемеровской ГРЭС

Окисел	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3
Содержание, масс. %	1,29	2,05	20,79	57,49	3,45	2,28	5,18	1,06	6,41

Таблица 2

Текстурные характеристики фракций

Зола Кемеровской ГРЭС	Удельная поверхность, $м^2/г$	Объем пор, $см^3/г$	Размер пор, нм	П.п.п., %
К 0–50	2,46	0,007	11,33	4,18
К 50–80	1,74	0,006	12,87	2,87
К 100–160	5,23	0,008	6,44	2,41

Представлены (рис. 2) результаты эксперимента по адсорбции CO_2 в спутном потоке золы уноса размером 50–80 и 100–160 мкм в газовоздушной смеси. Видно (рис. 2), что адсорбция CO_2 золой уноса класса 50–80 мкм продолжалась около 330 с, в то время как поглощение классом крупности 100–160 мкм закончилось через 120 с. Начало процесса характеризуется понижением концентрации углекислого газа в газовоздушной среде от начальной концентрации 1,8 % до 1,7 % и 1,6 % при разных классах крупности золы уноса. Период времени процесса адсорбции, полагаем, зависит от удельной поверхности. Видно (табл. 2), что удельная поверхность золы уноса класса 50–80 мкм значительно ниже, чем в классе 0–50 и 100–160 мкм.

Опыты по адсорбции CO_2 золой уноса класса 0–50 мкм продолжались в течение 600 с при начальной концентрации углекислоты воздушном потоке на входе 2,1 % со снижением в начальный момент на 0,2 % и до момента равенства концентраций перед дозатором и после циклона.

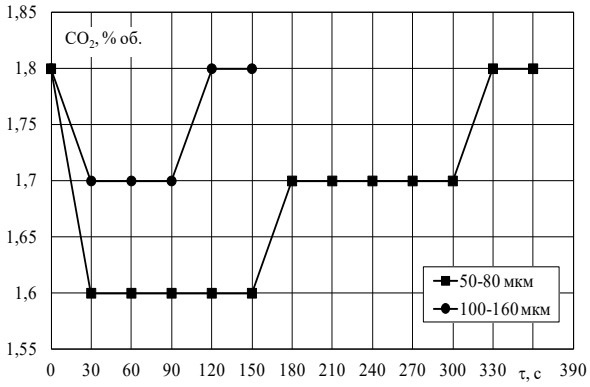


Рис. 2. Изменение во времени концентрации CO_2 в воздушно-углекислотной среде при контакте в спутном потоке с золой уноса класса 50–80 и 100–160 мкм

Определены константы фазового равновесия для золы уноса при адсорбции углекислоты в воздушно-CO_2 потоке при расходе адсорбента 2,41 г/с. Константы Генри в соответствие увеличения класса крупности следующие: $K_{50} = 1{,}706 \cdot 10^5$ Па; $K_{80} = 1{,}429 \cdot 10^5$ Па; $K_{160} = 2{,}625 \cdot 10^5$ Па. Среднее значение $1{,}8 \cdot 10^5$ Па. Этот коэффициент существенно зависит от удельной поверхности адсорбента и, соответственно, определяет адсорбционную способность. Тогда правомерно можно объяснить более низкую поглощающую способность класса 50–80 мкм и более высокую класса 100–160 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 (FZES-2024-0001).

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПОЛУНАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРЕНОСА КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ОТ МОДЕЛЬНОГО ОЧАГА ПОЖАРА

Д. П. Касымов[1], Ю. А. Лобода[1], А. В. Луценко[1*], М. В. Агафонцев[1], П. С. Мартынов[1], А. А. Старосельцева[1], Е. Л. Лобода[1], В. В. Рейно[2]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36
[2] Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН
634055, Российская Федерация, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1
** anastas_mex_mat434@mail.ru*

Экспериментально в условиях полигона проведено исследование переноса конденсированных продуктов горения и их характеристик на разной высоте и разном удалении от модельного очага пожара с применением стационарных и мобильных модулей регистрации концентрации аэрозолей. Определены максимальное расстояние и оптимальная высота измерений, где концентрация конденсированных продуктов горения превышает фоновые значения. Также зафиксированы флуктуации показателя преломления C_n^2, которые на порядок выше фоновых значений, что говорит о индуцированной пожаром турбулентности

Природные пожары являются распространенным явлением, возникающим как в результате природных причин, так и антропогенного воздействия. Нередко крупные пожары приводят к возникновению ЧС и катастрофическим последствиям для природы и человека. В последние годы частота и интенсивность возникновения природных пожаров возрастают, что связано с изменением климата и расширением антропогенных территорий. Так, по данным исследования, пожары в дикой природе приобретают все более катастрофический масштаб, разрушая целые экосистемы и значительно влияя на качество воздуха и здоровье населения [1; 2]. Исследование [3] показало, что интенсификация пожаров стала особенно заметной в последние десятилетия. И проблема, вероятно, будет лишь усугубляться. В работе [4] также подчеркивается, что увеличение площади пожаров приводит к более высоким затратам на их ликвидацию и восстановление разрушенных территорий.

Одним из поражающих факторов природных пожаров является выброс конденсированных продуктов горения в атмосферу. Тем не менее этот очевидный факт можно использовать для дистанционного обнаружения очагов пожаров на ранней стадии, когда борьба с огнем требует существенно меньших затрат. В качестве примеров обнаружения очагов пожаров можно привести как контактные способы [5], так и бесконтактные [6].

Несмотря на то, что изучением природных пожаров в мире начали заниматься уже достаточно давно, проблема моделирования механизмов распространения, прогнозирования возникновения и оценки последствий пожаров еще далека от конкретизации, которая позволила бы с уверенностью говорить о завершении этапа постановки задачи. В связи с этим ученые проводят экспериментальные исследования, в т. ч. модельные, направленные на изучение механизмов распространения природных пожаров, оценку их влияния на атмосферу в виде выброса аэрозолей, влияния на ветер и пр.

Коллективом авторов уже много лет проводятся исследования природных пожаров как в лабораторных, так и в натурных условиях [7; 8]. В настоящем докладе представлены результаты изучения модельного природного пожара. Одна из целей – иссле-

© Касымов Д. П., Лобода Ю. А., Луценко А. В., Агафонцев М. В., Мартынов П. С., Старосельцева А. А., Лобода Е. Л., Рейно В. В., 2025

дование переноса газов и аэрозолей, образующихся в результате горения, с целью создания системы обнаружения пожара по изменениям состава воздуха.

Экспериментальное исследование проходило на экспериментальном базовом комплексе (БЭК) Института оптики атмосферы [7]. Во время проведения осуществлялась регистрация мгновенных полей температур во фронте горения с использованием методов ИК-диагностики, регистрировались метеопараметры на высотах 3 и 10 м, аэрозольный состав атмосферы контролировался на различном удалении и высотах от основного источника горения с применением БПЛА. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанций (ультразвуковая метеостанция АМК-03).

При проведении эксперимента после зажигания участка было зафиксировано изменение аэрозольного состава атмосферы. После анализа полученных данных был сделан вывод, что оптимальной высотой для обнаружения пожаров по аэрозолям является высота от 10 до 20 м. При высоте измерений выше 20 м концентрация частиц падает, при высоте ниже 10 м концентрация частиц слишком низкая. На рис. 1 представлена концентрация аэрозольных частиц на высоте 20 м на разном удалении от участка.

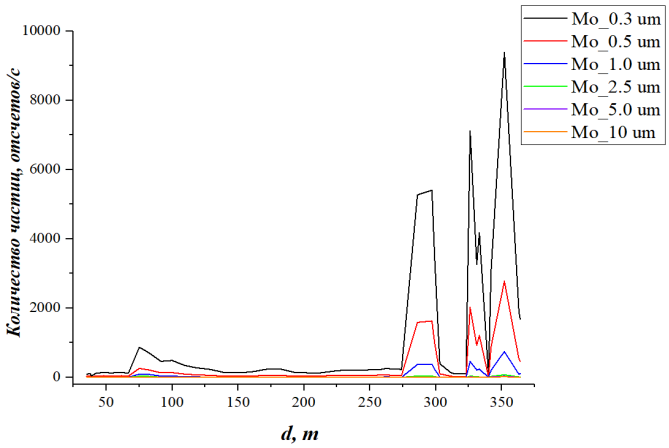


Рис. 1. Концентрация аэрозольных частиц на высоте 20 м

Встроенное программное обеспечение используемых метеостанций АМК-03 позволило получить значения показателя преломления C_n^2, полученного оптическим и акустическим способами. Также зафиксированы флуктуации показателя преломления C_n^2 (на высоте 3 и 10 м), которые на порядок выше фоновых значений, что говорит о индуцированной пожаром турбулентности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-71-10029 (https://rscf.ru/project/24-71-10029).

Список источников

1. Doerr SH, Santín C (2016) Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. Philos Trans R Soc B Biol Sci 371:20150345

2. Pausas JG, Keeley JE (2021) Wildfires and global change. Front Ecol Environ 19:387–395

3. Liu Y, Stanturf J, Goodrick S (2010) Trends in global wildfire potential in a changing climate. For Ecol Manag 259:685–697

4. Milne M., Clayton H., Dovers S., Cary GJ (2014) Evaluating benefits and costs of wildland fires: critical review and future applications. Environ Hazards 13:114–132

5. Loboda E. L., Matvienko O. V., Vavilov V. P., Reyno V. V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared physics and technology. 2015. Vol. 72. P. 1–7.

6. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Пестунов Д. А., Покровский Е. В., Толмачев Г. Н., Фофонов А. В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61

7. Loboda E. L., Kasymov D. P., Agafontsev M. V., Reyno V. V., Lutsenko A. V., Staroseltseva A. A., Perminov V. V., Martynov P. S., Loboda Ya. A., Orlov K. E. Crown fire modeling and its effect on atmospheric characteristics // Atmosphere. 2022. Vol. 13, № 12. P. 1–9. URL: https://www.mdpi.com/2073-4433/13/12/1982.

8. Loboda E. L., Kasymov D. P., Agafontsev M. V., Reyno V. V. The organization and field experimentation studies of wildfires. Experience and practice Journal of Physics: Conference Series Vol. 2389, paper number 012013. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2389/1/012013.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

В. А. Архипов[1], С. А. Басалаев[1], К. В. Костюшин[1], О. В. Матвиенко[1,2], К. Г. Перфильева[1*], В. И. Романдин[1]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36
[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Российская Федерация, Томск, пл. Соляная, д. 2
** k.g.perfiljeva@yandex.ru*

Представлена методика моделирования авиационного пожаротушения с использованием БПЛА, предназначенная для верификации физико-математических моделей расчета пространственного распределения плотности орошения при сбросе жидкости с борта вертолета МИ-8. Представлены результаты сравнения пространственного распределения плотности орошения очага пожара, рассчитанной по разработанной авторами математической модели и измеренной с использованием оригинального метода.

Одним из наиболее эффективных способов тушения пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс жидкости в очаг пожара с борта воздушного судна. В России для тушения крупных пожаров используются вертолеты МИ-8, оборудованные водосливным устройствам ВСУ-5А. Для повышения эффективности авиационного пожаротушения разработана физико-математическая модель [1; 2] и программный комплекс для оперативного расчета оптимальных параметров сброса жидкости с борта летательного аппарата в очаг пожара в режиме реального времени и с учетом максимальной безопасности летательного судна и членов экипажа. Для широкого внедрения разработанного программного комплекса в практику необходима его верификация, которая, с учетом высокой стоимости эксплуатации МИ-8, экономически нецелесообразна.

В настоящей работе представлена комплексная методика моделирования технологии авиационного тушения пожаров путем использования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с модельным сливным устройством (МСУ) [3]. Для исследования пространственного распределения плотности орошения подстилающей поверхности создана оригинальная методика и разработано устройство, состоящее из приемной емкости в форме прямоугольника, в которой размещено 25 мерных ячеек. С целью максимально полного сбора поступающей в ячейку жидкости на дне каждой из них размещался слой влагопоглощающего пористого материала (высокомолекулярный полиакриловый полимер).

При математическом моделировании процесса сброса хладагента полагается, что при выбросе в атмосферу с высоты H жидкости массой M, в результате спонтанного дробления отдельных неустойчивых фрагментов на высоте h образуется первичное жидко-капельное облако в виде полидисперсных сферических капель с заданной функцией распределения $f(D)$ [1; 2]. В качестве примера реализации предлагаемого метода моделирования на рис. 1 приведены рассчитанные и экспериментальное (точки на графике) распределения плотности орошения, полученные при сбросе $M = 2{,}5$ кг хладагента из МСУ, находящегося на высоте $H = 14$ м. Представлены результаты математического моделирования пространственного распределения плотности орошения при сбросе хладагента, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Для определения необходимых для тушения очага пожара значений плотности орошения была проведена серия полигонных испытаний по тушению модельных очагов горения растительных горючих материалов (РГМ) площадью ~ 1 м² при сбросе

© Архипов В. А., Басалаев С. А., Костюшин К. В., Матвиенко О. В., Перфильева К. Г., Романдин В. И., 2025

жидкости из МСУ, установленного на БПЛА и автомобильной вышке с высоты 10, 15 и 20 м. На рис. 2 представлены видеокадры процесса тушения модельного очага горения РГМ с высоты 15 м в разные моменты времени.

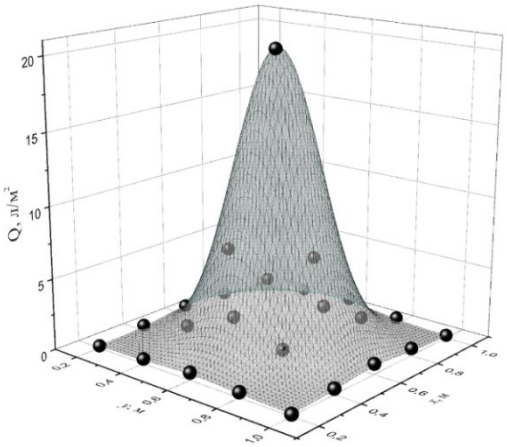


Рис. 1. Рассчитанные и экспериментальное (точки на графике) распределения плотности орошения

t = 0 с

t = 5 с

t = 5,5 с

Рис. 2. Видеокадры процесса тушения модельного очага горения РГМ
с высоты 15 м в разные моменты времени

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

Список источников

1. Матвиенко О. В., Архипов В. А., Данейко О. И., Усанина А. С., Басалаев С. А., Булавко А. М. Моделирование динамики орошения подстилающей поверхности при авиационном тушении пожаров // ИФЖ. 2023. Т. 96, № 5. С. 1242–1254.

2. Архипов В. А., Матвиенко О. В., Жарова И. К., Маслов Е. А., Перфильева К. Г., Булавко А. М. Моделирование динамики жидко-капельного хладагента при авиационном тушении пожаров // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2019. № 62. С. 68–78.

3. Чадин Ю. М., Марунченко Л. Ю., Костюшин К. В., Петров Д. С., Юстус А. В. Разработка экспериментальной БАС для моделирования сброса хладагента при тушении пожаров // Сборник статей Междунар. молодежного форума. Минск : БГТУ, 2024. С. 66–70.

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ПОЧВАХ КРИОЛИТОЗОНЫ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

К. Ю. Литвинцев[1*], Т. В. Пономарёва[2], К. А. Финников[3], Е. И. Пономарёв[2, 3]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/28
[3]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** Sttupick@yandex.ru*

В работе для почв криолитозоны Красноярского края на территории Норильского промышленного района обобщены данные по структуре почвенных профилей, уровню сезонно-талого слоя и теплофизическим характеристикам нарушенных в результате техногенной трансформации почв в сравнении с фоновым состоянием ненарушенных участков. Полученные данные были использованы для построения математической модели процессов тепломассопереноса исследуемых почв криолитозоны. На основе построенной модели проведено численное исследование изменений гидротермических процессов в техногенно трансформированной почве в процессе восстановления. Показано достоверное совпадение рассчитанных и экспериментально наблюдаемых значений динамики уровня сезонно-талого слоя.

Значительная часть территории Красноярского края относится к криолитозоне. Глобальные изменения климата и интенсивное промышленное освоение территорий в условиях криолитозоны приводит к изменению состояния почв, значительной вариации уровня сезонно-талого слоя, нарушению физических свойств, тепловых и влажностных режимов почв [1]. При этом изменения в состоянии растительного покрова криолитозоны являются причиной долгосрочных проявлений в почвах: как на уровне функционирования почв, как компонента экосистем, так и на уровне физико-химических свойств почвенных горизонтов и функционировании сезонно-талого слоя [2; 3]. Это обосновывает необходимость изучения последствий трансформации почв криолитозоны для возможности прогнозирования процессов тепловлагопереноса и, в перспективе, динамики их восстановления посредством как натурных (полевых, лабораторных и дистанционных), так и численных методов.

Полевые обследования почв криолитозоны были выполнены на севере Красноярского края, на территории Норильского промышленного района, являющейся плоской террасированной поверхностью с типичным составом тундровой растительности и незначительными участками лиственничных редколесий, сформированных на криотурбированных почвах, представленных криоземами и торфяно-криоземами (рис. 1). Доминирование данных типов почв на фоновых территориях обусловлено близким к поверхности (в пределах ~100 см) залеганием многолетнемерзлых пород (ММП).

В ходе натурных исследований был проведен анализ структуры почвенного профиля и собрана база данных [4] о распределении по глубине температуры, влагосодержания, теплового потока, коэффициентах теплопроводности и температуропроводности, плотности и оптических характеристик напочвенного покрова для участков с признаками техногенной трансформации почв в сравнении с характеристиками фоновых почв региона. Также были получены данные о глубине сезонно-талого слоя и долговременной динамике температур (от нескольких дней до недель) в разных почвенных

© Литвинцев К. Ю., Пономарёва Т. В., Финников К. А., Пономарёв Е. И., 2025

горизонтах на глубинах 0–30 см. При полевых измерениях применялись дата-логгеры EClerk, измеритель теплового потока ИТП-МГ4.03/5(III) «Поток», георадары ОКО-2/ОКО-3, прибор измерения теплофизических характеристик TEMPOS (METER Group).

Рис. 1. Состояние растительного покрова техногенно-трансформированного участка

Данные натурных исследований использовались для получения необходимых параметров математической модели тепловлагопереноса в почвах с учетом фазового перехода воды из жидкого состояния в твердое и обратно [5] для численного исследования гидротермических процессов в почвах криолитозоны района интересов.

На основе анализа полученных данных была составлена динамика восстановления почвенного профиля техногенно-нарушенных почв, характерных для исследуемого участка, на период до 50 лет. На этой основе было проведено численное исследование изменения гидротермических процессов для участка, содержащего фоновую и нарушенную области почвы, в ходе восстановления техногенно трансформированного участка (рис. 2). Полученные количественные оценки динамики глубины сезонно-талого слоя хорошо согласуются с данными натурных наблюдений (для глубины до 1,2 м).

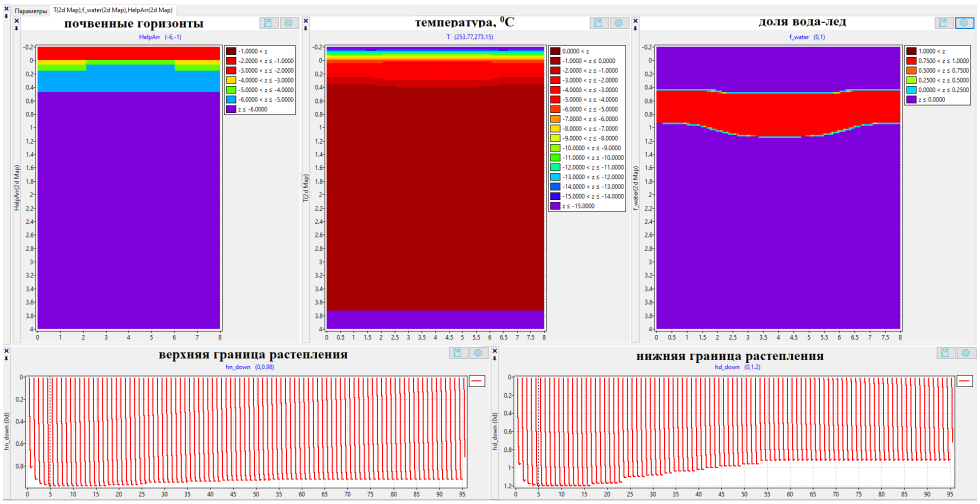


Рис. 2. Моделирование гидротермических процессов в почвах криолитозоны в условиях восстановления

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007 (https://rscf.ru/project/23-14-20007), Красноярского краевого фонда науки.

Список источников

1. Orgogozo L., Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S., Grenier C., Quintard M., Viers J., Audry S. Water and energy transfer modeling in a permafrost-dominated, forested catchment of Central Siberia: The key role of rooting depth// Permafr. Periglac. Process. 30, 75–89, 2019.

2. Masyagina O. V., Menyailo O. V. The impact of permafrost on carbon dioxide and methane fluxes in Siberia: A meta-analysis // Environ. Res., 182, 109096, 2020.

3. Dymov A., Abakumov E., Bezkorovaynaya I., Prokushkin A., Kuzyakov Y., Milanovsky E. Impact of forest fire on soil properties (Review) // Theor. Ecol., 4, 13–23, 2018.

4. Пономарёва Т. В., Литвинцев К. Ю., Финников К. А., Пономарёв Е. И., Третьяков П. Д., Сыроежко М. Ю., Пономарёв Г. Е. Теплофизические характеристики почв криолитозоны Красноярского края по натурным инструментальным измерениям сентября 2024 г. Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2024625533 от 27.11.2024.

5. Финников К. А., Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю. Исследование влияния последствий лесных пожаров на перенос тепла и влаги в сезонно-талом слое почвы методами численного моделирования // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 6. С. 1215–1222.

СВЯЗЬ ТЕПЛОИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРОВ И СТЕПЕНИ НАРУШЕННОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СИБИРИ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

Е. И. Пономарёв[1,2*], А. Н. Забродин[2,3], Е. Г. Швецов[1,3], Т. В. Пономарёва[1,2], П. Д. Третьяков[2,3], А. В. Мальканова[2,3]

[1]Институт леса имени В. Н. Сукачёва СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/28
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2] ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/45
** evg@ksc.krasn.ru*

Представлены результаты спутникового мониторинга энергетических характеристик пожаров Сибири с привязкой к доминирующим вариантам растительных покровов лесной и лесотундровой зон. Инструментально фиксируемый показатель мощности теплоизлучения активных зон горения (FRP – Fire Radiative Power) использован для классификации интенсивности горения регистрируемых пожаров Сибири применительно к мониторингу степени нарушенности растительных покровов. Зафиксирован современный тренд увеличения доли пожаров высокой интенсивности и связанный с этим отпад древостоев Сибири в данных системы глобального мониторинга изменения лесов (Global Forest Change, GFC).

В результате климатических изменений в Сибири наблюдается ужесточение пожарных режимов, определяющих повышение пожарного воздействия на растительные покровы. В этой связи актуально изучение вариативности энергетических характеристик пожаров, определяющих уровень воздействия на доминирующие варианты растительности Сибири. Оценивать и прогнозировать постпожарные эффекты перспективно на основе дистанционных данных и прямых измерений теплоизлучения активных зон пожаров, выполняемых спутниковыми средствами.

В работе интенсивность пожаров анализировали с использованием методики Fire Radiative Power (FRP) из стандартных продуктов MOD14/MYD14 данных со спутников Terra и Aqua. Вариативность параметра FRP, характеризующего тепловыделение зон активного горения, восстанавливали из данных спутниковой съемки в диапазоне ~4 мкм [1; 2]. Датировку пожаров выполняли по материалам спутникового мониторинга пожаров за период 1996–2024 гг. [3]. Сведения о вариантах растительного покрова анализировали из данных сервиса «Вега-Pro» (ИКИ РАН, Москва).

Для территории Сибири выполнено сопоставление данных о FRP и о состоянии растительности после пожаров. Между послепожарной нарушенностью растительности в терминах индекса dNBR [4] и диапазонами значений FRP зафиксирована прямая корреляция. Формализованы зависимости для шести вариантов растительных покровов (*Larix sp.*, *Pinus sylvestris, Pinus sibirica*, *Pinus pumila*, редколесья лиственницы, тундра) с достоверностью аппроксимации 0,77–0,94 при $p < 0{,}05$ (рис. 1).

Интерполяции вариативности FRP на смежных временных интервалах 2001–2010 и 2011–2023 гг. (рис. 2, *а*) фиксирует тенденцию увеличения доли высокоинтенсивного горения на значительной ~30 % части территории Сибири, преимущественно в ареале произрастания лиственничных (*Larix sibirica, L. gmelinii*) лесов и редколесий (севернее 60° с. ш.), а также в зоне тундры (севернее 65° с. ш.), где на градиенте долготы рост FRP фиксируется на 26–40 % территории. Между FRP и уровнем тепловлагообеспеченности выявлена значимая обратная связь ($r = -0{,}5$, $p < 0{,}05$), при этом FRP

© Пономарёв Е. И., Забродин А. Н., Швецов Е. Г., Пономарёва Т. В., Третьяков П. Д., Мальканова А. В., 2025

имеет более тесную корреляцию с текущим влагосодержанием лесных горючих материалов ($r = 0{,}7$, $p < 0{,}05$).

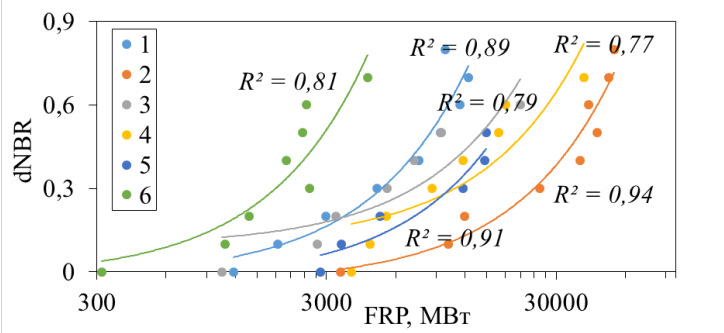
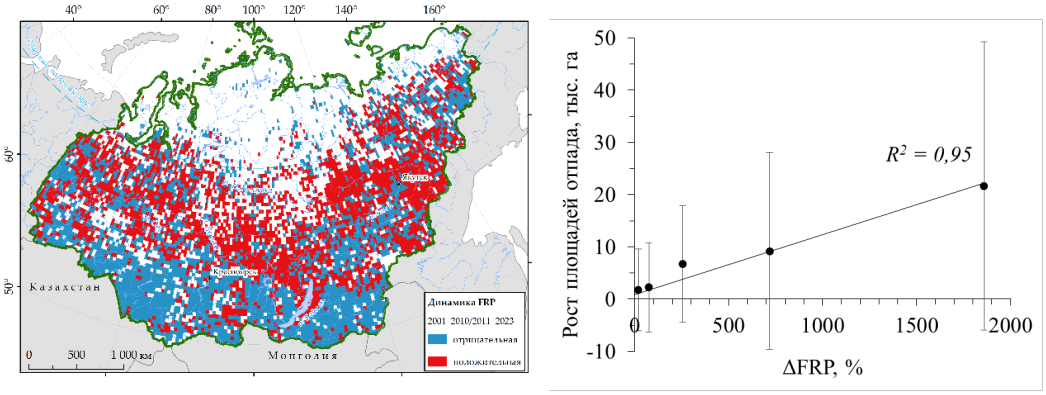


Рис. 1. Зависимость FRP и степени нарушенности (по индексу dNBR) при пожарах в лиственничных редколесьях (1) и лесах (2), сосняках (3), тундре (4), кедровом стланике (5), темнохвойниках (6)



а *б*

Рис. 2. Пространственная динамика интегральной характеристики FRP от пожаров Сибири в сравнении для 2001–2010 гг. и 2011–2023 гг. с выделением положительной/отрицательной тенденции и зависимости роста площадей породосменных пожаров по GFC за 2001–2012 и 2013–2023 гг. относительно изменения FRP

Анализ мощности теплоизлучения по методике FRP в сопряжении с данными сервиса контроля потери древостоев (Global Forest Change, GFC) позволил впервые для Сибири детализировать сведения об отпаде древостоев в условиях роста интенсивности пожаров. Выявлена линейная связь ($R^2 = 0{,}95$, $p < 0{,}01$), характеризующая суммарные потери древостоев Сибири в зависимости от диапазонов изменения радиационной мощности пожаров (рис. 2, *б*). На современном временном интервале 2001–2023 гг. среднемноголетние значения фатального изменения растительных покровов Сибири, вызванного воздействием пожаров, составляли в различные годы от 20 до 90 % суммарных потерь древостоев, отраженных в материалах сервиса Global Forest Change. Таким образом, детализацию нарушенности растительных покровов Сибири после пожаров можно контролировать на основе дистанционных оценок FRP.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007 (https://rscf.ru/project/23-14-20007), Красноярского краевого фонда науки. Спутниковые данные обработаны по госзаданию № FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН).

Список источников

1. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // J. Geophys. Res., Vol. 110, D24311, 2005. DOI:10.1029/2005JD006318.

2. Kumar S. S., Roy D. P., Boschetti L., Kremens R. Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // J. Geophys. Res., v. 116, pp. 1–18, 2011. DOI:10.1029/2011JD015676.

3. Пономарёв Е. И. Пространственно–временное распределение показателей горимости растительности Сибири за период спутниковых наблюдений 1996–2023 гг. в формате векторного полигонального слоя. Свидетельство о гос. рег. базы данных № 2024622955 от 05.07.2024.

4. Забродин А. Н., Пономарёв Е. И. Оценка связи между степенью пожарного воздействия на растительность и мощностью теплоизлучения от пожара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 5. С. 166–175.

УВЕЛИЧЕНИЕ СУММАРНЫХ ВЫБРОСОВ БЕНЗ(А)ПИРЕНА ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЕГО ВЫСОКИХ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Ю. О. Риккер*, М. В. Кобылкин, А. Г. Батухтин

Забайкальский государственный университет
672039, Российская Федерация, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
** yrikker@mail.ru*

Статья посвящена исследованию аномального поведения бенз(а)пирена в атмосфере городов Байкальского региона и формированию гипотезы радикально-цепного роста выбросов бенз(а)пирена в условиях его высоких фоновых концентраций.

Загрязнение атмосферного воздуха бенз(а)пиреном (БП) представляет серьезную экологическую проблему, особенно в регионах с холодным климатом и высокой плотностью энергетических объектов, таких как города Байкальского региона. БП – полициклический ароматический углеводород обладает высокой канцерогенной активностью и представляет угрозу для здоровья населения. Исследования показывают, что в зимний период концентрации БП в ряде городов региона, включая г. Читу и Улан-Удэ, значительно превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) – до 50 раз и более. Такая ситуация обусловлена сочетанием антропогенных и природных факторов, включая выбросы от энергетических объектов, автотранспорта и печного отопления, а также неблагоприятные климатические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ.

Важным аспектом проблемы является влияние климатических условий, характерных для Байкальского региона. Зимой здесь часто формируются устойчивые температурные инверсии и слабый ветер, что препятствует рассеиванию загрязняющих веществ. Эти факторы создают крайне низкую рассеивающую способность атмосферы и усиливают локальное загрязнение в приземном слое воздуха.

Исследуя накопленные данные о концентрациях вредных веществ в атмосфере городов Байкальского региона, получили характерные усредненные графики хода концентраций веществ с учетом вероятной дисперсии, обусловленной случайными факторами, а также с учетом неисключенной систематической погрешности, обусловленной методикой измерений. Например, для г. Читы средний график хода концентраций БП за 10 лет наблюдений представлен на рис. 1. Средняя относительная погрешность на нем равна 50 %, что является адекватным значением при условии относительной погрешности методики измерений 25 % [1]. На втором графике (рис. 2) представлен ход концентраций NO_x, средняя относительная погрешность на котором равна 33 %. Подобные графики получены для SO_2, C, CO, NO и NO_2.

При анализе полученной информации введена метрика «кратность увеличения выбросов», отражающая интенсивность изменения концентрации вредного вещества в атмосфере в заданный период времени по отношению к его минимальному значению в этот период, определяемая помесячно согласно следующей зависимости:

$$K_{ф\,i} = \frac{c_{ф\,i}}{c_{ф\,min}},$$

где $c_{ф\,i}$ – концентрация вредного вещества фоновая в атмосферном воздухе для i-го месяца, $c_{ф\,min}$ – минимальная зафиксированная концентрация вредного вещества в атмосферном воздухе.

© Риккер Ю. О., Кобылкин М. В., Батухтин А. Г., 2025

Оценка интенсивности накопления БП в атмосфере показала его аномальное поведение. В зимний период времени $K_ф$ для БП достигает 50 единиц, при этом другие выбросы обладают максимальным $K_ф$ не более 8, а в среднем пиковые значения не превышают 2,5.

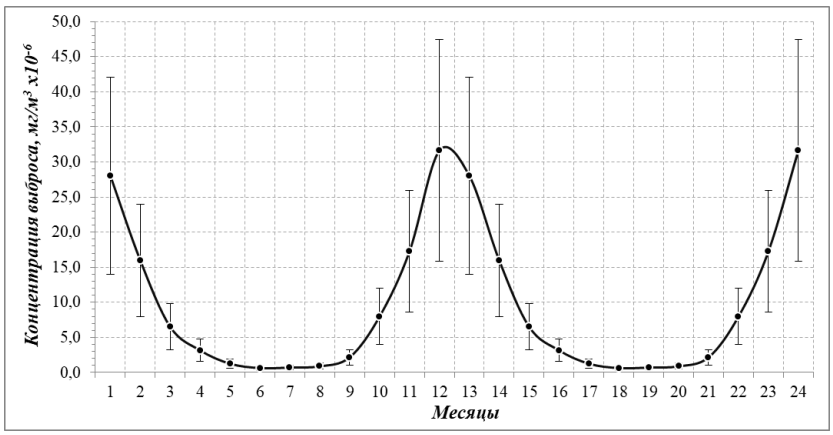


Рис. 1. Усредненные концентрации БП в атмосферном воздухе г. Читы по данным наблюдений Забайкальского УГМС с ретроспективой в 10 лет

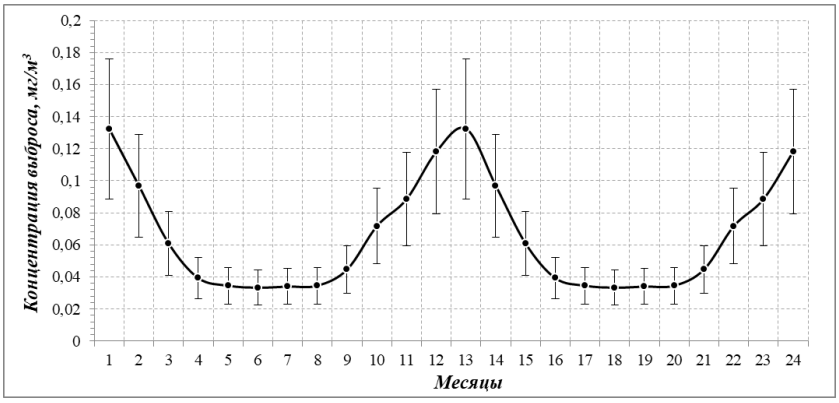


Рис. 2. Усредненные концентрации NO_x в атмосферном воздухе г. Читы по данным наблюдений Забайкальского УГМС с ретроспективой в 10 лет

Несмотря на то, что существует значительное внимание к проблеме выбросов БП [2], механизмы его формирования и аномальное поведения в атмосфере остаются недостаточно изученными. Наблюдаемая аномалия требует создания новых теоретических моделей по оценке объемов выбросов.

В ходе исследования выявлено, что между концентрацией БП в атмосфере и режимами работы теплоэнергетических объектов существует высокая корреляция. Однако выявлено также, что стандартные методики расчета выбросов объектов энергетики не объясняют столь значительное увеличение фоновых концентраций.

Проведенные исследования позволили выдвинуть гипотезу о возможном эффекте радикально-цепного роста количества БП, при котором БП, поступающий в котлы вместе с атмосферным воздухом на горение, за счет деструкции и рекомбинации, может ускорять реакции собственного образования. Подобная гипотеза требует дальнейшего экспериментального и теоретического подтверждения, но уже указывает на необходимость пересмотра текущих расчетных моделей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123102000012-2 «Комплексное

исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023.

Список источников

1. МУК 4.1.1273-03. Измерение массовой концентрации бенз(а)пирена в атмосферном воздухе и в воздухе рабочей зоны методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием : методические указания.

2. European Environment Agency, González Ortiz, A., Guerreiro, C. and Soares, J., Air quality in Europe – 2020 report, Publications Office, 2020.

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Э. А. Шефер*, Л. В. Кулагина

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Киренского, д. 26
** shefer.edik560@gmail.com*

Актуальность задачи обусловлена необходимостью дальнейшего развития технологий обеспечения пожарной безопасности с целью повышения ее эффективности и предотвращения потерь со стороны производственных компаний или компаний иного назначения, как человеческих, так и материальных. Рассмотрены наиболее эффективные методы осуществления пожарной безопасности на объектах защиты в сфере обнаружения возгорания среди современных систем АПС. На основе обзора и сравнительного анализа существующих технологий посредством приведенной статистики на реальном объекте показана эффективность использования нейронных сетей на основании критериев: надежности, времени обнаружения и перспективности.

Системы пожарной сигнализации предназначены для обнаружения в начальной стадии пожара, передачи тревожных извещений о месте и времени его возникновения и при необходимости введения в действие автоматических систем пожаротушения и дымоудаления. Они могут быть пожарные, реагирующие на первоначальные признаки пожара (дым, тепло, пламя) и охранно-пожарные, совмещающие охранные (срабатывают на вскрытие дверей, окон и т. п.) и пожарные функции. Установки пожарной сигнализации бывают на базе: автоматических (дымовых, тепловых, комбинированных и др.) пожарных извещателей; ручных пожарных извещателей; автоматических и ручных пожарных извещателей.

Пожарные извещатели, приемно-контрольные приборы, шлейфы пожарной сигнализации, приборы управления, оповещатели, системы передачи извещений, ретрансляторы, пультовые оконечные устройства, пульты централизованного наблюдения и некоторые другие устройства являются основными компонентами систем пожарной сигнализации. Адресная система пожарной сигнализации – использование различных устройств и методов. В случае возникновения пожара технические средства автоматически или по команде человека активируют сигнал «Пожар» [1].

Нейронные сети в области обеспечения пожарной безопасности. Нейронные сети – это метод искусственного интеллекта, который учит компьютер обрабатывать данные таким же способом, как и мозг. Для построения нейронной сети необходимо сначала определить цели и назначение данного продукта, так как нейронные сети достаточно гибкий инструмент использования, способный охватить множество задач, как производственных, так и повседневно-развлекательных.

В данном исследовании для построения учебной модели детектора огня и дыма будет использоваться сверточная нейронная сеть, главным качеством которой является структура построения, основанная на подобии лобной части коры головного мозга, отвечающей за зрительное восприятие объектов [2; 3].

Неоспоримым качеством нейронных сетей перед современными алгоритмами АПС является способность к самообучению за счет библиотек Keras и LSTM, которые отвечают за непосредственное обучение нейронной сети и ее возможности запоминать значения как на короткий срок, так и на длинные промежутки времени, что дает убедительное преимущество в надежности, так как не требует значительных ресурсов

© Шефер Э. А., Кулагина Л. В., 2025

в физическом обслуживании, в отличие от АПС, элементы которой с каждым годом подвергаются негативному воздействию ряда факторов, таких как насекомые, вода, солнечное излучение. Использование АПС подразумевается на срок, предусмотренный в паспорте завода изготовителя, обычно этот срок составляет 10 лет, после чего необходима замена, в то время как за этот срок нейронная сеть будет способна выйти на новый уровень развития за счет накопленного опыта или ее модернизации до последнего поколения [3].

Учебная модель детектора огня разработана на операционной системе Линукс Убунту, на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети Yolov5 с применением библиотек OpenCV, что позволит нейронной сети работать в режиме реального времени с камер наружного видеонаблюдения и непосредственно определять возникновение открытого горения, оповещать об этом оператора, с помощью весов, которые были обучены на основе фотографий и видеофайлов, взятых с разных платформ и в разном разрешении (минимальное разрешение 480p). Результатами проведенных испытаний учебной модели детектора огня стали несколько точно определенных фотографий и видео, взятых с различных платформ (YouTube, GitHube).

Дальнейшей перспективой развития учебного детектора огня является оптимизация имеющихся процессов с целью улучшения производительности и надежности, а также модернизация на мультикритериальный класс путем обновления кода, под мультикритериальностью подразумевается, что детектор будет способен определять несколько опасных факторов пожара, т. е. огонь и дым, так как зачастую крупное возгорание может начинаться с тления и заканчиваться крупным пожаром, в целом это будет наиболее эффективно в местах хранения материалов, у которых имеется высокая дымообразующая способность.

Список источников

1. Кулагина Л. В., Шефер Э. А. Сравнительный анализ современных систем обнаружения очага возгорания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 181–185. DOI 10.24412/2071-6168-2024-7-181-182. EDN OJIXUT.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611904 Российская Федерация. Программный комплекс мониторинга теплового режима в производственных помещениях : № 2024610862 : заявл. 22.01.2024 : опубл. 25.01.2024 / Л. В. Кулагина, Э. А. Шефер ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». EDN GESTOA.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665492 Российская Федерация. Программа для прогнозирования и мониторинга термоточек, в том числе техногенного происхождения (объекты теплоэнергетики) : № 2023664095 : заявл. 05.07.2023 : опубл. 17.07.2023 / Л. В. Кулагина, И. В. Кириллова ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». EDN JYMXXP.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ

С. П. Амельчугов

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
Российская Федерация, Железногорск
asp-911@yandex.ru

Описан поиск технических решений дальних водяных струй. В результате исследования сделан вывод: при сужении потока воды в щелевых кольцах конфузора насадка вязкость воды, вероятно, снижается, так как происходит механический разрыв водородных связей только в плоскости, а не в объеме упорядоченной молекулярной структуры воды. Из изложенного следует основной практический вывод: чтобы уменьшить величину *Hw* (высота потерь напора) в насадке пожарного ствола, воду необходимо пропускать через множество конфузоров, образованное тонкими соплами расчетной формы.

Проведен большой объем экспериментальных работ, связанный с поиском наиболее дальних струй, предназначенных для подачи воды на пожаротушение. Наилучшую дальность показал насадок с углом конфузора 12° и внутренним телом вращения близким к профилю NASA-2212 (рис. 1), дальность подачи воды которого на 60 % превышает дальность подачи традиционными пожарными стволами при одинаковом расходе.

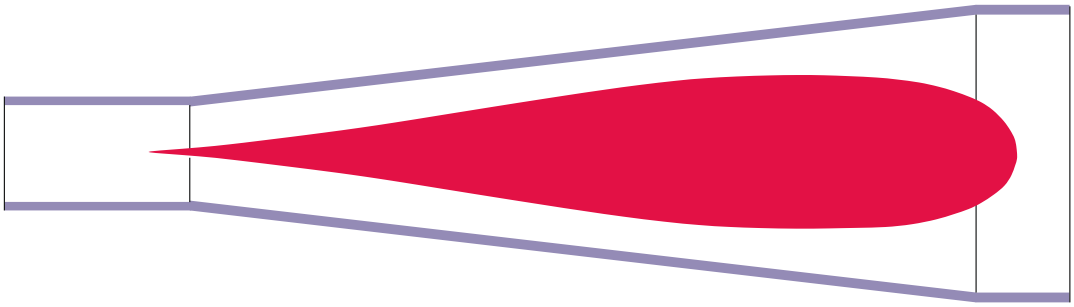


Рис. 1. Схема насадка с внутренним телом вращения

Результатом исследований стало получение конструкции насадка пожарного ствола, компактная струя которого усреднена по сплошности квазиламинарного потока, при этом скорость этого потока на выходе из насадка увеличилась, что обуславливает дальность полета. Характерным наблюдением данного потока явилась прозрачность получаемой струи на выходе из насадка.

На расстоянии от среза насадка, превышающее 100 внутренних диаметров спрыска насадка, струя распадается на крупные (диаметром 10–12 мм) фрагменты струи. В свободном полете они напоминают сплюснутый сфероид (oblate spheroid), а их слияние трансформирует в вытянутый овал (рис. 2).

Новые результаты экспериментов отличаются от исследований, проведенных другими авторами.

Как следует из вышеизложенного, в отличие от идеальной жидкости, для воды, обладающей водородной связью, в сужающемся насадке будет справедливо выражение:

$$H = H_d + Hw, \quad (1)$$

© Амельчугов С. П., 2025

где H_d – скоростной напор, м, Hw – высота потерь напора, м, связанная с преодолением энергии водородных связей.

Рис. 2. Фрагментирование цельной компактной струи

Таким образом, для рассмотрения вопросов расчета геометрии насадков стволов с заранее заданными характеристиками следует учесть потери напора, обусловленные энергией водородной связи. Физическая сущность Hw, вероятно, состоит в рекомбинации энергии водородных связей при изменении геометрии упорядоченной межмолекулярной структуры.

Практическая значимость наблюдения состоит в том, что для сужения 2-мерной струи воды потребуется значительно меньше энергии, чем на изменение 3-мерного потока.

Анализируя результаты исследований, следует сделать вывод, что при сужении потока воды в щелевых кольцах конфузора насадка, в отличие от традиционных пожарных стволов, вязкость воды, вероятно, снижается, так как происходит механический разрыв водородных связей только в плоскости, а не в объеме упорядоченной молекулярной структуры воды.

Из изложенного следует основной практический вывод: для того, чтобы уменьшить величину Hw в насадке пожарного ствола воду необходимо пропускать ее через множество конфузоров, образованное тонкими соплами расчетной формы.

Предложена конструкция насадка, полученная экспериментально, при которой значение Рейнольдса, равномерно прирастает по длине насадка, т. е. если принять 2 произвольных сечения, то

$$\frac{Re_2 - Re_1}{L} = const. \quad (2)$$

где L длина насадка.

Исследования проведены в инициативном порядке.

Список источников

1. Амельчугов С. П. и др. Научные основы поиска технических решений дальних водяных струй // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № (34). С. 142–148. URL: https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.25.24.012.

2. Хоутон Э. Л., Карпентер П. У. (1993) Аэродинамика для студентов-инженеров, издательство Butterworth and Heinemann, Оксфорд, Великобритания. ISBN 0-340-54847-9.

3 Тарасов-Агалаков Н. А. Практическая гидравлика в пожарном деле. М. : Издательство МКХ РСФСР, 1959.

4. Stenstrom B., Salen & Wikander A. B. Пат. 151 140, Норвегия, Arordmng fon transversak sammenholding av vaesketstrale // Пожарный ствол с повышенной дальностью и компактностью выбрасываемой водяной струи, 1976.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СТОЧНЫХ ВОД

Г. В. Кузнецов[1, 2], С. А. Керимбекова[1, 2], П. А. Стрижак[1, 2*]

[1]Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** pavelspa@tpu.ru*

Приведены особенности термической очистки технологических и сточных вод. Сформулированы основные сложности развития технологий термической и огневой очистки вод и потенциально возможные решения.

Проблема очистки существенно загрязненных технологических и сточных вод достигла мирового масштаба и в связи со снижением запасов питьевой воды становится все более острой. Огромное количество промышленных предприятий, сельскохозяйственные комплексы являются основным источником загрязненных вод, негативное влияние которых на окружающую среду растет с каждым годом: ухудшение качества питьевой воды, нарушение экосистемы, снижение уровня жизни населения.

На сегодняшний день все методы очистки воды можно разделить на четыре больших группы:

– механические методы (фильтрование, процеживание, отстаивание) – сравнительно недорогие и применяются в основном для выделения различных взвесей;

– химические методы очистки, которые используются для нейтрализации всевозможных неорганических примесей;

– биологические методы, основанные на способности микроорганизмов подвергать разложению органические соединения и применяемые для нейтрализации растворенных органических соединений;

– термические методы.

Методы термической очистки являются незаменимыми при высокой концентрации органических и минеральных веществ в очищаемой воде. Очистка стоков жидкофазным окислением предполагает рекуперативный нагрев в камере под давлением (не менее 2,3 МПа), обеспечивающем температуру ее кипения до 200–3000 °С в присутствии растворенного в ней кислорода воздуха. В таких условиях содержащиеся в воде органические вещества интенсивно окисляются, превращаясь в минералы. Таким образом получается термически смягченная, обезвреженная вода, которая после охлаждения используется повторно в качестве питательной или для других технических целей. Преимущество термических методов (по сравнению с биологическими, химическими и механическими) заключается в возможности очистки большого объема вод (от 3 до 10 м^3/ч). Основная сложность очистки сточных и технологических вод состоит в больших объемах и многообразии в них твердых, жидких и газообразных примесей, которые разнонаправленно влияют на основные характеристики физико-химических процессов и фазовых превращений.

Основными вызовами в области совершенствования термической и огневой очистки являются снижение затрат энергии на прогрев и испарение воды и выжигание примесей, уменьшение времени очистки, внедрение оперативного контроля примесей в камере, а также возможность учета эффекта взаимного влияния примесей в составе технологических и сточных вод.

© Кузнецов Г. В., Керимбекова С. А., Стрижак П. А., 2025

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 75-15-2024-620.

Список источников

1. Anser M. K., Hanif I., Vo X.V., Alharthi M. The long-run and short-run influence of environmental pollution, energy consumption, and economic activities on health quality in emerging countries // *Environ Sci Pollut Res*, Vol. 27, no. 26, pp. 32518–32532, 2020.

ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ АТМОСФЕРЫ

А. Н. Сухановский[1*], А. А. Гаврилов[2], А. Ю. Васильев[1], Е. Н. Попова[1]

[1]Институт механики сплошных сред УО РАН
614013, Российская Федерация, Пермь, ул. ак. Королева, д. 1
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** san@icmm.ru*

Представлены результаты экспериментального и численного исследования конвективного теплопереноса в модели общей циркуляции атмосферы. Рассмотрено влияние на распределение температуры и потоков тепла арктического потепления и скорости вращения модели. Полученные результаты показали, что процесс арктического потепления слабо влияет на характеристики общей циркуляции, за исключением полярного региона, оказывая заметное влияние на распределение потоков тепла и температуры. Варьирование вращения позволило изучить процесс адаптации глобальной циркуляции к новым условиям. Показано, что увеличение скорости вращения приводит к существенному изменению структуры глобальной циркуляции и меридиональных потоков тепла.

Общая циркуляция атмосферы играет важнейшую роль в погодных и климатических процессах, поскольку обеспечивает перенос и перераспределение тепла и углового момента. Структура и динамика глобальной циркуляции атмосферы очень сложны и зависят от множества факторов, таких как вращение, солнечный нагрев, топография поверхности и т. д. Глобальная атмосферная циркуляция имеет конвективную природу, ее движущей силой является меридиональная разница температур. Заметное потепление над арктическим полюсом приводит к уменьшению температурного контраста между полюсом и экватором, что может повлиять на интенсивность и структуру крупномасштабной циркуляции и вероятность погодных экстремумов. В данной работе представлены результаты лабораторного и математического моделирования арктического потепления в идеализированной постановке [1–3]. Показано, что в «атмосферном» режиме арктическое потепление не приводит к принципиальным изменениям характеристик крупномасштабных течений, за исключением полярного региона. Значительно сильнее изменяется пространственное распределение и величина потоков тепла в средних широтах и в полярной области лабораторной модели, что приводит к заметному изменению средней температуры (рис. 1). Подробно результаты моделирования арктического потепления представлены в [4].

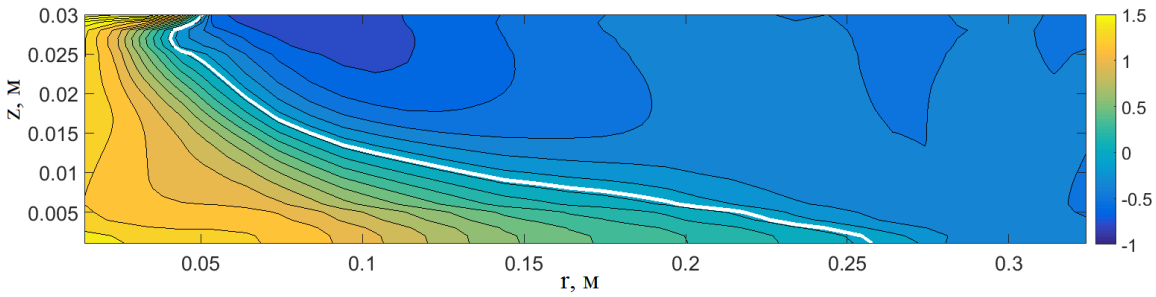


Рис. 1. Изменение распределения температуры в результате модельного арктического потепления

© Сухановский А. Н., Гаврилов А. А., Васильев А. Ю., Попова Е. Н., 2025

Варьирование вращения модели позволило изучить процесс адаптации глобальной циркуляции к новым условиям.

Увеличение скорости вращения дестабилизирует осесимметричный режим Хэдли, выдавливает аналог ячейки Хэдли к периферии, приводит к образованию еще двух относительно слабых меридиональных ячеек (аналогов полярной и ячейки Ферреля) и ослабляет интенсивность меридиональной циркуляции. Изменения в структуре среднего течения сопровождаются заметной вариацией распределения средней температуры.

Адаптация системы к новым условиям привела к развитию волновых движений и компенсации потери средней части общего теплового потока его пульсирующей частью. Регулярные бароклинные волны начинают играть ключевую роль в переносе тепла. Дальнейшее увеличение скорости вращения приводит к нерегулярному волновому бароклинному режиму (атмосферный режим), который характеризуется увеличением энергии волн меньшего масштаба. Общая кинетическая энергия относительного движения потока уменьшается с ростом скорости вращения, но энергия радиального потока, обеспечивающего большую часть теплопереноса, увеличивается за счет пульсационной части.

Подробно результаты данной части работы представлены в [5].

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 22-61-00098.

Список источников

1. Васильев А. Ю., Попова Е. Н., Сухановский А. Н. Структура течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. № 16 (3). С. 321–331.

2. Sukhanovskii A., Popova E., Vasiliev A. A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. 2023. Vol. 117, N 3. P. 155–176.

3. Harlander U., Sukhanovskii A., Abide S., Borcia I. D., Popova E., Rodda C., Vasiliev A., Vincze M. New Laboratory Experiments to Study the Large-Scale Circulation and Climate Dynamics // Atmosphere. 2023. N 14. P. 836.

4. Sukhanovskii A., Gavrilov A., Popova E., Vasiliev A. The study of the impact of polar warming on global atmospheric circulation and mid-latitude baroclinic waves using a laboratory analog // Weather and Climate Dynamics. 2024. Vol. 5 (2). P. 863–880.

5. Gavrilov A., Sukhanovskii A., Vasiliev A., Popova E. Numerical study of structural changes in the laboratory model of the atmospheric general circulation under variation of the rotation rate // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 241. P. 126676.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ NO_X НА СТРОЯЩИХСЯ В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗАВОДАХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТКО

В. С. Киреенко, А. Н. Тугов*

АО «Всероссийский теплотехнический институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводской проезд, д. 4/1
** ANTugov@vti.ru*

Выполнен анализ основных технических решений, принятых в системе СНКВ на строящихся в Московской области заводах для энергетической утилизации твердых коммунальных отходов. По результатам расчетов траекторий струй восстановителя в поперечном (сносящем) потоке дымовых газов обосновывается, с точки зрения обеспечения равномерного перемешивания восстановителя и дымовых газов, выбор конструктивного исполнения распределительных устройств (сопел) и режимных параметров системы СНКВ, установленной на котлах этих заводов.

Термический способ переработки твердых коммунальных отходов (ТКО) с отпуском потребителю тепловой и электрической энергии играет ключевую роль в решении проблемы санитарной очистки городов. Однако данный процесс сопровождается выбросами загрязняющих веществ, среди которых значительную долю составляют оксиды азота (NO_X). Для снижения выбросов NO_X применяют различные топочные методы: рециркуляцию дымовых газов, малотоксичные горелки, многоступенчатое сжигание, а также технологии селективного восстановления оксидов азота. Мировой опыт показывает, что на установках для термической переработки ТКО наибольшее распространении получила технология селективного некаталитического восстановления NO_X (СНКВ) в различных модификациях. Основным преимуществами технологии СНКВ являются низкие капитальные затраты по сравнению с технологией селективного каталитического восстановления, невосприимчивость процесса к загрязнителям в дымовых газах (летучей золе, серы и ее соединениям), а также более высокая эффективность по сравнению с топочными методами подавления NO_X.

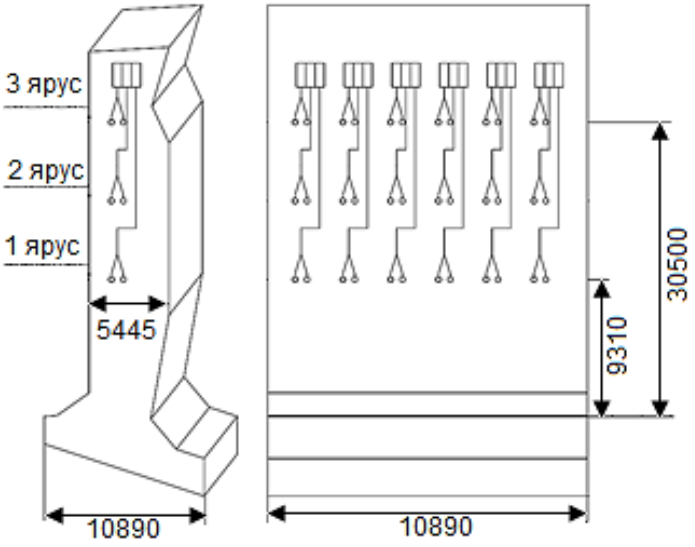
В системе СНКВ на заводах в Московской области в качестве реагента используется карбамид, подача которого в первый газоход котла осуществляется при помощи сжатого воздуха через установленные в три яруса на боковых и фронтальном экранах топочной камеры устройства подачи карбамида, состоящие из двух сопел диметром 3 и 5 мм, установленных под углом 10° и 30° (рис. 1).

Основными факторами, влияющими на эффективность работы системы СНКВ, являются температура дымовых газов (восстановитель должен подаваться в зону с температурой 850–1100 ºС), время пребывания восстановителя в этой температурной зоне (не менее 0,5 с), мольное соотношение восстановителя и NO_X (оптимальным значением считается NH_3/NO_X = 1,5–2,5) и хорошее смешение восстановителя и дымовых газов. Последнее является критически важным условием для обеспечения высокой эффективности снижения выбросов NO_X и предотвращения проскока аммиака в атмосферный воздух. В свою очередь, качество смешения определяется глубиной проникновения струй восстановителя в поток дымовых газов.

Для расчета глубины проникновения восстановителя в поток дымовых газов была использована модель осесимметричных струй в сносящем поперечном потоке. Расчеты выполняли при следующих допущениях: температура дымовых газов оставалась постоянной по высоте топочной камеры (первого футерованного газохода котла)

© Киреенко В. С., Тугов А. Н., 2025

на уровне 900 °С, скорость дымовых газов принята равномерной по сечению топочной камеры, а критерием полного перемешивания восстановителя с дымовыми газами считается достижение струи, истекающей из сопел, расположенных по фронту котла, противоположной стенки (тыла) топочной камеры.



а *б*

Рис. 1. Расположение распылительных сопел системы СНКВ в топочной камере:
а – на боковых экранах; *б* – на фронтовом экране

Расчет выполнялся для ТКО среднего состава при номинальном режиме работы котла (расход ТКО 30 т/ч). Исходя из начальной концентрации NO_X на выходе из топки, расхода дымовых газов и оптимального при эксплуатации систем СНКВ мольного отношение NH_3/NO_X, расход 33%-ного водного раствора карбамида принимался равным примерно 75 кг/ч. Было рассмотрено пять режимов подачи этого раствора в топочную камеру, отличающихся значениями расхода транспортирующего агента (воздуха). На основе полученных данных была выполнена оценка продолжительности реакции восстановления NO_X (время прохождения дымовыми газами участка по высоте топочной камера от места соприкосновения струи противоположной стенки до их выхода из футерованной зоны) (табл. 1).

Таблица 1

Продолжительность реакции восстановления NO_X в топочной камере котла в зависимостиот места подачи карбамидо-воздушной смеси (яруса сопел) при различных расходах воздуха

Показатель	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5
Расход воздуха на систему СНКВ, нм^3/ч	565	645	800	970	1050
Время реакции восстановления NO_X (с) при подаче карбамидо-воздушной смеси через:					
1 ярус	3,1	3,3	3,55	3,6	3,65
2 ярус	1,55	1,75	2	2,05	2,1
3 ярус	0	0,25	0,5	0,54	0,55

Время пребывания дымовых газов после полного их смешения с карбамидо-воздушной смесью, необходимое для полного протекания реакций восстановления (не менее 0,5 с), достигается при расходе воздуха 810 нм^3/ч (табл. 1). При его уменьшении

время реакции в третьем ярусе сокращается. Дальнейшее увеличение расхода воздуха не приводит к существенному увеличению необходимого времени пребывания. Таким образом, для системы СНКВ строящихся в Московской области заводов расход воздуха на уровне 800 нм^3/ч является оптимальным. Расчеты также показали, что выбранная конструкция форсунок (с диаметрами 3 и 5 мм) позволяет добиться значительного охвата зоны распыла и эффективного перемешивания газов с восстановителем.

Дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию работы системы СНКВ на данном объекте, планируется выполнять с использованием численного моделирования. В качестве исходных данных (расходы сред, геометрия сопел) будут приняты значения, полученные на данной стадии.

ОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПЯТЕН В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ КРУПНЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ПЕРЕНОС АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

А. В. Шатров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
shatrov_av@spbstu.ru

Рассматриваются мезомасштабные атмосферные процессы переноса компонентов скорости, температуры, концентрации загрязняющих веществ в приземном пограничном слое окрестностей крупного индустриального центра. При моделировании пограничного слоя атмосферы система дополняется граничными условиями, учитывающими воздействие подстилающей поверхности на приземный слой атмосферы. При исследовании нижнего слоя атмосферы отмечено, что над городом или большим населенным пунктом возникает тепловое пятно антропогенного характера, называемое «островом тепла». Отмечена важность воздействия термической неоднородности подстилающей поверхности на мезомасштабные атмосферные процессы.

Модели мезомасштабных атмосферных процессов широко используются для изучения локальных явлений погоды, наблюдающихся в течение суток, конвективных процессов, переноса примеси в нижнем слое атмосферы. Для этих целей создано большое количество моделей различных типов [1]. Как известно, система уравнений мезомасштабных процессов включает уравнения движения, неразрывности, теплопроводности, переноса влаги. Туда входят замыкающие уравнения для определения коэффициентов турбулентного обмена. При моделировании пограничного слоя атмосферы система дополняется граничными условиями, учитывающими воздействие подстилающей поверхности на приземный слой атмосферы.

Учитывая сложность моделирования и большую вычислительную трудоемкость расчета трехмерных моделей даже для современных компьютеров, имеет смысл использовать в расчетах двумерные модели, сохраняющие основные физические свойства изучаемых атмосферных процессов в силу того, что представляют собой асимптотическое приближение полной трехмерной модели. В нашей работе предлагается квазидвумерная модель, описывающая трехмерные конвективные процессы в тонком вращающемся слое воздуха при наличии антропогенных источников тепла и примеси. Ее вывод и подробное описание представлены в работах [2; 3], посвященных процессам переноса аэрозольных примесей различной природы.

В приближении теории пограничного слоя, ограничиваясь рассматриванием мезомасштабных процессов, для которых высота слоя D и горизонтальный масштаб движения L удовлетворяют соотношению $\delta = \dfrac{D}{L} << 1$, используем систему трехмерных уравнений гидротермодинамики «сухой» атмосферы во вращающейся декартовой системе координат [1].

Для математического моделирования переноса примеси от приземного источника выведем квазидвумерную модель на основе локально-равновесного подхода. Для этого производится осреднение по безразмерной координате $\zeta = z/D$, при этом все искомые переменные представляются в виде средних поперек слоя величин:

© Шатров А. В., 2025

$$\langle g \rangle = \int_0^1 g(t,x,y,\zeta)d\zeta \ .$$

Выберем в качестве единиц измерения длины, скорости, времени, температуры и концентрации примеси соответственно L – длина площадки, c_g, L/c_g, θ_0 и $\varphi_{ÏÄÊ}$ – предельно допустимая концентрация примеси. Тогда в терминах вихря скорости ω, функции тока ψ, средней поперек слоя потенциальной температуры $\theta(t,x,y)$, приведенной к размерности функции тока: $\theta = \frac{\beta D}{2l}\langle\theta\rangle$ и средней поперек слоя концентрации $\varphi(t,x,y)$ получим уравнения модели в безразмерном виде.

Программная реализация модели выполнена для анализа и прогноза состояния загрязнения г. Кирова и его окрестностей на участке 100 × 100 км с разрешением до 200 м. Расчеты проводились на основе локально-равновесной системы уравнений. Использовалась явная конечно-разностная схема на сетке 500 × 500 узлов. Основные расчеты проводились при скорости 2 м/с. В этом случае наиболее наглядно прослеживается воздействие температурной неоднородности на движение ветра в окрестности источника тепла. Учет взаимодействия аэрозольной примеси с подстилающей поверхностью производился на основании неоднородности распределения температуры и коэффициента поглощения α по информации карты землепользования расчетной области. Температура воздуха колебалась от 18 °С вне населенных пунктов до 23 °С в г. Кирове. Были получены средние поперек слоя поля концентрации примеси, температуры воздуха, функции тока и возмущений функции тока.

Показано, что горизонтальная температурная неоднородность вносит изменение в направление движения ветра. Под действием «острова тепла» над крупными населенными пунктами возникает слабое вихревое движение (рис. 1).

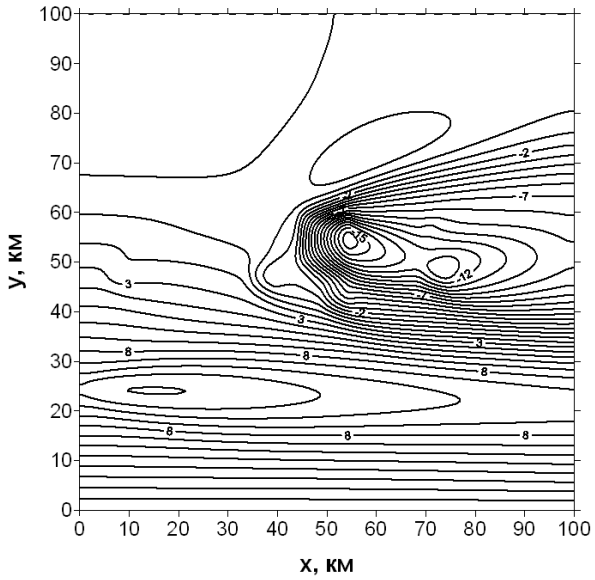


Рис. 1. Вихревое движение под действием температурной неоднородности

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 1281, рег. № 114123040133.

Список источников

1. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск : Наука, 1985. 256 с.

2. Shatrov A. V., Shvarts K. G. Numerical Modeling of Mesoscale Atmospheric Impurity Transport Processes in the Environs of the City of Kirov // Fluid Dynamics, 2011, Vol. 46, No 2, p. 333–340. DOI: 10.1134/S0015462811020165

3. Medveditsyna O., Rychkov S., Shatrov A. High-Performance Calculations for Modeling the Propagation of Allergenic Plant Pollen in an Atmospheric Boundary Layer // Parallel Computational Technologies: 16th International Conference (PCT 2022), Dubna, Russia, 29-31 March 2022. Cham: Springer, 2022. (CCIS; Vol. 1618). URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-11623-0.

ПОДАВЛЕНИЕ ВОЗГОРАНИЙ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИДРАТНОЙ ПЕНЫ

М. В. Школа, И. В. Забелин,
Н. Е. Шлегель*, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** nes6@tpu.ru*

В настоящей работе предложена концепция технологии ликвидации возгорания жидких нефтепродуктов с применением гидратной пены. При взаимодействии гидратной пены с очагом возгорания углекислый газ, выделившийся при диссоциации гидрата, вытесняет окислитель из зоны горения. Образующаяся гидратная пена поглощает выделившееся в процессе горения тепло и создает буферную зону между окислителем воздуха и поверхностью нефтепродукта. Этот фактор замедляет распространение фронта горения. Определены оптимальные параметры работы системы с гидратной пеной для эффективной ликвидации возгораний. На основе полученных данных разработана концепция системы подавления возгорания нефтепродуктов в резервуарах и сформулированы математические выражения для прогнозирования требуемого объема гидрата.

Для проведения экспериментальных исследований по определению характеристик ликвидации возгораний нефтепродуктов гидратной и традиционной пеной использовался стенд (рис. 1). Регистрация процесса ликвидации возгораний проводилась высокоскоростной видеокамерой *1*, данные с которой переносились на персональный компьютер *2* для последующих обработки и анализа. Использовалась емкость *3* в виде полого цилиндрического диска, в который наливался нефтепродукт объемом 150 мл. Затем инициировалось его горение с помощью пьезоэлектрического элемента. Подавление возгорания осуществлялось огнетушителем *4,* который наполнялся водой объемом около 700 мл и гидратом двуокиси углерода массой практически 300 г. Гидратная пена, образованная при диссоциации гидрата с водой, выбрасывалась из сопла огнетушителя с расходом около 0,3 l/c. За счет выброса углекислого газа осуществлялся срыв пламени, а гидратная пена покрывала всю поверхность горящей жидкости, тем самым осуществляя охлаждающий эффект и ограничивая доступ окислителя в зону горения.

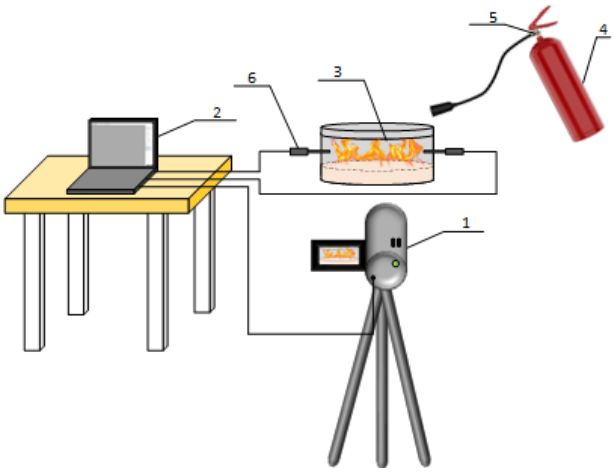


Рис. 1. Схема стенда для подавления возгорания нефтепродукта гидратной пеной: *1* – высокоскоростная видеокамера; *2* – персональный компьютер; *3* – резервуар с нефтепродуктом; *4* – огнетушитель с гидратной (или традиционной пожарной) пеной; *5* – манометр; *6* – трубное соединение системы пенного подавления возгорания; *7* – термопары

© Школа М. В., Забелин И. В., Шлегель Н. Е., Стрижак П. А., 2025

Регистрировалось время подавления возгорания бензина гидратной пеной при варьировании массы гидрата (200, 300 и 400 г) (рис. 2) и давления (2, 4 и 6 бар) в огнетушителе (рис. 3).

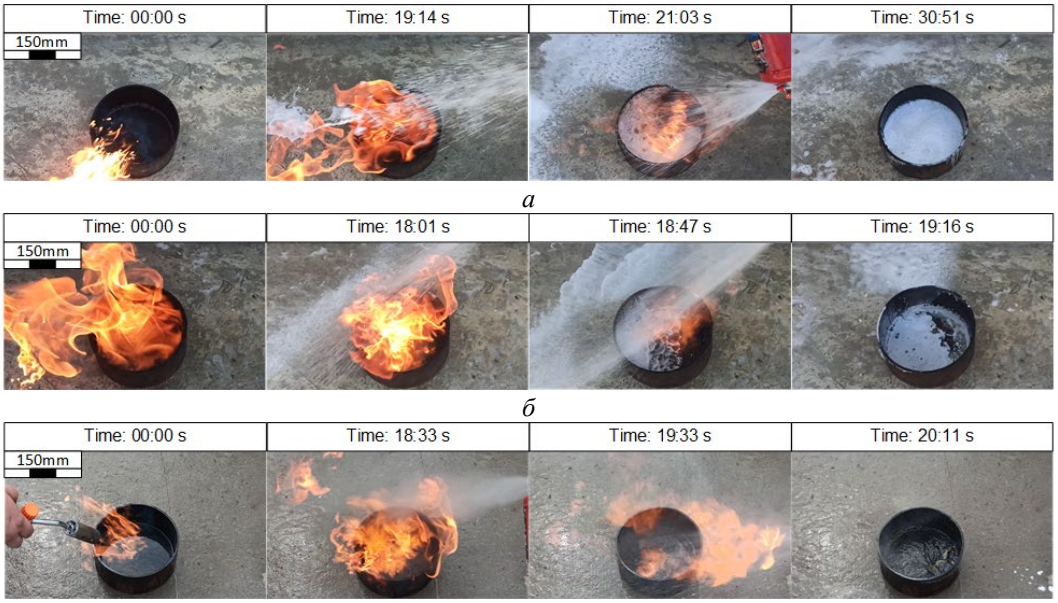


Рис. 2. Видеокадры процесса подавления возгорания бензина при варьировании массы гидрата в огнетушителе: *а* – 200 г; *б* – 300 г; *в* – 400 г

При массе гидрата около 200 г выделяется недостаточное количество углекислого газа для быстрого подавления возгорания. Гидратная пена, образовавшаяся при диссоциации гидрата, покрывала очаг возгорания полностью только в случае с массой гидрата около 300 г. При диссоциации гидрата массой 400 г выделилось слишком много углекислого газа, который мгновенно сбил пламя, но затруднял покрытие пеной очага возгорания. Таким образом, оптимальная масса гидрата в огнетушителе составляет около 300 г.

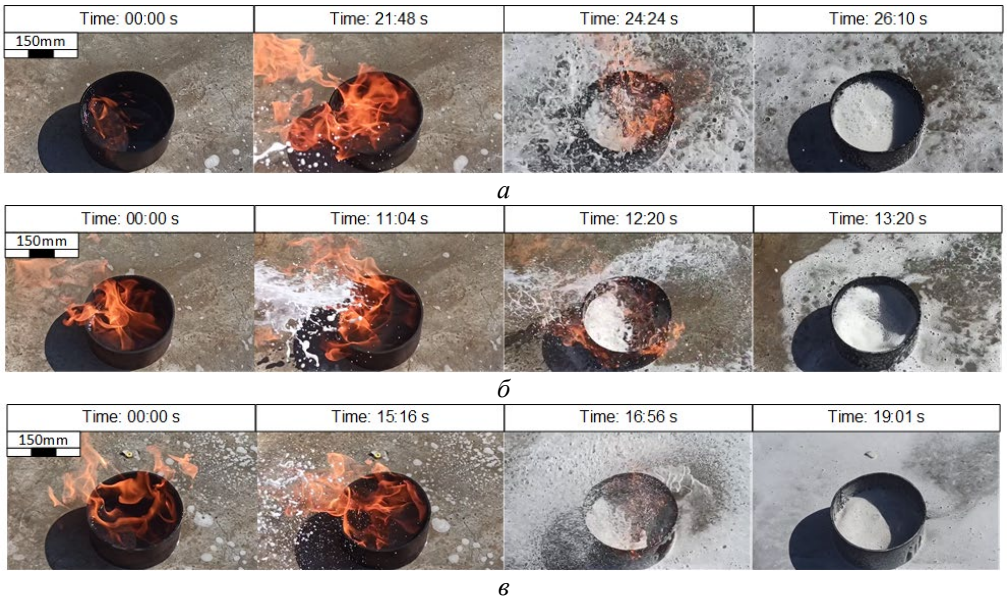


Рис. 3. Видеокадры процесса подавления возгорания бензина при варьировании давления в огнетушителе: *а* – 2 бар; *б* – 4 бар; *в* – 6 бар.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимальное давление в огнетушителе составляет около 4 бар. При таком давлении достигается баланс между эффективным вытеснением окислителя из зоны горения и предотвращением разбрызгивания нефтепродукта, что способствует максимально быстрому и безопасному подавлению возгорания.

Работа выполнена в рамках Приоритета-2030-ЭБ-017-202-2024.

УТИЛИЗАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ

П. А. Стрижак, Н. Е. Шлегель*,
Е. Р. Подгорная, П. С. Нагибин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** nes6@tpu.ru*

Термическая конверсия отходов угле- и нефтедобычи путем сжигания уменьшает их объем, освобождает занимаемую площадь и минимизирует экологический ущерб, а также способствует генерации тепловой и электрической энергии. Однако сжигание нефтяных и угольных отходов осложнено трудностями воспламенения и высокими значениями концентраций антропогенных выбросов. Для повышения эффективности и экологичности процесса предложено использовать гидратный газ. При нагревании он распадается на газ и водяной пар, что улучшает горение нефтяных и угольных отходов. Исследования показали, что использование газового гидрата значительно увеличивает эффективность утилизации нефтяных отходов. Разработаны математические модели для определения оптимальных условий сжигания, включая расчет времени разложения гидратов.

В связи с увеличивающимся спросом на тепловую и электрическую энергию скорость добычи угля, нефти и газа значительно возросла. Ежегодно в процессе угле- и нефтепереработки образуется более миллиарда тонн отходов [1]. Такие отходы способны нанести серьезный вред окружающей среде и здоровью человека, поскольку в их составе присутствуют тяжелые металлы, радиоактивные компоненты, канцерогены. Сжигание отходов угле- и нефтепереработки сопровождается значительными антропогенными выбросами. Кроме того, такие отходы характеризуются низкой теплотворной способностью и плохой воспламеняемостью [2]. Для решения этой проблемы предлагается использовать гидратный газ. Гидратный газ представляет собой смесь природного газа с водяным паром, полученную в результате диссоциации газовых гидратов. Известно, что наличие небольшого количества водяного пара в топке котлоагрегата способствует снижению уровня антропогенных выбросов и приводит к снижению температуры пламени [3].

Проведены экспериментальные исследования для определения оптимального соотношения расходов шламов и гидратного газа для обеспечения стабильного горения топливной смеси в камере сгорания. Стабильным считается горение, которое продолжалось более пяти минут без срыва пламени. Выбор данного временного интервала обоснован тем, что, как правило, в первые пять минут работы типичного котельного агрегата реализуется растопочный режим. Совместно с топливом в камеру сгорания подавался дутьевой воздух температурой около 20 °С, расход около 240 м^3/ч.

На рис. 1 представлены значения вероятности стабильного горения гидратного газа совместно с углем/углешламом (рис. 1, *а*) и мазутом/нефтешламом (рис. 1, *б*). Проведенные экспериментальные исследования позволили установить оптимальные и достаточные расходы углешлама (G_c) и газового (G_g) топлив, которые составили 2,4 кг/ч и 0,619 м^3/ч, соответственно (рис. 1, *а*). При снижении расхода газа менее 0,619 м^3/ч регистрировалось неустойчивое факельное горение с пульсациями. Такой эффект обусловлен переизбытком окислителя в зоне горения, т. е. газовая фаза разбавлялась до концентраций ниже 6 %, в этот момент происходил срыв пламени. Зона горения возле сопла не успевала прогреваться до температуры стабилизации газового факела. Это приводило к завихрению воздушного потока, поступающего от дутьевого вентилятора,

© Стрижак П. А., Шлегель Н. Е., Подгорная Е. Р., Нагибин П. С., 2025

газовая смесь уносилась из камеры сгорания. При увеличении расхода газа выше 0,6197 м^3/ч регистрировался срыв пламени в течение первых пяти минут его работы. При повышенном расходе газа окислителя в зоне горения не хватало, что также приводило к срыву пламени. Метан сгорал на периферии факела, образовался угарный газ, блокирующий доступ окислителя в ядро факела. Это приводило к понижению температуры горения. Рост расхода топлива изменял гидродинамику течения и вихревого перемешивания в камере сгорания, а также изменял состав газов (повышалась концентрация угарного газа).

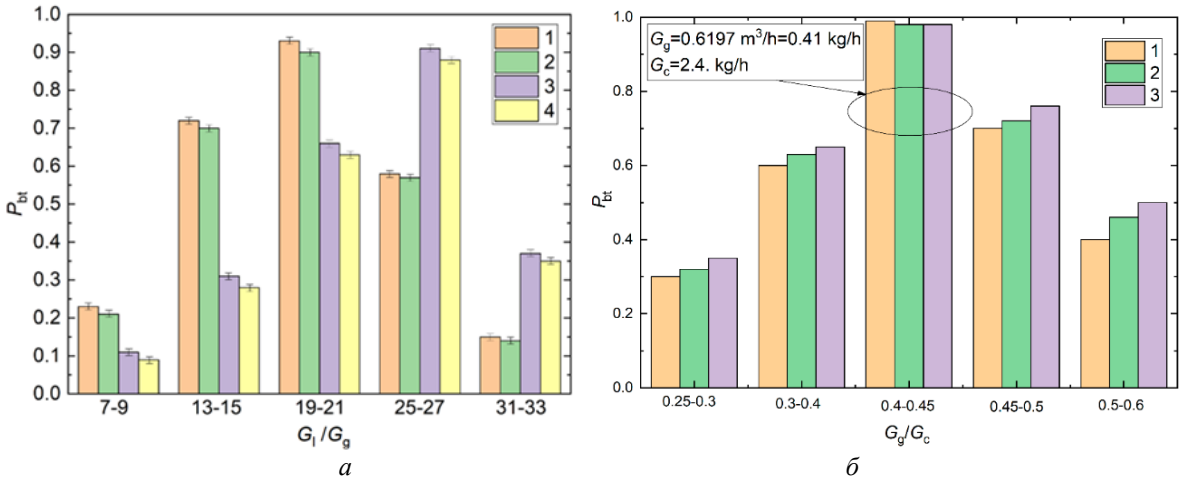


Рис. 1. Вероятность стабильного (без срыва пламени) горения (P_{bt}) исследуемых топлив в течение 5 минут при разных значениях отношения их расходов: *а*) *1* – гидратный газ; *2* – гидратный газ с угольным шламом: *3* – гидратный газ с углем; *б*) *1* – гидратный газ с мазутом; *2* – метан с мазутом; *3* – гидратный газ с нефтешламом; *4* – метан с нефтешламом

Анализ рис. 1, *б,* позволил установить оптимальное соотношение расходов жидкого нефтяного топлива (G_l) и гидратного газа при их совместном сжигании. Так, стабильное горение нефтешлама с гидратным газом достигалось при большем соотношении расходов (G_l/G_g = 25–27), чем при горении мазута с газообразным топливом (G_l/G_g = 19–21). Это обусловлено тем, что мазут представляет собой готовое топливо, т. е. не содержит лишней влаги и механических примесей, а также имеет большую теплотворную способность в отличие от нефтешлама. При смещении отношения расходов топлив в меньшую сторону происходил срыв пламени из-за избытка окислителя в зоне горения. При таком расходе топлива зона горения возле сопла не нагревалась до температуры, необходимой для стабилизации газового факела. Такой эффект приводил к тому, что из капель жидкого топлива не выделялись легкогорючие парафины, окисление которых обеспечивает, прогрев зоны горения. Завихрился воздушный поток от дутьевого вентилятора. Это приводило к уносу газовой смеси из камеры сгорания. При увеличении же отношения расходов происходил срыв пламени из-за недостатка окислителя в камере сгорания. В результате экспериментальных исследований установлено, что оптимальный расход мазута составил около 5,17 кг/ч, нефтешлама около 7,49 кг/ч, а гидратного газа около 0,62 кг^3/ч.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИ ТПУ, проект Приоритет-2030-ЭБ-017-202-2024.

Список источников

1. Lopes A. G., Da Silva F. C. A., Lopes R. T. Radiological assessment of the disposal of bulk oil NORM waste: Case study from Brazil // J. Environ. Radioact. 2023. Vol. 261, article number 107139.

2. Zhang L., Yang L., Wang J., Zhao J., Dong H., Yang M., Liu Y., Song Y. Enhanced CH4 recovery and CO2 storage via thermal stimulation in the CH4/CO2 replacement of methane hydrate // Chem. Eng. J. 2017. Vol. 308. P. 40–49.

3. Shlegel N. E., Strizhak P. A. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface // Fuel. 2023. Vol. 342, article number 127734.

СРАВНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ NCEP GFS И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. В. Дергунов[1], О. Э. Якубайлик[2*], В. В. Заворуев[2]

[1 2]ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** oleg@icm.krasn.ru*

Исследование, проведенное в Институте вычислительного моделирования СО РАН, посвящено сравнению вертикальных профилей температуры атмосферы г. Красноярска, полученных с помощью инструментальных измерений (метеорологический профилемер МТП-5) и расчетных данных модели NCEP Global Forecast System (GFS). Анализ выполнен для февраля 2023 г. с учетом данных на высотах от 0 до 1000 м. Результаты показали, что наилучшая корреляция между данными МТП-5 и GFS наблюдается утром (0,88) и вечером (0,85), тогда как днем корреляция снижается до 0,73. Модель GFS в большинстве случаев занижает значения температурных инверсий с наибольшими расхождениями в дневное время (средняя разница 3,5 ± 1,3 °С). Выявлено, что GFS не всегда точно отражает реальную температурную стратификацию атмосферы, особенно в дневные часы.

Вертикальный профиль температуры атмосферы Земли может быть получен расчетным путем и/или инструментальным измерением.

В Институте вычислительного моделирования СО РАН (ИВМ СО РАН) проводятся исследования с использованием данных модели NCEP Global Forecast System (GFS), в т. ч. с информацией о температурной стратификации.

На геопортале ИВМ СО РАН с октября 2021 г. непрерывно пополняется база данных инструментального измерения вертикальных профилей температуры атмосферы г. Красноярска. Метеорологический температурный профилемер (МТП-5) установлен в центральной части города.

Целью работы является сравнение величин инверсий температуры, полученных по результатам натурных измерений и расчетным методом (модель GFS).

Сравнения выполнены для февраля 2023 г. Продолжительность инверсий в этот месяц составила около 80 %.

В расчете использовали данные о температуре воздуха на высотах измерения прибора МТП-5: 0, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 и 1000 м.

Модель GFS содержит десятки метеопараметров на 127 вертикальных уровнях. В архиве имеются данные о вертикальном распределении температуры в 0, 6, 12 и 18 часов. Для сравнительного анализа архивные данные модели GFS были пересчитаны (методом линейной интерполяции) для высот, на которых измеряет прибор МТП-5.

Сравнение величин интенсивности температурных инверсий по данным МТП-5 и GFS в разное время суток показало, что лучше всего данные сходятся утром и вечером, корреляция составляет 0,88 и 0,85 соответственно. Хуже всего – днем с корреляцией 0,73. В ночное время корреляция составила 0,83.

Общая динамика изменения значений от времени по обоим наборам данных близка. Однако в большинстве случаев модель GFS выдает более низкие значения величины инверсии температуры. Видно, что наибольшие расхождения приходятся для

© Дергунов А. В., Якубайлик О. Э., Заворуев В. В., 2025

12 часов, где средняя разница абсолютных значений составила 3,5 ± 1,3 °С. В 0 часов разница составила 2 ± 0,7 °С, в 6 часов – 2,5 ± 0,8 °С, а в 18 часов – 1,3 ± 0,5 °С.

В результате проделанной работы сделан вывод о том, что модель GFS не всегда передает реальную картину температурной стратификации атмосферы Красноярска, особенно в дневное время.

ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МАСЕЛ

Е. Н. Зайцева*, Т. А. Кулагина

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** Lenap1978@mail.ru*

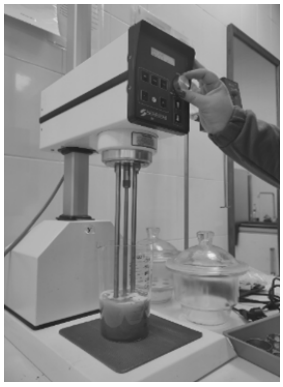
В настоящее время рост количества отходов производства и потребления затрагивает любые предприятия и отрасли страны. Исключением не стало и промышленное развитие Арктики, которое сделало ее хрупкой и крайне уязвимой экосистемой, где в ряде случаев могут наблюдаться необратимые загрязнения природной среды, ставится под угрозу ее уникальная и ценная природа. Ключевой экологический индикатор – это доля переработанных или утилизированных отходов, показывающая, насколько они эффективно используются, будь то превращение отходов в новые товары или их использование в производстве для получения энергии либо обработки. Цель такого подхода – предотвращение негативного влияния на окружающую среду и здоровье людей, а также экономически эффективное использование отходов.

Попадающие в окружающую среду отработанные масла полностью никогда не утилизируются в результате естественных природных процессов. Углеводороды, являясь отходами 3-го класса опасности, не вовлеченные в процесс утилизации, могут бесконтрольно сжигаться, приводя к экологическим загрязнениям от неконтролируемых вредных выбросов сгорания.

Для достижения оптимального сочетания экологической и экономической эффективности при утилизации отработанных нефтепродуктов были созданы методы получения водотопливных эмульсий (ВТЭ), при использовании которых повышается эффективность полного сгорания и уменьшается количество выделяемых CO, Б(а)П и NOx.

Первостепенной была задача, при которой отработанные углеводороды рассматривались как ценный ресурс с возможностью многократного использования. Для этого отработанное масло подвергалось кавитационному воздействию (рис. 1) ультразвуковым генератором LZHZXY, CE 9600 (Китай) и суперкавитационным миксером (СК-миксер Silverson 5L, Великобритания).

ультразвуковой генератор LZHZXY, CE 9600



СК-миксер Silverson 5L

Рис. 1. Кавитационная обработка отработанного масла

© Зайцева Е. Н., Кулагина Т. А., 2025

Полученные в ходе исследований результаты показали, что процесс кавитации повышал вязкость отработанного масла (с 3-го до 5-го класса по ISO 3448), т. е. оно становилось гуще и плотнее, а значит, сохраняло свои приобретенные свойства в работе на малых скоростях (режимах) сильно нагруженных механизмов. Водородный показатель в матричных маслах был более 8,5; в отработанных – 9,7. В первом случае на данное значение влияет наличие присадок, а во втором – процесс эксплуатации оборудования. Кавитационная обработка позволила получить значение данного показателя в диапазоне 7–8,5, что является хорошим результатом.

Кроме этого, фильтрация отработанного масла показала наличие осадка в образцах, а 10-минутное воздействие суперкавитационным миксером визуально доказало его выпадение (1/3 объема) и выделение запаха серы в экспериментах. Таким образом, результаты гидродинамического воздействия позволяют получить ценный кавитированный продукт с потенциалом полного использования отработанных нефтепродуктов, когда 70–80 % объема будет повторно применяться в хозяйственной деятельности, а оставшееся количество сжигаться, с обязательным условием получения товарного продукта (топлива) в виде ВТЭ.

Для создания ВТЭ требуется две среды: вода и масло, которые в естественном состоянии плохо смешиваются, получения же устойчивой эмульсии помогает достичь процесс суперкавитации. Однако такой компонент ВТЭ, как вода, в условиях низких температур северных регионов может подвергнуться естественной заморозке. Поэтому актуальна работа по исследованию качеств активированной воды до и после замораживания.

Вода подвергалась воздействию разных режимов кавитационной обработки с контролем физико-химических параметров анализируемой среды. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при оптимальном режиме кавитационной обработки воды 3 мин/10 тыс. оборотов активированная среда сохраняет измененные свойства до замораживания и после разморозки, может использоваться для создания ВТЭ в условиях Арктики.

Сжигание смеси отработанного масла и воды, взамен исходного 100 % по составу углеводородного топлива, позволяет сократить выбросы вредных веществ, что было подтверждено результатами замеров концентраций выбросов NO_x, CO, SO_2, углерода (сажи) и бен(а)пирена в производственной установке УЗГ-1М на территории базовой кафедры СФУ, при горении следующих видов жидких углеводородных топлив: мазута, ВТЭ10 %, ВТЭ15 % и ВТЭ30 %.

Утилизация отработанных масел не должна иметь территориальной привязанности места образования подобных отходов от расположения предприятий-утилизаторов. В первую очередь это относится к производствам, удаленным от центральной части России, где существуют экономические и климатические ограничения в работе. Сжигать в чистом виде отработанные масла запрещено действующим законодательством, а возможность получения из отработанного масла восстановленного и ВТЭ, с применением эффектов гидродинамической кавитации, дает альтернативу утилизации отработанных масел, как уже накопленных за долгие годы на северных территориях, так и образующихся на действующих предприятиях.

ОЦЕНКА АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА И ОКРЕСТНОСТЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

К. В. Краснощеков[1], О. Э. Якубайлик[2*], В. Ю. Ромасько[1]

[1] ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** oleg@icm.krasn.ru*

Анализ аэрозольного загрязнения атмосферы Красноярска и прилегающих территорий выполняется с использованием спутниковых данных MODIS MCD19A2 и метеоинформации NCEP GFS. Разработан сервис Athmos для обработки данных. Полученные результаты показывают хорошую сопряженность с данными наземного мониторинга.

Красноярск представляет собой активно развивающийся город, где значительное количество промышленных предприятий и рост числа автотранспортных средств оказывают отрицательное воздействие на качество атмосферного воздуха, включая увеличение концентрации твердых взвешенных частиц размером менее 2,5 мкм (PM2.5). Согласно многочисленным исследованиям, повышенные уровни PM2.5 способствуют увеличению частоты респираторных заболеваний и оказывают негативное влияние на среднюю продолжительность жизни населения.

Традиционные подходы к контролю загрязнения воздуха, основанные на использовании стационарных датчиков и станций мониторинга, имеют существенные ограничения, связанные с локальным размещением точек наблюдения. В этом контексте применение спутниковых данных открывает новые возможности для мониторинга качества атмосферного воздуха на обширных территориях. Данный метод позволяет анализировать пространственное распределение и концентрацию взвешенных частиц в районах, не охваченных наземными сетями наблюдения, что способствует получению более комплексной информации о состоянии атмосферы и идентификации источников загрязнения.

В данной работе для анализа аэрозольного загрязнения атмосферы Красноярска и прилегающих территорий использовались спутниковые данные радиометра MODIS (продукт MCD19A2) и метеоинформация модели прогноза погоды NCEP GFS – температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажность воздуха и пр. Продукт MCD19A2 предоставляет глобальные данные о наземной аэрозольной оптической толщине (AOD), полученные на основе измерений, проведенных спутниками Terra/Aqua. Он имеет пространственное разрешение 1 км, что обеспечивает его высокую информативность для анализа пространственного распределения аэрозолей в атмосфере, включая мелкодисперсные частицы. Установленная эмпирическим путем корреляция между значениями AOD и концентрацией взвешенных частиц PM2.5 позволяет использовать эти данные для оценки степени загрязнения атмосферы. При расчете параметров AOD учитываются метеорологические характеристики, предоставляемые набором данных NCEP GFS, что повышает точность и надежность результатов.

В настоящей работе рассматривается аэрозольное загрязнение как над территорией Красноярска, так и в его окрестностях на расстоянии нескольких сотен километров. В этой зоне располагаются несколько городов Красноярского края с высоким уровнем загрязнения – Ачинск, Канск, Минусинск. Для исследуемой территории авторами разработан автоматизированный сервис Athmos, обеспечивающий прием данных

© Краснощеков К. В., Якубайлик О. Э., Ромасько В. Ю., 2025

MODIS и их автоматизированную обработку в квазиреальном режиме времени. Непрерывно пополняемый архив обработанных данных имеет глубину до 2007 г.

Полученные результаты показывают хорошую сопряженность данных наземного мониторинга и вычислений на основе спутниковой информации.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ В НИЖНЕМ 1000-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Т. В. Якубайлик[1], В. В. Заворуев[1*], О. Э. Якубайлик[2]

[1] Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
[2] ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
** valzav@icm.krasn.ru*

В данной статье описана постановка эксперимента по выявлению разницы вертикального распределения температур в центральной части г. Красноярска и над р. Енисей по данным измерений температурных профилемеров МТП-5. Эти измерения позволяют оценить пространственную изменчивость характеристик термической стратификации в пределах г. Красноярска.

Для изучения влияния р. Енисей на накопление примесей в атмосфере г. Красноярска было проведено сравнение вертикального распределения температур над наземной и надводной частями города. Для этих целей использовались два метеорологических температурных профилемера МТП-5. Данный прибор измеряет температуру воздуха в приземном слое до 1000 м, с интервалом в 100 м с погрешностью не более 0,5 °С.

Приборы прошли успешные сравнения с традиционными средствами измерений – радиозондами, привязными аэростатами, датчиками температуры на высотных метеорологических мачтах [1; 2]. Приборы сертифицированы Госстандартом России. Один из них установлен в наземной части города. Высота места установки составляет 135 м над уровнем моря, а высота здания, на крыше которого установлен прибор, – 5 м. Направление сканирующего луча ориентировано в западном направлении на местность с преимущественно одноэтажной застройкой (частный сектор).

Второй прибор установлен в прибрежной зоне о. Посадный, на металлической опоре высотой 1 м, высота над уровнем моря – около 135 метров. Луч ориентирован на восток-юго-восток и проходит над водной поверхностью р. Енисей.

Представленные материалы основаны на обработке данных за последний трехлетний период 2022–2024 гг. (отсутствие почасовых данных измерений не превышает 8 %). Изучались отклонения измерений температуры над водной поверхностью от измерений над сушей по среднемесячным значениям на различных высотах.

Обработка данных показала, что в зимний период разница между измерениями над сушей и измерениями над водой составляет не больше 1 °С в положительную (выше 200 м) либо отрицательную сторону (ниже 200 м). В летний период разница более существенна. Непосредственно у поверхности (25–50 м) она составляет до 2 °С в положительную сторону, на высотах от 100 до 350 м близка к 0, а при приближении к 1000 м достигает 1,5°С в отрицательную сторону.

Объяснение этого явления и связь с другими метеорологическими параметрами является темой дальнейших исследований.

Список источников

1. Кадыгров Е. Н., Миллер Е. А. Результаты сравнений профилей температуры, полученных с помощью дистанционных профилемеров и датчиков высотных метеоро-

© Якубайлик Т. В., Заворуев В. В., Якубайлик О. Э., 2025

логических мачт // Тез. докладов Всерос. научной конференции «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений». Обнинск, 2008. С. 61–64,

2. Кузнецова И. Н., Артамонова А. А., Нахаев М. И. и др. Сравнительный анализ данных высотных наблюдений (Обнинск, Останкино) и микроволновых измерений профилей температуры // Всероссийская научная конференция «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск, 2008. С. 65–69.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ

С. Г. Баякин

ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
fic@ksc.krasn.ru

Современный энергетический уклад нацелен на применение безуглеродных источников энергии во всех направлениях – промышленность, транспорт, авиация, бытовая сфера. Многолетняя практика развития безуглеродных генерирующих решений в направлении гидроэнергетики, ветроэнергетики, солнечной световой и солнечной тепловой энергетики, высокотемпературной геотермальной энергетики показывает жизнеспособность безуглеродного технологического уклада, выявляет недостатки и в то же время создает однозначное понимание правильности безуглеродного технологического уклада в развитии чистой энергетики планеты.

Основным и почти единственным источником энергии для Земли является Солнце, которое передает на земную поверхность удельную усредненную мощность, равную 1367 ватт на один квадратный метр.

Прямое применение низкотемпературной солнечной тепловой мощности для электрогенерации обладает следующими преимуществами:

1) низкотемпературный энергоноситель обладает неограниченным пополняемым солнечным ресурсом;
2) не зависит от погодных и климатических условий;
3) не изменяет энергетический баланс и экологию планеты;
4) не расходует углеводородные ресурсы;
5) не снижает уровень кислорода;
6) не выделяет вредных выбросов;
7) не ограничен географией, включая Арктику и часть Антарктиды.

При этом гигантским накопителем энергии, исключающим энергетические катаклизмы, является воздух, океан и грунт планеты.

Автором разработано, испытанно и запатентовано устройство **«Низкотемпературный электрогенератор»** – современный высокотехнологичный прибор широкого применения: от генерации электрической энергии до отопления, кондиционирования, горячего водоснабжения и автономной работы бытовых приборов. Патенты РФ 2692615, 2738494, патент ЕАПО № 037428, в 4 странах Евразии патент EP37791 в 17 странах ЕС, заявка КНР 343981619.

Существенным преимуществом «Низкотемпературного электрогенератора», схема которого показана на рис. 1, является возможность комбинирования с другими источниками тепла, в зависимости от климатических особенностей местности, а именно:

1. Собственная генерация электрической энергии промышленными предприятиями из низкотемпературных выбросов – избыточное тепло АЭС, ТЭЦ, металлургических гигантов, при существенном снижении углеродного следа.

2. Автономная работа кондиционеров, холодильников, тепловых насосов без подключения к внешнему источнику электрической энергии.

3. Автономное жизнеобеспечение. Ценовая доступность устройства для строящихся объектов. Ориентировочно, инвестиции порядка 10 000 руб./кв. м полностью обеспечивают объект теплом и электрической энергией. «Низкотемпературный электрогенератор» позволит обеспечить комфорт каждый день и круглый год. Дополни-

© Баякин С. Г., 2025

тельно вырабатываемой в ночное время электрической энергии вполне достаточно для зарядки электротранспорта.

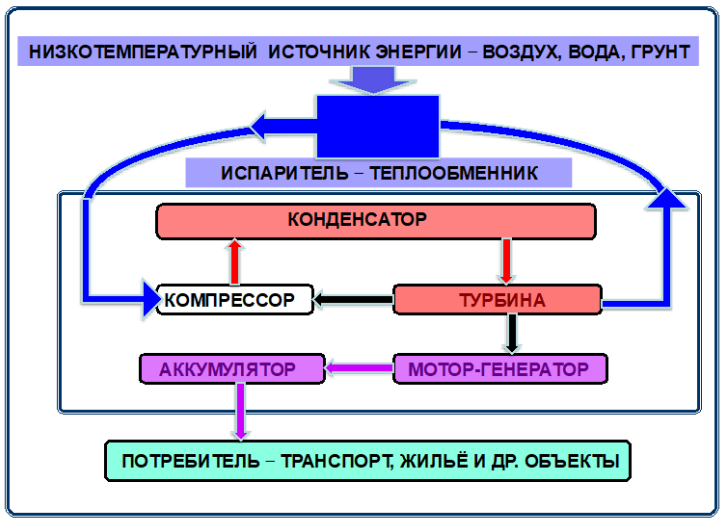


Рис. 1. Схема устройства «Низкотемпературный электрогенератор»

Ключевым фактором создания систем низкотемпературной электрогенерации является экономический фактор в виде удельной стоимости установленной мощности и себестоимости производства мощности. Сравнительная таблица стоимостных показателей приведена на основании данных Международного энергетического агентства IEA (рис. 2).

	Капитальные вложения, $/кВт		Себестоимость производства, цент $/кВт*ч	
	2005	2030	2005	2030
Биомасса	1000-2500	950-1900	3,1-10,3	3,0-9,6
Геотермальная энергетика	1700-5700	1500-5000	3,3-9,7	3,0-8,7
Традиционная гидроэнергетика	1500-5500	1500-5500	3,4-11,7	3,4-11,5
Малая гидроэнергетика	2500	2200	5,6	5,2
Солнечная фотоэнергетика	3750-3850	1400-1500	17,8-54,2	7,0-32,5
Солнечная теплоэнергетика	2000-2300	1700-1900	10,5-23,0	8,7-19,0
Приливная энергетика	2900	2200	12,2	9,4
Наземная ветроэнергетика	900-1100	800-900	4,2-22,1	3,6-20,8
Морская ветроэнергетика	1500-2500	1500-1900	6,6-21,7	6,2-18,4
АЭС	1500-1800	-	3,0-5,0	-
ТЭС на угле	1000-1200	1000-1250	2,2-5,9	3,5-4,0
ТЭС на газе	450-600	400-500	3,0-3,5	3,5-4,5
Низкотемпературная электрогенерация	**> 500 $/кВт**		**~ 0 $/кВт*ч**	

Рис. 2. Удельные капитальные вложения по видам энергетики

Технология низкотемпературной электрогенерации имеет все компоненты для успешного развития современного технологического уклада. Себестоимость капитальных затрат менее 500 $/кВт позволяет совершить плавный энергопереход к экологически чистой безопасной автономной и эффективной электрогенерации.

Список источников

1. Bayakin Sergey Gennadevich 低温发电 LOW-TEMPERATURE ELECTRIC POWER GENERATION Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” Pp. 166. May 14. 2020. Beijing, PRC.

2. Баякин Сергей Геннадьевич «CORPUSCULAR ENERGY MECHANICS» #811-478-572.

3. Sergey G. Bayakin Low-temperature electric power generation. Journal COK 2020. 07 Pp. 55–59.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОСТРУЙНОГО СЖИГАНИЯ В КАЧЕСТВЕ СПОСОБА ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ ВЫБРОСОВ NOX И CO В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Е. П. Копьев[1], И. С. Садкин[1, 2*], Е. Ю. Шадрин[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** sadkinvanya@mail.ru*

Исследуется метод сжигания топлива в струе перегретого водяного пара применительно к камерам сгорания повышенного давления. Экспериментальными методами определяются эффективные соотношения пар/топливо/воздух для достижения наилучших показателей работы устройства. Получены режимы, при которых выбросы оксидов азота и монооксида углерода не превышают 10 ppm. Затраты энергии на генерацию пара не превышают 8 %.

Снижение антропогенного влияния на окружающую среду является одним из основных направлений научно-технического развития современного общества [1]. Значительное сокращение выбросов вредных веществ достигается за счет уменьшения удельного потребления топлива, т. е. повышения эффективности энергоустановок, перехода на более чистые источники энергии и разработки низкоэмиссионных устройств.

В статье экспериментально исследуется метод пароструйного сжигания топлива для низкой эмиссии CO и NO_X при сжигании жидких углеводородных топлив применительно к камерам сгорания повышенного давления. Целью работы является адаптация перспективного метода сжигания применительно к задачам энерготехнологий и создания рабочего тела энергетических установок. Новизна метода состоит в бесконтактном распыле топлива паровой струей и реализации аналога ступенчатого сжигания за счет наличия камеры газогенерации, что позволяет получать сверхмалые выбросы NOx и CO при высокой полноте сгорания топлива. В работе экспериментальными методами определяются эффективные соотношения пар/топливо/воздух для достижения наилучших показателей работы устройства. Продуктами сгорания является газопаровая смесь с потенциалом использования в качестве рабочего тела для энергоустановок.

Для изучения закономерностей в условиях повышенного давления используется модельная камера сгорания (рис. 1). В данной камере сгорания избыточное давление обеспечивается за счет дополнительной подачи воздуха в область отвода продуктов горения. Устройство состоит из корпуса-парогенератора *1*, распылительно-зажигательного устройства (камеры газогенерации) *2*, камеры горения *3*, камеры наддува воздуха *4*, заслонки *5*.

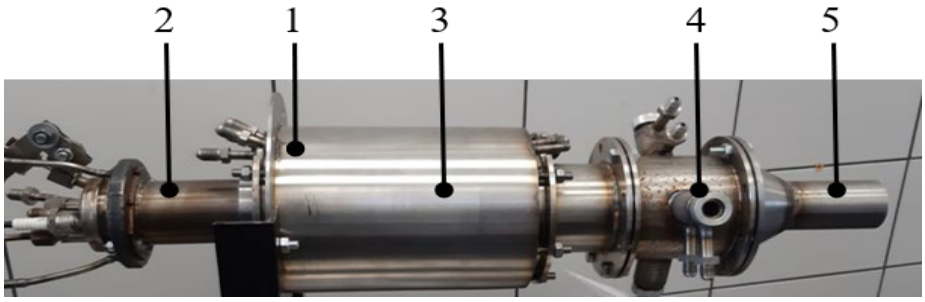


Рис. 1. Модельная камера сгорания

© Копьев Е. П., Садкин И. С., Шадрин Е. Ю., 2025

Учитывая полученные ранее закономерности, характерные для горелочных устройств на основе сжигания топлива в струе перегретого водяного пара [1–3], для исследований были приняты режимы сжигания дизельного топлива с относительным расходом пара к расходу топлива λ не менее 0,6; избытком воздуха в камере газогенерации $\alpha_1 = 0{,}25–0{,}4$ и суммарным коэффициентом $\alpha = 1{,}2–1{,}3$. Исследовалось сжигание дизельного топлива (плотность 840 кг/м^3, вязкость 4,1 сСт, низшая теплота сгорания 42,3 МДж/кг при тепловой мощности *W* устройства 10–15 кВт.

Изучение сжигания дизельного топлива при впрыске перегретого водяного пара проводились при различных соотношениях топливо/пар в условиях изменения давления внутри камеры сгорания за счет подачи сжатого воздуха. Исследован диапазон избыточного окружающей среде давления в камере газогенерации от 0 до 2 атм с шагом 0,5 атм. Верхний предел по давлению обусловлен порогом стабильной работы используемой системы регулирования и подачи жидкого топлива.

На рис. 2 приведено содержание CO и NOx в продуктах сгорания при различном избыточном давлении в камере сгорания.

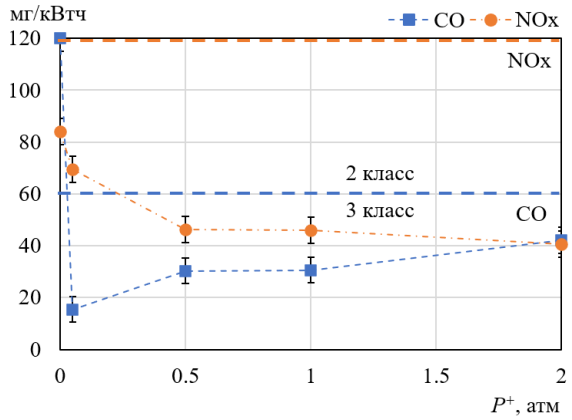


Рис. 2. Содержание CO и NOx в продуктах сгорания при различном давлении в камере сжигания горелочного устройства при мощности 10 кВт, относительном расходе пара λ=0,75, избытке воздуха в горелочном устройстве α=1,2-1,5

В работе экспериментальными методами определены эффективные соотношения пар/топливо/воздух (первичный, вторичный) для достижения наилучших показателей работы устройства: 0,75/1/5/15,1. За счет управления коэффициентом избытка воздуха при повышенном давлении в камере сгорания горелочного устройства с подачей перегретого пара в зону горения реализованы режимы устойчивого горения дизельного топлива, обеспечивающие высокую полноту сгорания и низкие показатели по содержанию монооксида углерода и оксидов азота в продуктах сгорания: CO < 10 ppm, NOx < 10 ppm. Так, низкие показатели по монооксиду углерода в присутствии перегретого водяного пара, вероятно, связаны с тем, что пар интенсифицирует реакции горения и дожигания CO за счет дополнительных гидроксильных радикалов. Низкие показатели по оксидам азота связаны с низкой температурой протекающего процесса, за счет частичной газификации топлива в присутствии перегретого водяного пара.

Полученные экспериментальные результаты востребованы для верификации математических моделей горения углеводородов с добавлением водяного пара, а также для создания низкоэмиссионных и камер сгорания перспективных ГТУ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 23-79-10029 (https://rscf.ru/project/23-79-10029).

Список источников

1. Sadkin I., Mukhina M., Kopyev E., Sharypov O., Alekseenko S. Low-Emission Waste-to-Energy Method of Liquid Fuel Combustion with a Mixture of Superheated Steam and Carbon Dioxide, Energies (Basel) 16 (2023) 5745. URL: https://doi.org/10.3390/en16155745.

2. Anufriev I. S., Kopyev E. P., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Vigriyanov M. S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam, Energy 250 (2022) 123849. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123849.

3. Anufriev I. S., Kopyev E. P., Sadkin I. S., Mukhina M. A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission, Fuel 290 (2021) 120100. URL: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120100.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОЛИБДЕНСОДЕРЖАЩЕГО ВОДНОГО СТОКА

А. У. Аетов[1,2*], З. И. Зарипов[1], С. В. Мазанов[1], Ф. М. Гумеров[1]

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68
[2]Казанский государственный аграрный университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, д. 65
** aetovalmaz@mail.ru*

Одним из ключевых направлений в решении экологических задач является проблема загрязнения окружающей среды, возникающая в процессе переработки углеводородного сырья. Это затрагивает не только вопрос утилизации промышленных стоков, но и включает в себя важный аспект ресурсосбережения. Перенос результатов лабораторных исследований на уровень промышленности требует моделирования, которое, в свою очередь, предполагает наличие обширных знаний о теплофизических свойствах термодинамических систем, участвующих в данном процессе. В настоящее время существующая база данных по этим свойствам является неполной, целью данной работы является ее расширение, а именно определение коэффициента теплопроводности молибденсодержащего водного стока.

Одной из ключевых задач, связанных с решением экологических проблем, является загрязнение окружающей среды, возникающее в процессе переработки углеводородного сырья. Особенно важной в этом контексте оказывается утилизация промышленных водных стоков, которые затрагивают не только экологический аспект, но и ресурсосбережение. В данный момент на территории Российской Федерации главными источниками таких стоков, негативно влияющих на природные водные ресурсы, выступают химическая, целлюлозно-бумажная, текстильная и нефтехимическая отрасли. Особенно тревожит ситуация в целлюлозно-бумажной промышленности, где почти треть всех выбросов – фенольные соединения и их производные – вещества, которые трудно поддаются разрушению. Традиционные методы окисления не обеспечивают необходимой эффективности, в отличие от них использование условий сверхкритического флюида, например, при сверхкритическом водном окислении (СКВО), позволяет достигать практически полного окисления органических соединений в замкнутых системах за короткий срок, превращая их в простые и безопасные для экологии компоненты. Однако это направление сталкивается с множеством трудностей, которые замедляют прогресс в области энергосбережения и ресурсосбережения – от высоких термодинамических параметров процесса до коррозионной активности водных растворов в сверхкритическом состоянии и образования осадков на стенках оборудования. Для дальнейшего успешного развития этого направления необходимы глубокие знания о механизмах реакций, происходящих в многокомпонентных водных растворах, которые часто загрязнены неорганическими соединениями и углеводородами. Масштабирование лабораторных результатов до промышленных объемов требует моделирования, для которого необходимо знание широкого диапазона теплофизических свойств термодинамических систем. Однако существующая база данных по этим свойствам далека от полноты. В настоящее время доступны лишь некоторые теплофизические характеристики отдельных компонентов стоков, таких как вода, ацетофенон, фенол и монопропиленгликоль, представленные в литературе. Исследования свойств систем в околокритической области, как правило, проводились лишь на однокомпонентных или чистых веществах. База данных для бинарных смесей также ограничена, а свойства более сложных много-

© Аетов А. У., Зарипов З. И., Мазанов С. В., Гумеров Ф. М., 2025

компонентных систем остаются практически неизученными, что создает дополнительные вызовы для дальнейших исследований. В данной работе исследована теплопроводность образцов промышленного молибденсодержащего водного стока процесса эпоксидирования на ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Модернизированная экспериментальная установка, используемая в настоящей работе по измерению коэффициентов теплопроводности, позволяет проводить исследования в диапазоне температур 293,15–473,15 К и при давлениях до 60 МПа. Экспериментальная установка реализует метод нагретой нити. В приведенной установке выделяются четыре основных технологических компонента: измерительная система; система создания и поддержания давления; система термостатирования; система сбора и обработки первичной информации. Подробное описание установки и методика описаны в работе [1]. Температурные границы исследования теплопроводности λ молибденсодержащего водного стока (рис. 1) ограничены температурами 363,15 К. Значения теплопроводности молибденсодержащего водного стока ниже данных чистой воды в среднем на 13 %.

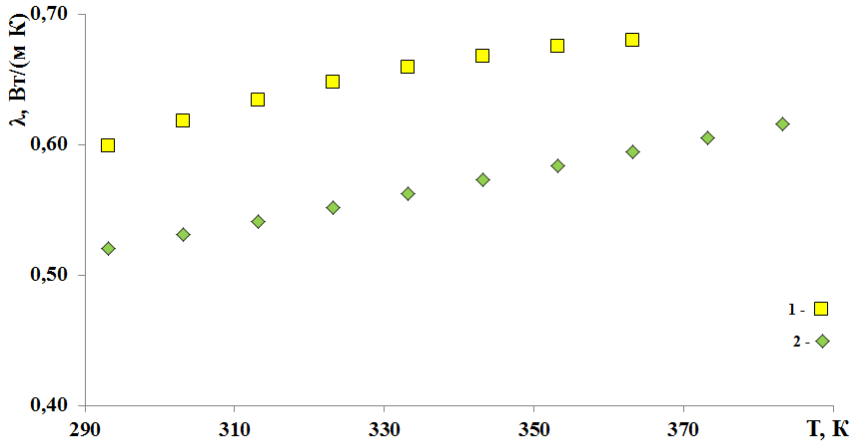


Рис. 1. Теплопроводность молибденосодержащего водного стока при атмосферном давлении:
1 – вода [2]; *2* – настоящая работа (молибденосодержащий водный сток)

В рамках проведения апробации модернизированной установки по измерению значений коэффициентов теплопроводности, для подтверждения полученной достоверности измеряемых данных были проведены опыты по измерению коэффициентов теплопроводности н-октана. Измерены значения по теплопроводности н-октана в диапазоне температур 273,15–363,15 К и при атмосферном давлении. Максимальное отклонение от результатов контрольных измерений составило 1,6 % в сравнении с имеющимися данными в литературных источниках [3].

Исследование проведено при поддержке гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение № 115/2024-ПД).

Список источников

1. Zaripov Z. I., Nakipov R. R., Gumerov F. M., Boncel S., Dzida M., Abdulagatov I. M. Measurements of the thermal conductivity of 1-Ethyl-3-Methylimidazolium thiocyanate at temperatures from (296 to 365) K and at pressures up to 30 MPa // J. of Molec. Liq. 2022. Vol. 357. Pp. 119091.

2. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Наука, 1972. 721 с.

3. Huber M. L., Perkins R. A. Thermal conductivity correlations for minor constituent fluids in natural gas: n-octane, n-nonane and n-decane // Fluid Phase Equilibria. 2005. Vol. 227. Pp. 47–55.

ВЛИЯНИЕ ЗИМНИХ ТУМАНОВ НАД РЕКОЙ ЕНИСЕЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

О. Э. Якубайлик[1*], В. В. Заворуев[2], Т. В. Якубайлик[2]

[1]ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** oleg@icm.krasn.ru*

Исследовано вертикальное распределение температуры в нижнем 1000-метровом слое атмосферы с использованием двух метеорологических температурных профилемеров МТП-5, установленных в Красноярске (в пойме реки Качи и на острове Посадный над Енисеем). Установлено, что зимние туманы над рекой Енисей влияют на вертикальный профиль температуры.

Представлены результаты исследований вертикального распределения температуры в нижнем 1000-метровом слое атмосферы по данным непрерывных измерений двумя метеорологическими температурными профилемерами МТП-5, расположенными в центре Красноярска (низина в пойме р. Качи) и над р. Енисей (в прибрежной зоне о. Посадный). Профилемер МТП-5, основанный на технологии микроволнового дистанционного зондирования, является сертифицированным измерительным прибором и широко применяется Росгидрометом. Согласно данным разработчиков, его точность составляет от 0,2 до 0,5 °С.

В данной работе рассматривается воздействие зимних речных туманов на вертикальное распределение температуры. Его оценка проводилась на основе разницы температур ($\Delta T = T_{над\ сушей} - T_{над\ рекой}$), измеренной синхронно двумя профилемерами в диапазоне высот от 0 до 1 000 м (рис. 1). Полученные данные показывают, что туманы влияют на вертикальное распределение температуры над рекой Енисей.

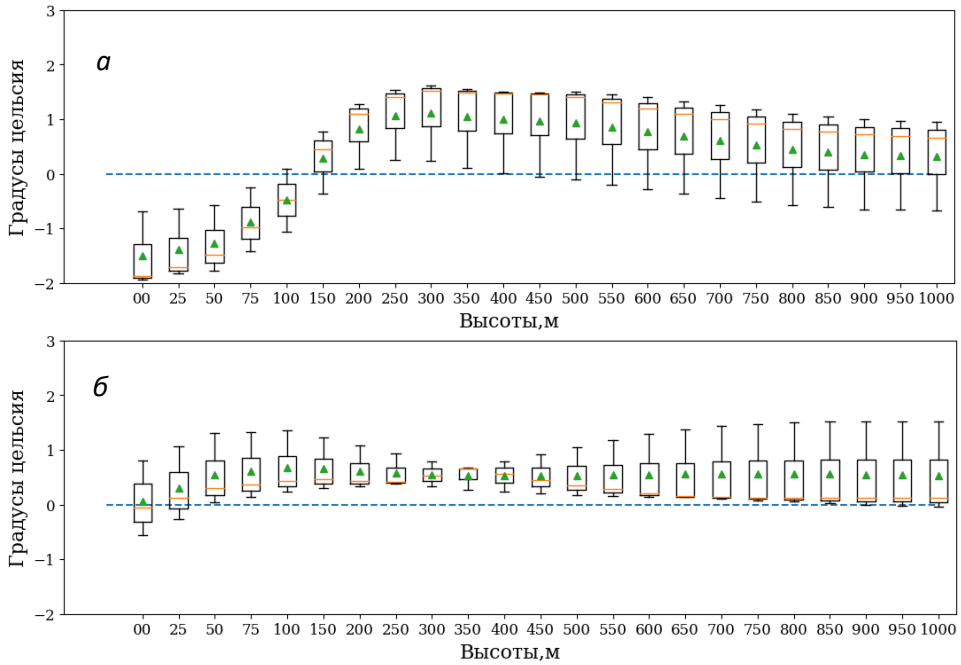


Рис. 1. Разница измерений двух температурных профилемеров ($\Delta T = T_{над\ сушей} - T_{над\ рекой}$) на разных высотах зимой 2023–2024 гг.: *а* – при наличии туманов; *б* – в отсутствии туманов

© Якубайлик О. Э., Заворуев В. В., Якубайлик Т. В., 2025

Полученные результаты многолетнего мониторинга позволяют оценивать температурную стратификацию в пределах г. Красноярска, сезонную динамику и суточный ход вертикального профиля температуры, влияние незамерзающего Енисея и туманов над рекой, скорости ветра, и проч.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НАСЫЩЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ

С. Г. Марченкова

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
smarchenkova@sfu-kras.ru

Изучено влияние различных параметров на величину коэффициентов, характеризующих степень насыщения паровой фазы, в процессах дистилляции с использованием водяного пара. Исследование проведено посредством математического моделирования и относится к условиям дезодорации и дистилляционной нейтрализации масел растительного происхождения.

Дезодорация масел представляет собой процесс паровой дистилляции. Данный вид дистилляции, осуществляемый в барботажном слое, применяется в аппаратах как периодического, так и непрерывного действия. Также используются комбинированные аппараты непрерывного действия, включающие кубовую зону, и аппараты тарельчатого типа. Таким образом, изучение закономерностей, присущих барботажной дистилляции, является актуальной задачей.

Существующие модели коэффициентов насыщения [1–3] основаны на интегрировании уравнения массопередачи, предполагая постоянство равновесной концентрации по высоте слоя жидкости. Это не учитывает изменения гидростатического давления в барботажном слое. Ригамонти и Джианетто попытались учесть этот фактор, их результаты ограничены пузырьковым режимом барботажа, который не является наиболее эффективным с точки зрения массопереноса. Критериальные уравнения Сийрде [4] также ограничены высотой барботажного слоя до 60 мм.

В связи с этим была предпринята попытка разработать более общие уравнения для расчета коэффициентов насыщения паровой фазы при дистилляции с использованием острого пара, учитывающие изменение гидростатического давления по высоте барботажного слоя.

Для построения математической модели в данных условиях приняты следующие исходные соотношения:
уравнение равновесия жидкой и паровой фаз:

$$y = \frac{P_{\text{А}}}{P} \cdot x; \tag{1}$$

уравнение, характеризующее распределение давлений по высоте барботажного слоя:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h; \tag{2}$$

уравнение материального баланса по переходящему компоненту:

$$G \cdot (x_{\text{вх}} - x) = L \cdot y_{\text{к}}; \tag{3}$$

кинетическое уравнение отгонки:

$$dy = \beta \cdot (x - x_{\text{Р}}) \cdot d\tau. \tag{4}$$

Здесь приняты следующие обозначения: *y, yк* – мольные концентрации переходящего компонента в паровой фразе (текущая и конечная соответственно); *P0 ,P,PA* –

© Марченкова С. Г., 2025

давления: над поверхностью жидкости в аппарате, в барботажном слое: паров чистого переходящего компонента при температуре дистилляции соответственно; *x,xвх ,xP* – мольные концентрации переходящего компонента в жидкой фазе: средняя по кубовой зоне, на входе в куб, равновесная (соответственно); ρ – плотность жидкой фазы; *g* – ускорение свободного падения; *h* – расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки в глубине слоя; β – кинетический коэффициент отгонки; τ – время; *G*, *L* – мольные расходы жидкости и острого пара в кубе.

Решение системы (1)–(4) получено в следующем безразмерном виде:

$$\varphi(\bar{h}) = \sqrt{\pi} \cdot C \cdot exp(C^2) \cdot exp\left(2 \cdot K_{\text{А}} \cdot K_{\tau H} \cdot \bar{h} + A^2 \cdot \bar{h}^2\right) \cdot$$

$$\cdot \frac{erf(A+C) - erf(A \cdot \bar{h} + C)}{1 + K_\mu \left(\sqrt{\frac{\pi \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}{K_{\text{А}}}} \cdot exp(C^2) \cdot \left(erf(A+C) - erf(C)\right) \right)}, \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{к}} = K_{\text{А}} \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}{K_{\text{А}}}} \cdot exp(K_{\text{А}} \cdot K_H \cdot K_{\tau H}) \right.\right.$$

$$\left.\left. \cdot \left(erf\left(\sqrt{\frac{K_{\text{А}} \cdot K_{\tau H}}{K_H}} + + \sqrt{K_{\text{А}} \cdot K_H \cdot K_{\tau H}} \right) - erf\left(\sqrt{K_{\text{А}} \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}\right) \right) \right)^{-1} + K_\mu \right)^{-} \quad (6)$$

Величины $K_{\text{А}}$, K_H, $K_{\tau H}$, K_μ являются критериями, введены для упрощения записи.

Значение $\bar{\varphi}(\bar{h})$ представляет собой функцию, зависящую от координаты (высоты барботажного слоя), и отражает степень насыщения паровой фазы компонентом, переходящим в произвольном месте по высоте барботажного слоя. Значение $\varphi_{\text{к}}$ определяет степень насыщения паровой фазы переходящим компонентом непосредственно на поверхности барботажного слоя.

Представленная математическая модель способна функционировать как независимая система (непрерывная или периодическая дистилляция в перегонном кубе) или как элемент комплексной математической модели непрерывного аппарата, охватывающего кубовую часть. Также она может быть применена в качестве модели тонкослойной дистилляции (на тарелке). Это подчеркивает широкий спектр применения разработанных формул.

Список источников

1. Bailey Anton E. Industrial Oil and Fat Products. New York: Hardcover – Import, 1951, 893 p.

2. Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1991. 194 с.

3. Авроров В. А. Процессы и аппараты пищевых производств. М. : Инфра-Инженерия, 2023. 796 с.

4. Сийрде Э. К. Дистилляция. Л. : Химия, 1971. 216 с.

Секция 4
Теплофизика и гидродинамика в однофазных средах

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ВЫХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Р. Х. Абдрахманов*, И. А. Чохар, В. И. Терехов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** abriofh@mail.ru*

В работе приводятся результаты экспериментального исследования течения в вихревой камере с тангенциальным подводом при смещении выходного отверстия относительно оси симметрии. Рассмотрены случаи, когда величина смещения *e* выходного отверстия была 0, 30, 60 мм. Было отмечено, что смещение выходного отверстия достаточно сильно искажает поле течения в меридиональном и поперечном сечениях. Распределение статического давления также претерпевает серьезные изменения.

Спектр применения течения с закруткой достаточно обширен. Внедрение технологий, использующих закрученный поток, позволяет повысить производительность аппаратов, упростить конструкцию, уменьшить габариты и интенсифицировать протекающие в них процессы. Для управления процессами в таких устройствах, их оптимизации и масштабирования необходимо знать, как влияют те или иные элементы конструкции на гидродинамику и сопровождающие ее процессы.

К настоящему времени проведены обширные исследования по изучению влияния различных конструктивных элементов на аэродинамику вихревых камер [1–8]. Одним из наиболее важных элементов конструкции вихревой камеры является выходное отверстие. Уменьшение отношения диаметра выходного отверстия к внутреннему диаметру вихревой камеры кардинально перестраивает структуру потока, создавая сильное разрежение на оси камеры и заставляя поток вращаться в окрестности оси со скоростью, превышающей скорость на входе в камеру [2]. В литературе не так много работ, в которых было рассмотрено влияние смещения выходного отверстия относительно оси камеры [9–13]. Но относительные смещения были не настолько большими, чтобы можно было говорить о полноте знаний по этому вопросу.

В данной работе проведен цикл экспериментальных исследований влияния смещения выходного отверстия относительно оси симметрии вихревой камеры, в диапазоне тангенциальных чисел Рейнольдса $\mathrm{Re}_{\varphi K} = 1{,}1\cdot10^4$–$6{,}6\cdot10^4$. Измерения проведены методом лазерной доплеровской анемометрии. Также были получены распределения статического давления по радиусу глухого торца вихревой камеры.

Схема вихревой камеры показана на рис. 1. Ее геометрия была следующей: внутренний диаметр $D_K = 200$ мм; высота $H_K = 200$ мм; диаметр подводящих отверстий $d_{IN} = 4$ мм; количество подводящих отверстий в вертикальном ряду $N = 10$; количество вертикальных рядов подводящих отверстий $N_{IN} = 4$; расстояние между осями отверстий в каждом ряду составляет $a = 15$ мм; расстояние от оси крайнего отверстия ряда до торца $b = 30$ мм; суммарная площадь входных отверстий $S_{IN} = 5{,}03\cdot10^{-4}$ м^2; диаметр выходного отверстия $d_{OUT} = 30$ мм; площадь выходного отверстия $S_{OUT} = 7{,}069\cdot10^{-4}$ м^2; относительный диаметр выходного отверстия $d_{OUT}/D_K = 0{,}15$.

На рис. 2 представлены распределения по радиусу вихревой камеры безразмерных осевой компоненты скорости и циркуляции.

© Абдрахманов Р. Х., Чохар И. А., Терехов В. И., 2025

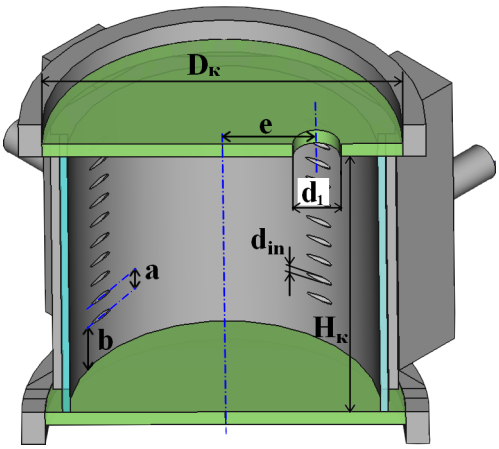


Рис. 1. Схема вихревой камеры

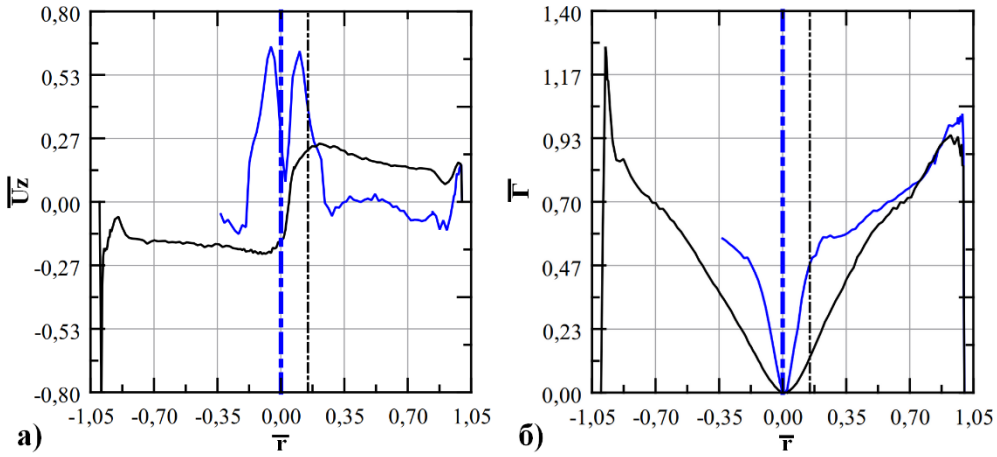


Рис. 2. Относительные осевая компонента скорости (а) и циркуляция (б). Данные получены на середине высоты камеры $z/H_K = 0.5$, $Re_{\varphi K} = 1{,}1*10^4$. Синие линии соответствует $e = 0$, черные – $e = 30$ мм. Штрихпунктирные линии показывают положение оси выходного отверстия

Как видно из приведенных графиков, смещение оси выходного отверстия практически не нарушает вращение потока, только в пристенной области наблюдаются различия. В осевом направлении движение среды отличаются кардинально.

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 24-19-00358.

Список источников

1. Халатов А. А., Авраменко А. А., Шевчук И. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 5. Киев, 2000. 474 с.

2. Смульский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск, 1992. 301 с.

3. Штым А. Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камерах. М., 2000. 412 с.

4. Сабуров Э. Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск, 1995. 341 с.

5. Roschke E. J. Flow Visualization Studies of a Confined Jet-Driven Water Vortex // National Aeronautics and Space Administration Report NASA – CR-79941, 1966. 31 pp.

6. Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L., Shtork S. I. Helical vortices in swirl flow // J. Fluid. Mech. 1999. Vol. 382. P. 195–243.

7. Лебедев В. П., Лукашов В. В., Абдрахманов Р. Х. Аэродинамика и турбулентные характеристики вихревых камер при разных способах организации входа и выхода газового потока // Теплофизика и Аэромеханика. 2004. Т. 11, № 2. С. 217–226.

8. Dremov S. V., Shtork S. I., Kabardin I. K. Determining the parameters of vortex structures in a hydrodynamic vortex chamber //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2018. V980. N 1. P. 012013.

9. Grundmann S., Wassermann F., Lorenz R., Jung B., Tropea C. Experimental investigation of helical structures in swirling flows //Int. J. Heat Fluid Flow. 2012. 37 Pp. 51–63.

10. Chang C. Y., Jakirlic S., Dietrich K., Basara B., Tropea C. Swirling flow in a tube with variably-shaped outlet orifices: An LES and VLES study // Int. J. Heat Fluid Flow. 2014. 49. P. 28–42.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ТРЕХ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ОТКРЫТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ

М. В. Тинтулова[1, 2*], И. В. Наумов[1, 2],
Б. Р. Шарифуллин[1, 2], В. Н. Штерн[3]

[1] Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Shtern Research and Consulting, Houston, Texas, 77096, USA
** m.tintulova@g.nsu.ru*

В поисках оптимальной схемы течения для роста культуры в биореакторах были обнаружены необычные структуры течения, которые существующие теоретические модели не могут объяснить в полной мере. Три несмешивающиеся жидкости различной плотности заполняют открытый цилиндрический контейнер с нижним вращающимся диском. Центробежная сила отталкивает нижнюю жидкость от оси к периферии вблизи дна, создавая ее тороидальную циркуляцию, которая, в свою очередь, приводит в движение среднюю и затем верхнюю жидкости. С увеличением вращения вблизи интерфейсов развиваются противотоки, а при малой толщине возникает зона, где происходит развитие второй ячейки с обратной циркуляцией. По мере уменьшения толщины зона обратной циркуляции расширяется и занимает почти весь объем средней жидкости.

Развитие воздушно-вихревых биореакторов [1–4] привлекло внимание исследователей к закрученным потокам двух несмешивающихся жидкостей, заполняющих цилиндрический контейнер. Тороидальная циркуляция в цилиндре обеспечивает эффективное перемешивание, способствующее росту биологических культур [2]. Простейшей моделью вихревого биореактора служит вертикальный цилиндрический контейнер, нижний диск которого вращается, создавая закрученный замкнутый поток, в то время как боковая стенка контейнера неподвижна [4]. Простая геометрия устройства и ограниченный характер движения жидкостей облегчают подробные экспериментальные и расчетные исследования. Недавние работы показали, что вихревые потоки двух несмешивающихся жидкостей имеют несколько парадоксальных свойств, имеющих фундаментальное и практическое значение [5]. В данной работе изучается движение трех несмешивающихся жидкостей в цилиндрическом контейнере, генерируемое вращением нижнего диска.

Экспериментальное исследование проводилось в открытом цилиндрическом контейнере с нижним вращающимся диском (рис. 1). Цилиндрический контейнер (радиус $R = 72$ мм, высота $H = 300$ мм) выполнен из оптически прозрачного стекла. Движение жидкости задавалось нижним вращающимся диском радиусом $R_D = 71{,}5$ мм. В качестве нижней жидкости (L) использовался 85 %-ный водный раствор глицерина (плотность $\rho_L = 1\,220$ кг/м^3, кинематическая вязкость $\nu_L = 90$ мм^2/с), в качестве средней жидкости (M) использовалось подсолнечное масло ($\rho_M = 916$ кг/м^3, $\nu_M = 41{,}9$ мм^2/с), а в качестве верхней жидкости (U) использовался спиртовой раствор глицерина (спирт-глицерин 1:6, $\rho_U = 897$ кг/м^3, $\nu_U = 4.5$ мм^2/с). Экспериментальные исследования структуры течения были выполнены при высоте средней жидкости h_M от $0{,}1R$ до R, высота нижней h_L и верхней h_U жидкости равнялись R. Исследования проводились при помощи метода PIV в горизонтальных сечениях в средней жидкости на расстоянии 1 мм от границы с нижней жидкостью (сечение *S1*) и на 1 мм ниже границы с верхней жидкостью

© Тинтулова М. В., Наумов И. В., Шарифуллин Б. Р., Штерн В. Н., 2025

(*S2*), а также в верхней жидкости на 1 мм выше границы со средней жидкостью (*S3*) (рис. 1). Интенсивность течения характеризовалась числом Рейнольдса $\mathrm{Re} = \omega R^2/\nu_L$.

Центробежная сила толкает нижнюю жидкость (*L* – водный раствор глицерина) от оси к периферии у дна, создавая меридиональную циркуляцию, и приводит в движение среднюю жидкость (*M* – подсолнечное масло) и верхнюю жидкость (U – спиртовой раствор глицерина). При определенных условиях с усилением вращения на обеих поверхностях раздела (*LM* и *MU*) возникают противотоки: движение к (от) оси под (над) границей раздела (рис. 2, *а*). При небольшой толщине слоя средней жидкости в нем вблизи стенок контейнера возникает зона, где происходит развитие второй ячейки с обратной циркуляцией (рис. 2, *б*). При увеличении Re зона обратной циркуляции расширяется и занимает почти весь объем средней жидкости. Эти противоречивые результаты ждут своего теоретического объяснения и формулировки новых условий контакта на границах *LM* и *MU*.

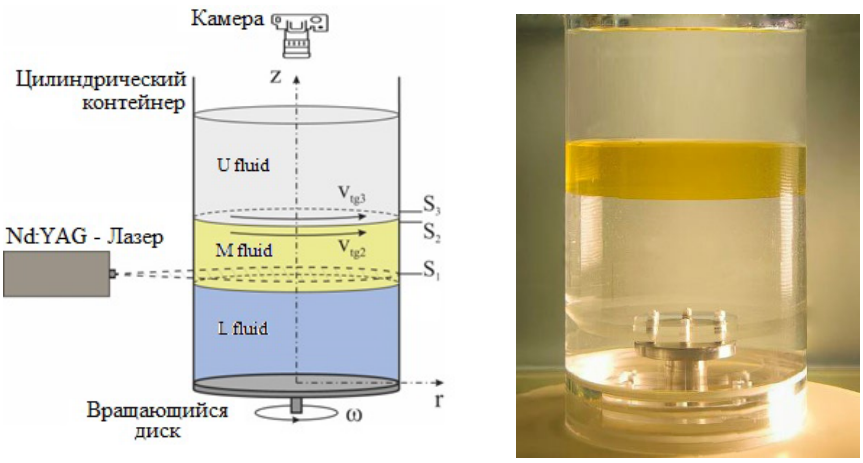


Рис. 1. Схема и фото экспериментальной установки

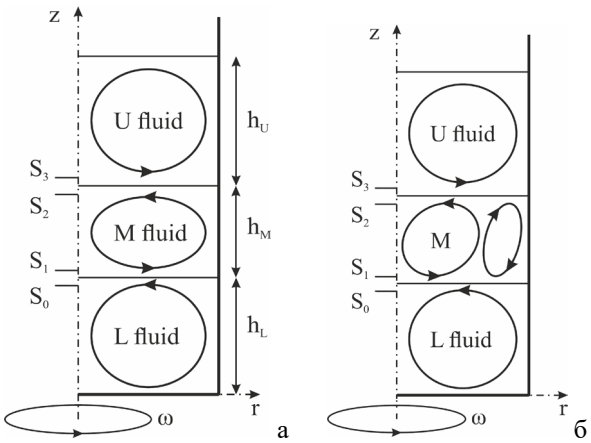


Рис. 2. Схема течения при Re = 180 (*а*) и схема течения с зоной обратной циркуляции при Re = 220 и $h_M = 0{,}4R$ (*б*)

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 24-19-00233 (https://rscf.ru/project/24-19-00233).

Список источников

1. Liow K. Y. S., Tan B. T., Thouas G. A., Thompson M. C. CFD modeling of the steady-state momentum and oxygen transport in a bioreactor that is driven by an aerial rotating disk // Modern Phys. Lett. B. 2009. Vol. 23. Pp. 121–127.

2. Sharifullin B. R., Skripkin S. G., Naumov I. V., Zuo Z., Li B., Shtern V. N. Intense vortex motion in a two-phase bioreactor // Water. 2022. Vol. 15. P. 94.

3. Jacono D. lo, Nazarinia M., Brøns M. Experimental vortex breakdown topology in a cylinder with a free surface // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21. P. 111704.

4. Naumov I. V., Gevorgiz R. G., Skripkin S. G., Tintulova M. V., Tsoy M. A., Sharifullin B. R. Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor // Chem. Eng. 2023. Vol. 191. P. 109467.

5. Naumov I. V., Tintulova M. V., Sharifullin B. R., Shtern V. N. Topological transformations of meridional motion in a three-liquid vortex // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36. P. 061703.

СТРУЙНЫЕ РЕКУПЕРАТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА

Ю. Л. Леухин, П. Д. Алексеев*

Северный Арктический федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Российская Федерация, Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17
** p.alekseev@narfu.ru*

В работе исследованы различные схемы эвакуации отработанных газов в струйных рекуперативных устройствах. Рассматривается их влияние на теплоотдачу и аэродинамику. Для анализа взаимодействия струй с вогнутыми поверхностями кольцевых каналов использованы методики физического и математического моделирования. Представлены уравнения для расчета теплообмена и предложены конструктивные решения для интенсификации, что может быть использовано при проектировании рекуперативных устройств струйного типа.

Струйный обдув является одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена на рабочих поверхностях рекуперативных устройств. Преимущество струйного натекания теплоносителя заключается не только в значительном повышении уровня теплоотдачи, но и в возможности достаточно простого ее управления. В различных конструкциях струйных рекуператоров обдув теплопередающих поверхностей может осуществляться как со стороны нагреваемого воздуха или дымовых газов, так и с обеих ее сторон. Определенное влияние на интенсивность и равномерность теплоотдачи обдуваемой поверхности имеет система эвакуации отработавших газов, которая может осуществляться по прямоточной, противоточной или двухсторонней (комбинированной) схемам (рис. 1), распределение давления в подводящем и отводящем потоки каналах, а также влияние отработавшего сносящего потока в отводящем канале.

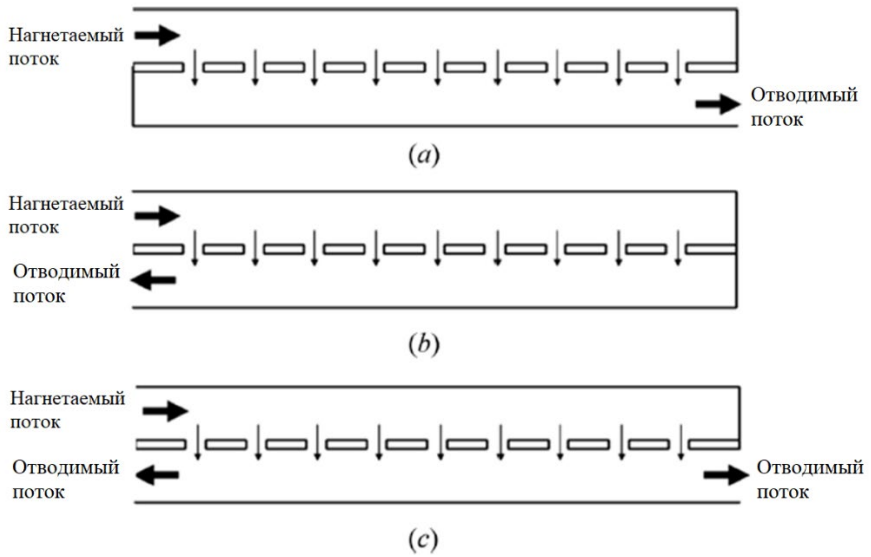


Рис. 1. Схемы эвакуации отработавших газов:
a – прямоточная; *b* – противоточная; *c* – комбинированная

Исследования аэродинамики и теплоотдачи при взаимодействии импактных струй с внешней (вогнутой) поверхностью кольцевого канала при различных системах эвакуации выполнены методами физического и математического моделирования. При

© Леухин Ю. Л., Алексеев П. Д., 2025

физическом моделировании теплоотдачи применялись паровые калориметры различных конструкций, а математическое моделирование выполнялось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent 15.0.

Исследования двухстороннего отвода отработавшего газа (рис. 1, *c*) представляют интерес как с точки зрения проектирования и расчетов систем охлаждения внешней поверхности коротких кольцевых каналов, так и при изучении закономерностей теплоотдачи при отсутствии влияния сносящего потока [1].

Установлено, что теплоотдача и аэродинамика коротких кольцевых каналов при значениях коэффициента вдува $M^* > 10$ ($M^* = (\rho_c V_c)/(\rho_п V_п)$, где V_c и $V_п$ – скорости струй и сносящего потока; ρ_c и $\rho_п$ – плотности потока при температурах струй и сносящего потока, определяется только безразмерным параметром A_f, который представляет собой отношение общей площади выдувных отверстий к площади обдуваемой поверхности теплоотдачи. Обобщающее уравнение для средней теплоотдачи выполнено в следующих диапазонах изменения безразмерных геометрических и режимных параметров: относительный шаг расположения выдувных отверстий на внутренней трубе $S/d_c = 3{,}49$–$24{,}92$; относительное расстояние от перфорированной вставки до поверхности теплообмена $h/d_c = 4{,}5$–$8{,}1$; параметр $A_f = (0{,}094$–$4{,}253) \cdot 10^{-2}$, число Рейнольдса $\mathrm{Re} = 873$–19658:

$$\mathrm{Nu}=1{,}285 \cdot A_f \cdot \mathrm{Re}^{0{,}61 \cdot A_f^{-0{,}06}} \cdot \varepsilon_{A_f}, \quad (1)$$

где ε_{Af} – коэффициент, учитывающий снижение теплоотдачи при редком расположении выдувных отверстий (при $A_f \leq 0{,}0034$ и $S/d_c > 12{,}4$), рассчитывается по уравнению

$$\varepsilon_{\mathrm{Af}} = 11{,}7\mathrm{A}_{\mathrm{f}}^{0{,}43}. \quad (2)$$

Числа Nu и Re в уравнении (1) определялись по диаметру выдувного отверстия и скорости струи, параметры потока по температуре струй.

Вариант противоточного движения нагнетаемого и отводимого потоков (рис. 1, *b*) представляет интерес с точки зрения разработки струйных модульных рекуператоров большой относительной длины [2]. Устранение негативного влияния сносящего потока и выравнивание интенсивности теплоотдачи по длине поверхности при $M^* \leq 10$ можно осуществить за счет увеличения к выходному сечению канала параметра A_f, например диаметра отверстий, по уравнению

$$\mathrm{A}_f = \left[\frac{\alpha}{33 \cdot [1{,}032 - 3{,}2/(M^*)^2]}\right]^{1{,}56} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, определяемый по уравнению (1).

При прямоточном варианте движении потоков (рис. 1, *a*), который имеет место при струйной подаче дымовых газов в конвективной ступени рекуператора рекуперативно-горелочного блока [3], наблюдается очень низкая интенсивность теплоотдачи на поверхности напротив первых по ходу движения потоков отверстий – у глухого торца отводящего канала (рис. 1, слева).

Проблему интенсификации теплоотдачи и повышения ее равномерности по поверхности удалось решить за счет следующих конструктивных решений: входная часть перфорированной трубы отводящего канала была выполнена в форме внутренней четверти тора, на ее внешней поверхности перед отверстиями установлены выступы, а у глухого торца отводящего канала; за счет установки кольцевого рассекателя потока были образованы вихревые камеры. Предлагаемая конструкция позволит увеличить

конечную температуру нагреваемого воздуха и обеспечит повышение тепловой эффективности рекуперативного устройства.

Список источников

1. Леухин Ю. Л., Алексеев П. Д. Исследование теплоотдачи вогнутой поверхности коротких кольцевых каналов при натекании на нее импактных струй // Современные проблемы теплофизики и энергетики : мат-лы IV междунар. конф., Москва, 21–25 октября 2024 г. М. : Национальный исследовательский университет МЭИ, 2024. С. 102–103. EDN ITSQIT.

2. Патент № 2808888 C1, Российская Федерация, МПК F23L 15/04. Теплообменный элемент рекуператора: № 2023111309: заявл. 02.05.2023: опубл. 05.12.2023 / Ю. Л. Леухин, П. Д. Алексеев; заявитель: Северный федеральный университет. EDN RMNSEO.

3. Патент № 2756713 C1, Российская Федерация, МПК F23L 15/04. Рекуперативно-горелочный блок: № 2021106636: заявл. 15.03.2021: опубл. 04.10.2021 / Ю. Л. Леухин, П. Д. Алексеев, Е. В. Панкратов; заявитель: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова. EDN VGWRSJ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

А. С. Герасимов*, Н. А. Назаров, В. И. Терехов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** a.gerasimov99@mail.ru*

В данной работе проведено экспериментальное исследование аэродинамики пульсирующего потока в прямоугольном канале 150 × 20 мм. Измерения проводились с помощью метода PIV (Particle Image Velocimetry). Источником вынужденных колебаний выступала симметричная заслонка, а фазы (углы) ее поворота были синхронизованы с измерительной системой. Рабочим газом являлся воздух, который всасывался в измеряемый участок из свободного объема. Опыты были проведены как без вращения заслонки 0 Гц, так и в диапазоне частот от 6 до 30 Гц. Профили продольных скоростей в безразмерных координатах хорошо обобщаются между собой при разных частотах. Получено, что наложенные пульсации слабо влияют на интегральные характеристики пограничного слоя и на коэффициент трения на стенках канала.

Исследования пульсирующих течений мотивировано их активным применением в современной биомедицине [1], при изучении природных явлений [2], в машиностроении [3] и повышении эффективности охлаждения микроэлектроники [4]. В связи с этим пульсирующее течение является одним из способов интенсификации теплообмена, так как наложенные пульсации вносят изменения в структуре пограничного слоя, что влияет на теплообмен с обтекаемой поверхностью.

Для изучения структуры и параметров пульсирующего течения и потока без наложенных пульсаций (стационарный случай) использовался метод PIV-измерений (Particle Image Velocimetry).

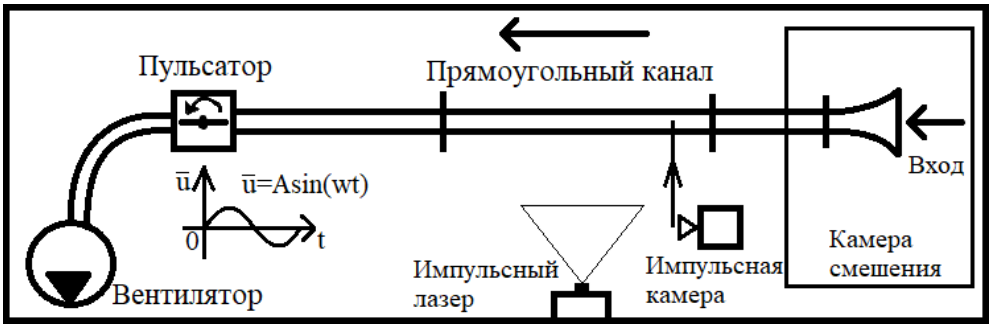


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Рабочим газом являлся воздух при комнатной температуре, который всасывается в канал через входное профилированное сопло из «буфера частиц» размером 1000 × 1000 × 1000 мм. Под «буфером частиц» подразумевается куб, в котором происходит смешение воздуха с частицами глицерина, необходимого для реализации метода PIV. Размер рабочего участка прямоугольного сечения составлял 150 × 20 × 600 мм. После канала установлен пульсатор – это симметричная вращающаяся лопатка, которая периодически с задаваемой частотой открывает выход потоку либо запирает его. Также на валу заслонки был установлен специальный диск для определения ее фазы (угла поворота) в момент вращения. Фаза вращения фиксировалась датчиком, включающим в себя оптическую пару. Датчик выступает в роли триггера для синхронизации поло-

© Герасимов А. С., Назаров Н. А., Терехов В. И., 2025

жения-фазы заслонки и скоростной камеры. За пульсатором стоит вентилятор, реализующий работу установки в режиме всасывания.

Число Рейнольдса в проведенных экспериментах [5], рассчитанное по осредненной по сечению и времени скорости и гидравлическому диаметру, было равным $Re = 1{,}37 \cdot 10^4$.

Методом PIV-измерений были получены профили продольных скоростей осредненные по фазе пульсирующего потока в диапазоне частот F от 6 до 30 Гц при амплитуде $A = 0{,}4$; в т. ч. и при отсутствии пульсаций потока.

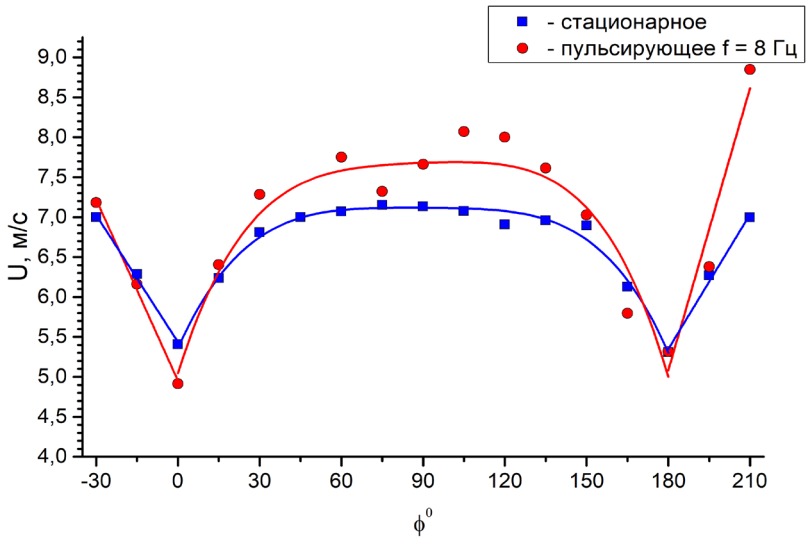


Рис. 2. Значения осевой скорости на оси канала при различных фазах течения для неподвижной и вращающейся заслонки

В рамках проведенных экспериментов были определены интегральные характеристики пограничного слоя и коэффициент трения на стенке. Продольные компоненты скорости в безразмерных координатах хорошо обобщаются между собой и описываются степенным профилем скорости 1/7 в развитом турбулентном пограничном слое. Исходя из полученных результатов можно сказать, что при наличии пульсаций расхода интегральные характеристики пограничного слоя и коэффициент трения на стенке слабо изменяются в сравнении со стационарной постановкой эксперимента.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 24-19-00358.

Список источников

1. Herrera-Valencia E. E. et al. On the pulsating flow behavior of a biological fluid: human blood // Rheol. Acta., 2017, Vol. 56, № 4, pp. 387–407.

2. Li Y. et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters // Irrigat. Sci., 2012, Vol. 30, pp. 43–56.

3. Cumpsty N. A., Greitzer E. M. A simple model for compressor stall cell propagation // J. Eng. Power., 1982, Vol. 104, № 1, pp. 170–176.

4. Sheriff H. S., Zumbrunnen D. A. Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet // J. Heat Transfer., Vol. 116, № 4, pp. 886–895, 1994.

5. Назаров Н. А., Герасимов А. С., Терехов В. В., Терехов В. И. Экспериментальное исследование пульсирующего потока в прямоугольном канале // Теплофизика и аэромеханика. 2024. № 6.

МНОГОУРОВНЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА В КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗИФИКАТОРАХ ОПИЛА: ОТ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ЧИСЛЕННОМУ АНАЛИЗУ

М. И. Ершов[1, 2*], Н. А. Абаимов[1], А. Д. Никитин[1], В. Г. Тупоногов[1], С. В. Алексеенко[1, 3], А. Ф. Рыжков[1]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
[2]ООО «ПЛМ Урал»
620131, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Металлургов, д. 16б
[3]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** miershov@urfu.ru*

Представлено комплексное исследование газификации опила в коническо-цилиндрических реакторах, усложненное неправильной (игольчатой, пластинчатой) формой частиц. Разработана и валидирована CFD-DEM-модель, учитывающая массообмен, различные законы аэродинамического сопротивления и реальную геометрию биомассы. Результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает корректность моделей и важность учета ориентации частиц для оптимизации гидродинамических режимов и повышения эффективности газификации.

Газификационные процессы в коническо-цилиндрических реакторах, работающих с опилом, представляют особый интерес из-за неправильной (игольчатой, пластинчатой) формы частиц, что затрудняет расчет гидродинамики и повышает значение ориентации частиц в потоке для определения коэффициентов гидравлического сопротивления [1].

В настоящей работе рассматривается комплексное исследование газификации биомассы (опила) в поточном режиме на базе пилотной установки (рис. 1, *а*) производительностью 8–20 кг/ч по топливу и опытно-промышленной установки (рис. 1, *б*) производительностью до 3 т/сут (3 000–5 000 нм^3 газа/сут).

Для углубленного исследования гидродинамики и массообмена была разработана и валидирована CFD-DEM-модель движения частиц биомассы на основе экспериментов по псевдоожижению опила в плоской модели газификатора (рис. 1, *в*) при комнатной температуре. Модель опирается на совместное использование решателя сплошной среды Ansys Fluent® 2021 R1 (CFD) и специализированного DEM-решателя Rocky DEM® 2021 R1, позволяющего учитывать реальные (неправильные) формы частиц.

В рамках данной мультифизической постановки была внедрена модель массообмена для описания процессов снижения массы и уничтожения частиц в результате воздушной газификации. Одновременно для пилотной установки, максимально приближенной к реальным поточным режимам, протестирована CFD-модель стационарного трекинга частиц с учетом массообмена, что позволило сократить вычислительные ресурсы и упростить анализ крупных систем.

Проверялось несколько законов аэродинамического сопротивления, включая модель Hölzer&Sommerfeld [2] с поправкой Di Felice [3] и модель Gidaspow [4], а также варьировались формы и плотность частиц (сферы, сфероцилиндры и пластинки с плотностью 300 и 520 кг/м^3).

На основании проведенных CFD- и CFD-DEM-расчетов исследовались усредненные поля давлений, концентраций (частиц и газов), а также скоростей (потока и частиц). Также анализировались амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления.

© Ершов М. И., Абаимов Н. А., Никитин А. Д., Тупоногов В. Г., Алексеенко С. В., Рыжков А. Ф., 2025

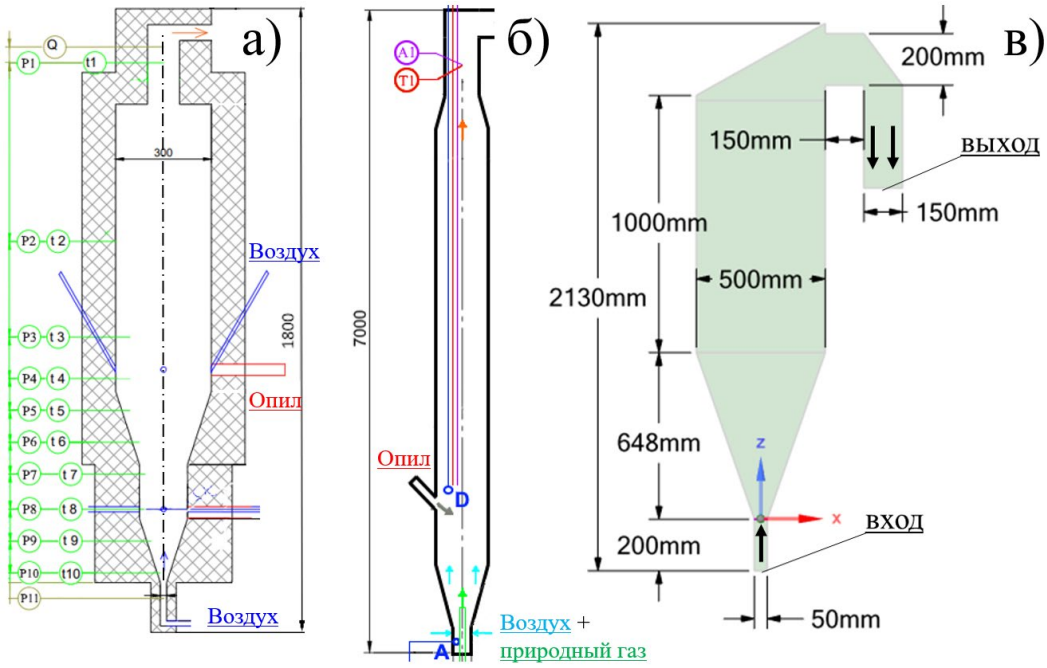


Рис. 1. Проточные части установок, используемых в численных и экспериментальных исследованиях: *а* – пилотная установка; *б* – опытно-промышленная установка; *в* – плоская модель газификатора

Результаты CFD- и CFD-DEM-моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает применимость моделей для изучения движения частиц биомассы неправильной формы в несущем потоке воздуха с различной объемной концентрацией частиц с учетом массообмена, обусловленным воздушной газификацией частиц опила.

Анализ полей статического давления и объемной концентрации частиц показал, что положение струи с частицами в свободном пространстве существенно влияет на значение статического давления в отдельно взятой точке в форсированных гидродинамических режимах, что важно учитывать при измерении распределения давления по высоте в коническо-цилиндрических газификаторах опила.

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».

Список источников

1. Reyes A., Soria J., Saffe A., Zambon M., Echegaray M., S. Suárez, R. Rodriguez, and G. Mazza, Fluidization of biomass: a correlation to assess the minimum fluidization velocity considering the influence of the sphericity factor // Part. Sci. Technol. 2021. Vol. 39. Pp. 1–21.

2. Hölzer A., Sommerfeld M. New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles // Powder Tech. 2008. Vol. 184 (3). Pp. 361–365.

3. Di Felice R. The voidage function for fluid-particle interaction systems // Int. J. of Multiphase Flow. 1994. Vol. 20 (1). Pp. 153–159.

4. Ding J., Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow // AIChE J. 1990. Vol. 36 (4). Pp. 523–538.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ СКОРОСТЕЙ ВИТАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ

И. Д. Суворин[1, 2*], М. И. Ершов[1, 2],
В. Г. Тупоногов[1, 2], А. Ф. Рыжков[1, 2]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
[2]Лаборатория новых энергетических технологий
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
** suvorin.ig@yandex.ru*

На примере модельных частиц одной плотности и шероховатости выполнено экспериментальное исследование поведения частиц разной геометрии, применительно к условиям в поточном газогенераторе с уносом. Полученные данные сопоставлены с известными корреляциями, применяемыми при проектировании установок пневмотранспорта и кипящего слоя. Для проведения экспериментов был создан экспериментальный стенд. Эксперименты проводились с использованием трубки диаметром 28,4 мм.

Для исследования были выбраны частицы, сопоставимые частицам в опытах Святкова и Илиева [1], а также частицы разной формы: шар, диск, цилиндр, пластина. Все частицы имеют равные эквивалентные диаметры, что позволяет проследить зависимость скорости витания от формы частицы. Размеры выбранных частиц указаны в табл. 1.

Таблица 1

Размеры модельных экспериментальных частиц

Частица	Длина (диаметр), мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Эквивалентный диаметр, мм
Кубик1	2,954	3,03	2,93	3,684
Кубик2	3,054	2,962	2,926	3,695
Шарик дерево	3,101	2,87	2,66	2,920
Цилиндр	2,5	–	5,5	3,721
Диск1	5,5	–	1	3,566
Диск2	7,5	–	0,6	3,699
Пластинка1	4	3	2	3,579
Пластинка2	5,5	4,5	1	3,616
Пластинка3	8	3,5	1	3,767

Непосредственно эксперимент проводился следующим образом: на закрепленную на соединительной трубке сетку укладывается частица и крепится снизу стеклянной трубки. С помощью воздуходувки подается воздух и контролируется с помощью частотного регулятора. Для частиц несферической формы за скорость витания принималась скорость в момент уноса частицы из трубки.

После проведения экспериментов были рассчитаны скорости витания частиц по формулам Тодеса (1), (2) [2], Святкова (3) [1] и Успенского (4) [3].

$$Re_d = \frac{Ar}{18+0.61\cdot\sqrt{Ar}}, \quad (1)$$

$$w_{\text{вит}} = \frac{Re_d\cdot\nu}{d_э}, \quad (2)$$

© Суворин И. Д., Ершов М. И., Тупоногов В. Г., Рыжков А. Ф., 2025

где Ar – число Архимеда; $w_{вит}$ – скорость витания, м/с; Re_d – число Рейнольдса, ν – кинематическая вязкость воздуха, м^2/с; $d_э$ – эквивалентный диаметр частицы, м.

$$w_{вит} = 0{,}14 \cdot \sqrt{\frac{\rho_ч}{(0{,}02+\frac{a}{h})\cdot\rho_в}}, \quad (3)$$

где $\rho_ч$ – плотность частицы, кг/м^3; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; a – коэффициент, зависящий от формы частиц (1,1 – для частиц с квадратным или округлым поперечным сечением, 0,9 – для частиц с прямоугольным поперечным сечением), h – толщина частицы, мм.

$$w_{вит} = \sqrt{\frac{4\cdot g\cdot d_э\cdot(\rho_ч-\rho_в)}{3\cdot c_2\cdot\rho_в\cdot К_ф}} \cdot \left[1-\left(\frac{d_э}{D}\right)^2\right], \quad (4)$$

где g – скорость свободного падения, м/с; c_2 – коэффициент сопротивления сферических частиц; $К_ф$ – коэффициент формы; D – диаметр трубки.

В качестве эквивалентного диаметра частицы принимается диаметр сферы, объем которой равен объему частицы. Для частиц, близких к сфере, за эквивалентный диаметр принимался средний размер частицы. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение экспериментальной и расчетных скоростей витания

Частица	Экспериментальная скорость витания в трубке 28,4 мм, м/с	Скорость витания по Тодесу в трубке 28,4 мм, м/с	Скорость витания по Святкову в трубке 28,4 мм, м/с	Скорость витания по Успенскому в трубке 28,4 мм, м/с
Кубик1	5,086	5,998	5,290	5,204
Кубик2	5,004	5,989	5,286	5,198
Шарик дерево	6,486	5,872	5,054	5,107
Цилиндр	14,900	6,010	4,908	5,261
Диск1	8,390	5,872	3,153	4,471
Диск2	4,390	5,990	2,453	3,750
Пластинка1	9,940	5,883	4,413	5,017
Пластинка2	8,210	5,916	3,153	4,405
Пластинка3	8,210	6,051	3,153	4,388

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что частицы правильной формы (куб, сфера) имеют близкие с расчетными экспериментальные скорости витания. Из представленной выборки частиц можно заметить, что, чем больше отношение сторон друг к другу, тем больше расхождение экспериментальной и расчетных скоростей витания.

Кроме того, стоит обратить внимание, что частицы неправильной формы не зависают на одном месте, а находятся в постоянном вращении. Планируется с помощью высокоскоростной камеры проследить, в каком положении каждая частица перестает летать по трубке и стремится вылететь.

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».

Список источников

1. Илиев Т. Н., Святков С. Н. О скорости витания древесных частиц // Деревообрабатывающая промышленность. 1962. № 12. С. 13–14.

2. Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем : монография. Л. : Химия, 1968. 512 с.

3. Успенский В. А. Пневматический транспорт. М. : Металлургиздат, 1959. 231 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ОДНОРЯДНОМ ПУЧКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

М. А. Засимова*, А. Г. Абрамов,
А. А. Пожилов, А. В. Филатова

Санкт Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
** zasimova_ma@mail.ru*

Рассмотрено термогравитационное течение воздуха через горизонтально ориентированный однорядный пучок из шести оребренных нагретых труб, происходящее при умеренных значениях числа Грасгофа (до 6×10^5). Проведено параметрическое численное моделирование течения и теплообмена с варьированием шага оребрения и расстояния между трубами для конфигураций с установленной над пучком вытяжной шахтой прямоугольного сечения разной высоты и без шахты. Для наиболее сжатого пучка без шахты получено приемлемое согласие рассчитанной средней теплоотдачи с поверхности несущей трубы с доступными из литературы данными экспериментов в рассмотренном диапазоне чисел Грасгофа. Показано, что для вариантов без шахты изменение шага оребрения и межтрубного расстояния может приводить к повышению эффективной теплоотдачи более чем в два раза. Для вариантов с шахтой определяющим параметром является расстояние между трубами – с его увеличением интенсивность теплосъема снижается.

Широко применяемые на практике теплообменные аппараты воздушного охлаждения, работающие в пассивном режиме, без использования нагнетающих устройств, в условиях формирующейся под действием сил плавучести естественной конвекции, обеспечивают высокую надежность и экономичность процесса. В качестве теплообменных аппаратов наиболее распространены пучки труб с внешним оребрением. Интенсивность теплосъема с поверхности труб определяется геометрическими параметрами пучка (его компоновкой), а также формой и расположением оребрения. Повысить эффективность работы теплообменника можно путем размещения над ним вытяжной шахты, которая интенсифицирует течение вблизи поверхности труб.

В работе представляются результаты численного моделирования термогравитационного течения и теплообмена вблизи однорядного горизонтального пучка нагретых оребренных труб. В расчетах были заданы следующие геометрические параметры пучка (см. вид расчетной области на рис. 1, *а*, *б*): пучок состоит из шести труб, диаметр несущей трубы $d_0 = 26{,}4$ мм, диаметр сплошных поперечных ребер $d = 2{,}15d_0 = 56{,}8$ мм, толщина ребра $\delta = 0.01d = 0.55$ мм. Варьировались следующие параметры пучка: шаг оребрения вдоль трубы s (от $0{,}04d$ до $0{,}13d$), расстояние между трубами S (от $1{,}02d$ до $1{,}53d$). Параметрические расчеты с варьированием указанных параметров проведены как для случая с установленной над пучком вытяжной шахтой прямоугольного сечения, высота которой достигает $H = 9d$, так и для варианта без шахты ($H = 0$).

Численное моделирование выполнено в сопряженной постановке – совместно с течением рассчитывался теплоперенос по алюминиевым ребрам труб. Температура окружающего воздуха задавалась равной $T_0 = 22{,}1$°C. Температура внешней поверхности несущей трубы T_w полагалась постоянной и варьировалась от 37 до 244 °C. Значения числа Грасгофа $Gr = g\beta(T_w - T_0)d_0^3/\nu^2$ не превышали 6×10^5.

Течение воздуха и теплообмен моделировались на основе системы нестационарных уравнений Навье – Стокса и уравнения энергии с использованием модели сжимаемого совершенного газа с переменными коэффициентами диффузионного переноса.

© Засимова М. А., Абрамов А. Г., Пожилов А. А., Филатова А. В., 2025

Расчеты выполнены в пакете вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent на основе схем дискретизации второго порядка точности. Типичная размерность расчетных сеток составляла 300 тыс. ячеек. Результаты получены с использованием вычислительных ресурсов СКЦ «Политехнический».

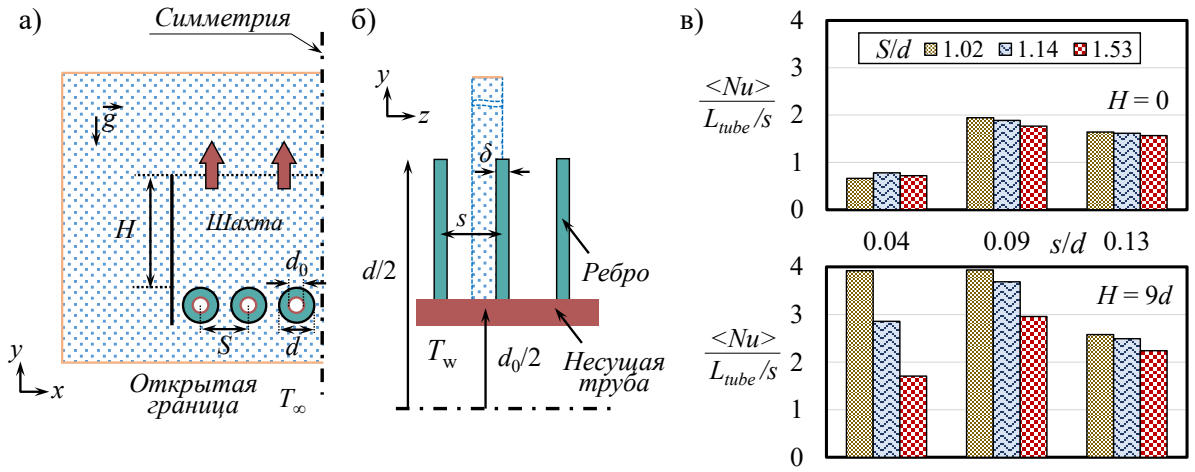


Рис. 1. Вид расчетной области: *а* – в плоскости, перпендикулярной оси пучка; *б* – в плоскости, проходящей вдоль одной из труб; *в* – эффективная теплоотдача с поверхности пучка для вариантов без шахты ($H = 0$) и с размещенной над пучком шахтой ($H = 9d$) при $Gr = 6 \times 10^5$

На первом этапе была проведена валидация результатов численного моделирования на основе данных, полученных для варианта без шахты и наиболее сжатого по размерам пучка (с минимальными межреберными и межтрубными расстояниями). Полученные в расчетах осредненные по поверхности средней трубы пучка значения безразмерной теплоотдачи хорошо согласуются с экспериментальными данными [1] в рассмотренном диапазоне значений числа Грасгофа. По данным численного моделирования для этого варианта компоновки пучка в отсутствие шахты показана низкая эффективность большей части поверхности ребра: теплосъем осуществляется в основном с периферии ребер, а вклад их внутренней части относительно мал.

На рис. 1, *в*, приведены количественные данные для осредненной по поверхности пучка безразмерной теплоотдачи для вариантов с различным шагом оребрения и расстоянием между трубами. Осредненное по поверхности пучка значение числа Нуссельта $\langle Nu \rangle$ отнесено к количеству ребер на трубе фиксированной длины (здесь это значение задавалось равным $L_{\text{tube}} = 1$ м). Как видно, наибольшее влияние на теплосъем оказывает шаг оребрения. Установлено, что путем варьирования шага оребрения и расстояния между трубами можно повысить эффективную теплоотдачу с поверхности пучка более чем в два раза по сравнению с базовым вариантом для наиболее сжатого пучка. Расстояние между трубами оказывает менее существенное влияние на характеристики теплосъема – в зависимости от варианта, осредненные по поверхности пучка значения эффективной теплоотдачи могут различаться на 25 %.

На втором этапе была произведена оценка влияния на теплоотдачу наличия над пучком вытяжной шахты. В качестве примера на рис. 1, *в*, показаны данные для вариантов с высотой шахты, на порядок превышающей диаметр ребер. При размещении над пучком шахты происходит интенсификация течения и увеличение теплосъема для всех рассмотренных вариантов. Наибольшее влияние на интенсивность теплосъема оказывает расстояние между трубами: при компактном расположении труб и ребер теплосъем оказывается максимальным, а с увеличением межтрубного расстояния теплоотдача снижается. Для варианта с наименьшим межтрубным расстоянием установлено, что

при увеличении шага оребрения в два раза (с s = 0,04 до s = 0,09) эффективная теплоотдача практически не меняется.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-49-10003.

Список источников

1. Marshalova G. S., Sukhotskii A. B., Kuntysh V. B. Free convection heat transfer on annular-finned tubes and bundles thereof // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. Vol. 96 (4). Pp. 1089–1102.

ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫЕ ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЦИЛИНДРА ЧЕРЕЗ КЛАПАНЫ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л. В. Плотников*, Д. А. Давыдов, Д. Н. Красильников, В. А. Шурупов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
** leonplot@mail.ru*

Внутрицилиндровые процессы при заполнении цилиндра рабочим телом оказывают влияние на эффективность, экологичность и производительность поршневых двигателей. Данное исследование направлено на экспериментальное изучение газодинамики и теплообмена внутри цилиндра в процессе его заполнения стационарным потоком воздуха через тарельчатые клапаны разных конструкций. В опытах использовались метод тепловой анемометрии и метод PIV (particle image velocimetry). Были получены данные о полях скоростей, степени турбулентности потока, локальном коэффициенте теплоотдачи на стенках цилиндра для разных начальных условий и разных конфигурациях впускного клапана. Показано, что применение клапана с квадратной тарелкой приводит к значимому изменению структуры потока в цилиндре в процессе впуска. Установлено, что использование квадратного клапана вызывает рост степени турбулентности потока в цилиндре в среднем на 40 % по сравнению с базовой конфигурацией. Выявлено, что имеет место интенсификация теплоотдачи в цилиндре на 5–22 % при установке квадратного клапана. Полученные данные могут быть полезны для расчета и проектирования газовоздушных систем поршневых двигателей.

Известно, что совершенство внутрицилиндровых процессов во многом определяет удельные показатели, КПД и экологичность поршневых двигателей [1]. Конструкция деталей и узлов впускной системы оказывает влияние на газодинамику и теплообмен в процессе заполнения цилиндра воздухом [2; 3], поэтому улучшение термомеханики процесса впуска и разработка новых конструкций систем газообмена остается действенным способом повышения эксплуатационных показателей поршневых двигателей.

Данная работа направлена на изучение газодинамики и теплоотдачи стационарного потока газа в цилиндре в процессе его заполнения при разных начальных условиях и через клапаны разных конструкций. Было исследовано две конструкции впускного клапана: 1) традиционный клапан с тарелкой круглого поперечного сечения; 2) клапан с тарелкой квадратного сечения. Геометрия квадратного клапана была выбрана исходя из равенства площадей тарелки. Исследования проводились в стационарном режиме продувки впускной системы и цилиндра с расходом воздуха от 0,007 до 0,032 м^3/с. Воздух был с температурой 22 ± 1 ºС. Впускной трубопровод имел внутренний диаметр 32 мм и длину 300 мм. Диаметр цилиндра – 82 мм, высота – 100 мм. Диаметр тарелки клапана равнялся 32 мм. Высота подъема клапана – 10 мм (статичное, открытое состояние). Гипотеза применения профилированного клапана основана на данных о возникновении газодинамических явлений в трубопроводах не круглой формы [3].

Система PIV (particle image velocimetry) от фирмы «Сигма Про» применялась для получения полей скоростей внутри цилиндра. Метод тепловой анемометрии использовался для получения данных о мгновенной и средней w скорости потока, степени турбулентности Tu, локальных напряжениях трения и коэффициенте теплоотдачи α. Методики проведения опытов более подробно описаны в [5].

© Плотников Л. В., Давыдов Д. А., Красильников Д. Н., Шурупов В. А., 2025

Установлено, что применение квадратного клапана приводит к более равномерному распределению воздуха внутри цилиндра по сравнению с базовой конструкцией, что характерно для всех исследуемых расходов воздуха *q*. Выявлено, что установка квадратного клапана вызывает рост степени турбулентности потока Tu от 18 до 53 % по сравнению с базой, т. е. имеет место интенсификация пульсационных составляющих потока (рис. 1). Описанное изменение газодинамики потока должно оказать положительное влияние на процессы смесеобразования и сгорания в поршневом двигателе.

Выявлено, что наблюдается рост коэффициента теплоотдачи α в цилиндре до 18 % при использовании квадратного клапана для низких значений *q* (рис. 2, *а*). При этом рост α при высоких значения *q* составляет не более 9,6 % (рис. 2, *б*).

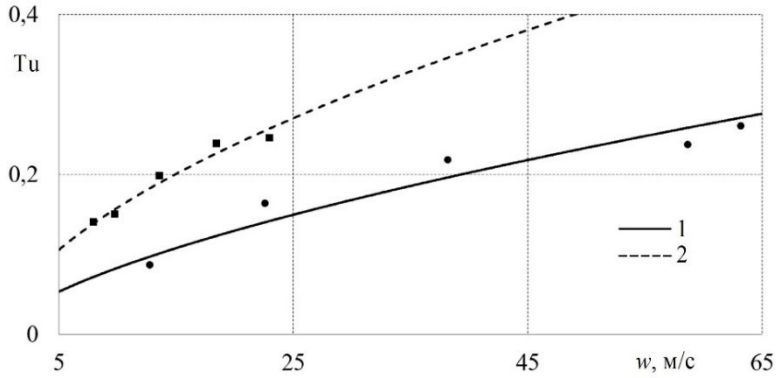


Рис. 1. Зависимости степени турбулентности Tu от средней скорости потока воздуха *w* на оси цилиндра для разных конфигураций клапана: *1* – круглый клапан; *2* – квадратный клапан

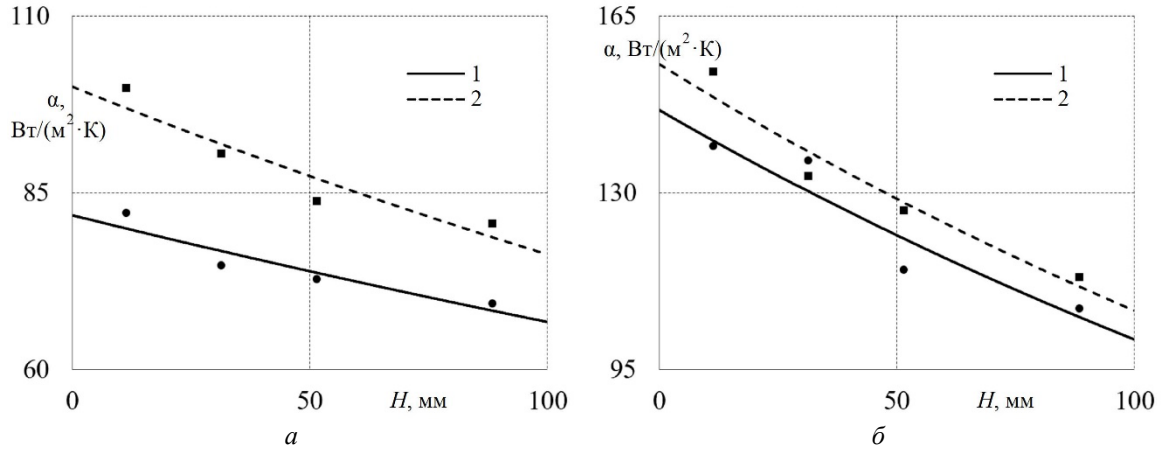


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи α по высоте цилиндра *H* при его заполнении через круглый (1) и квадратный (2) клапаны для разных расходов воздуха *q* через впускную систему: *1* – q = 0,011 м^3/с; *2* – q = 0,032 м^3/с

Основные выводы данного исследования состоят в следующем:

1) показано, что конфигурация впускного клапана оказывает существенное влияние на структуру потока внутри цилиндра при его заполнении воздухом;

2) выявлено, что установка квадратного клапана приводит к турбулизации потока внутри цилиндра (рост Tu вплоть до 50 % по сравнению с базовой конфигурацией);

3) установлено, что имеет место интенсификация теплоотдачи (рост α вплоть до 25 %) при использовании квадратного клапана во впускной системе двигателя.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 25-19-00001.

Список источников

1. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М. : МГТУ им. Баумана, 2016. 515 с.

2. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.

3. Плотников Л. В., Жилкин Б. П., Бродов Ю. М. Экспериментальное исследование и совершенствование процессов газообмена поршневых и комбинированных ДВС в условиях газодинамической нестационарности // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 12 (669). С. 35–44.

4. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

5. Plotnikov L. V. Features of the gas dynamics and local heat transfer in intake system of piston engine with supercharging // J. Physics: Conf. Ser. 2017. Vol. 899 (4). Pp. 042008.

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ШАГА МЕЖДУ ОТВЕРСТИЯМИ ПЕРФОРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ

А. А. Котляр*, С. В. Веретенников, О. А. Евдокимов

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева
152934, Российская Федерация, Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53
** kolesova599@gmail.com*

Представлены результаты исследования заградительного охлаждения методом цифровой трассерной визуализации и ИК-термографирования на плоской поверхности за отверстиями различной формы. Получено, что отрыв газовой завесы от поверхности за цилиндрическим отверстием происходит при параметре вдува больше 1. Отверстия с расширяющейся частью позволяют организовать более эффективную защиту поверхности. Взаимодействие между соседними струями наблюдается для отверстий веерной формы при m > 1, при шаге между отверстиями не более 4 калибров.

Заградительное охлаждение – технология, используемая для обеспечения потребной температуры лопаток первых ступеней турбины в газотурбинном двигателе [1]. Данный метод тепловой защиты предполагает подвод холодного воздуха в проточную часть через специальные отверстия, изготовленные на пере лопатки. В области входной кромки могут изготавливаться только отверстия цилиндрической формы из-за сложного профиля данного участка. В области стороны давления и стороны разряжения могут применяться многорядные и однородные системы цилиндрических и профилированных отверстий.

Большую роль на эффективность газовой завесы оказывают геометрические параметры отверстий для подвода охлаждающего воздуха и защищаемой поверхности (шероховатость поверхности, угол наклона отверстия к месту вдува, форма отверстий и т. д.), а также параметры течения основного и вторичного потока (турбулентность, параметр вдува). Наибольшее влияние среди геометрических параметров на уровень тепловой защиты оказывает форма отверстий и относительный шаг между ними. Большое количество экспериментальных и расчетных работ по исследованию эффективности газовой завесы выполняется для одного или нескольких форм отверстий [2] при варьировании параметра вдува в диапазоне от 0,3 до 2,5 [3]. Однако необходимо выполнять исследования по влиянию относительного шага между соседними отверстиями для каждой формы отверстия, так как уменьшение числа отверстий для подвода охладителя позволит сократить расходы на изготовление лопатки и повысить КПД ступени турбины за счет снижения количества вдуваемого воздуха.

В работе представлены результаты экспериментального исследования заградительного охлаждения за рядом из 5 отверстий цилиндрической и веерной формы с длиной расширяющейся веерной части 1 калибр. Объект исследования представляет собой плоский канал, одна из сторон которого предусматривала возможность установки пластины с отверстиями для заградительного охлаждения, три другие стороны были выполнены из стекла для обеспечения визуального доступа. В ходе проведения исследования относительный шаг между отверстиями варьировался от 3 до 6 калибров и при изменении параметра вдува от 0,5 до 1,5.

Экспериментальное исследование выполнялось в два этапа. На первом этапе выполнялось исследованием методом ИК-термографирования с целью определения адиабатной эффективности охлаждения (1). Экспериментальное исследование выполнялось

© Котляр А. А., Веретенников С. В., Евдокимов О. А., 2025

по принципу обратного теплообмена, когда в отверстия для тепловой защиты подается горячий воздух, а основной поток холодный, в предположении адиабатности исследуемой поверхности.

$$\eta = \frac{T_{г}^{*} - T_{ст}}{T_{г}^{*} - T_{охл}^{*}}, \quad (1)$$

где $T_{г}^{*}$ – полная температура горячих газов; $T_{охл}^{*}$ – полная температура охладителя; $T_{ст}$ – температура защищаемой поверхности (в условиях адиабатности она равна температуре охлаждающей пленки вблизи стенки).

На втором этапе работ исследование проводилось методом цифровой трассерной визуализации для определения особенностей газодинамического взаимодействия струй охладителя с основным потоком и между собой. В ходе проведения эксперимента засеивался только вторичный поток, подаваемый в отверстия для тепловой защиты. Исследование газодинамического взаимодействия соседних струй выполнялась на удалении 1 калибра от места вдува в поперечном направлении методом PIV.

По результатам ИК-термографирования получено, что осредненная по поверхности эффективность заградительного охлаждения за веерными отверстиями с диффузорным участком на 75 % выше эффективности отверстий цилиндрической формы при относительном шаге между ними $Z/D = 3$ калибра при $m = 1$. Увеличение расстояния между соседними струями до $Z/D = 4$ приводит к снижению осредненной по площади эффективности охлаждения за веерными отверстия на 20 %. За отверстиями цилиндрической формы при m > 1 наблюдается отрыв защитной пелены от поверхности.

По результатам PIV-исследования получено, что взаимодействие между отверстиями цилиндрической формы, происходит только при $Z/d = 3$ и $m = 1{,}5$. Взаимодействие соседних струй определялось по наличию перетекания воздуха от одной струи в ядро соседних расположенных струй. За веерными отверстиями с коротким расширяющимся участком взаимодействие между соседними струями прослеживается, только при шаге до 4 калибров и $m > 1$.

Таким образом, применение веерных отверстий с коротким диффузорным участком позволяет организовать более эффективную тепловую защиту по сравнению с отверстиями цилиндрической формы при всех параметрах вдува при относительном шаге $Z/D = 3$. Увеличение расстояния между соседними струями приведет к снижению среднего уровня адиабатной эффективности охлаждения и, как следствие, к увеличению температуры защищаемой поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Ярославской области в рамках научного проекта № 22нп/2024.

Список источников

1. Han J.-C., Dutta S., Ekkad S. Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, 0 ed. CRC Press, 2012. doi: 10.1201/b13616.

2. Park S. H., Kang Y. J., Seo H. J., Kwak J. S., Kang Y. S. Experimental Optimization of a Fan-Shaped Film Cooling Hole with 30 Degrees-Injection Angle and 6-Hole Length-to-Diameter Ratio, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 144, p. 118652, December 2019. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118652

3. Tracy K., Lynch S. P. Large Eddy Simulation of the 7-7-7 Shaped Film Cooling Hole at Axial and Compound Angle Orientations, Volume 7B: Heat Transfer, ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers, p. V07BT12A016, 2020.

ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ СТРУИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ ЛАМИНАРНЫХ МИКРОСТРУЙ

Ю. А. Литвиненко, А. А. Смяцких

Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса диффузионного горения при столкновении двух осесимметричных ламинарных микроструй пропана. Исследования проводились с использованием термоанемометрических измерений и теневого метода. Истечение газа через круглые сопла осуществляется с равными скоростями. В ходе эксперимента изменяли поперечное положение сопел относительно друг друга с сохранением угла между ними. Вариант полного перекрытия соответствует положению, когда оси симметрии обеих струй находятся в одной плоскости. В результате показан сценарий образования факела для различных положений сопел. Представлены особенности развития факела при промежуточных положениях сопел. Установлено, что при полном «перекрытии» выходящих струй происходит деформация факела с образованием ортогонального факела. Этот процесс имеет общие черты с аналогичным истечением воздушных струй. При увеличении скорости истечения появляется область локального разрыва фронта пламени. Выявлены особенности формирования вторичной струи при естественных условиях и при воздействии внешнего периодического возмущения. Установлено, что результирующая струя формируется в ортогональной к трубкам плоскости. При естественных условиях вторичная струя формируется с большим, более 115°, углом раствора и представляет собой уплощенную струю. В случае внешнего воздействия периодическим акустическим сигналом после взаимодействия микроструй возникает незначительное уплощение с развитием вторичных колебаний в ортогональной плоскости с последующим поворотом к плоскости расположения трубок.

Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. Струи, сформированные в каналах малого удлинения, способствуют развитию в них неустойчивости Кельвина – Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с ранней турбулизацией. Для струй, сформированных каналами с большим удлинением, такая неустойчивость не реализуется, и струя имеет протяженный ламинарный участок. При наличии процессов горения структура газодинамической струи существенно влияет на процессы тепломассообмена, стабилизации пламени и т. д. В случае взаимодействия двух струй картина течения существенно усложняется. При этом использование встречных струй позволяет, например, управлять скоростными параметрами образующейся струи и формировать форму пламени, тем самым влияя на процесс горения. Особенностью этих исследований является то, что оси симметрии сталкивающихся струй расположены под острым углом друг к другу, а поперечное положение сопел меняется от полного перекрытия струй, когда оси симметрии находятся в одной плоскости, до полного расхождения струй, когда сопла разводятся в поперечном направлении.

Эксперименты проводились на струйной установке Института теоретической и прикладной механики имени Христиановича СО РАН. Установка состоит из двух одинаковых цилиндрических трубок длиной 50 мм и внутренним диаметром 0,4 мм, расположенных под углом 60° между осями симметрии сопел. Расстояние между концами трубок ~7 мм. Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Используемый газ представлял собой смесь пропана и бутана в процентном соотношении 70/30. Сжиженный газ из баллона через испаритель подавался в редуктор, затем в регулятор

© Литвиненко Ю. А., Смяцких А. А., 2025

массового расхода, после разделялся на две части. Расход газа через каждое сопло соответствовал ½ установленного расхода на расходомере и был равен $1{,}0 \times 10^{-7}$ м^3/с. Расчетная скорость газа, протекающего через каждое сопло, составляет $U_1 = U_2 = 0{,}39$ м/с, что соответствует $\mathrm{Re}_{\text{пропана}} = 42$, при диаметре сопла 400 мкм. При данном числе Рейнольдса пламя было ламинарным. При достижении скорости $U \geq 0{,}53$м/с ($\mathrm{Re} \geq 55$) пламя становилось турбулентным и поднималось над срезом сопла.

При термоанемометрических измерениях использовался сжатый осушенный воздух. Истечение осуществлялось в воздушное пространство при 20 °С и атмосферном давлении. Расход воздуха через каждое сопло соответствовал ½ устанавливаемого расхода на регуляторе и был равен $5{,}2\times10^{-7}$ м^3/с. Учитывая диаметр сопла 600 мкм, расчетная скорость газа, истекающего через каждое сопло, $U_1 = U_2 = 10$ м/с, что соответствовало числу Re = 400, вычисленному по диаметру сопла.

На рис. 2 представлены теневые фотографии развития двух сталкивающихся газовых струй без горения при различном перекрытии. Фото 1 и 3 (рис. 2) соответствуют плоскостям *xy* и *yz* соответственно для случая, когда струи не взаимодействуют. На фотографиях 2 и 4 (рис. 2) показаны одни и те же плоскости для случая перекрытия струй ~100 % площади поперечного сечения каждого сопла. На рис. 3 представлены изоповерхности отклонения мгновенной скорости от осредненной по времени скорости для сталкивающихся микроструй при 100 % перекрытии при естественных условиях – 1, при внешнем акустическом воздействии с частотой 1 500 Гц – 2. Амплитуда изоповерхностей составляет 1 % $U_{\text{макс}}$. Превышение средней скорости показано светлым полутоном, дефект средней скорости показан темным полутоном. В случае акустического воздействия с частотой 1 500 Гц развитие неустойчивости протекает по другому сценарию.

Сравнивая два исследованных случая развития сталкивающихся микроструй, можно утверждать, что влияние акустического возмущения существенно меняет структуру струйного течения. Использование таких струй при контролируемых возмущениях в процессах диффузионного струйного горения может способствовать более качественному смешению компонентов или формированию определенного вида факела.

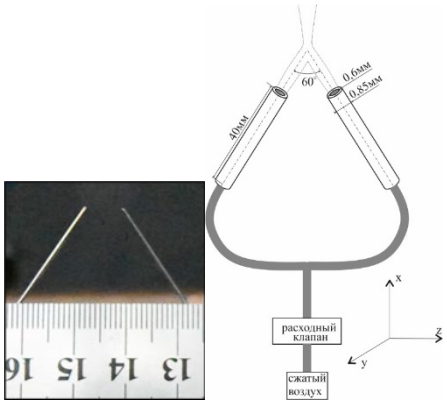


Рис. 1. Струйная установка

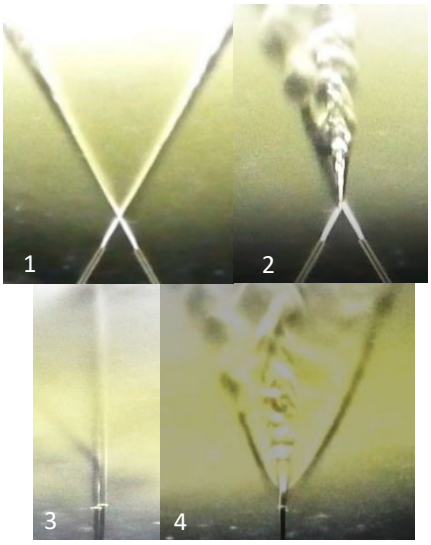


Рис. 2. Теневые фото пересекающихся струй

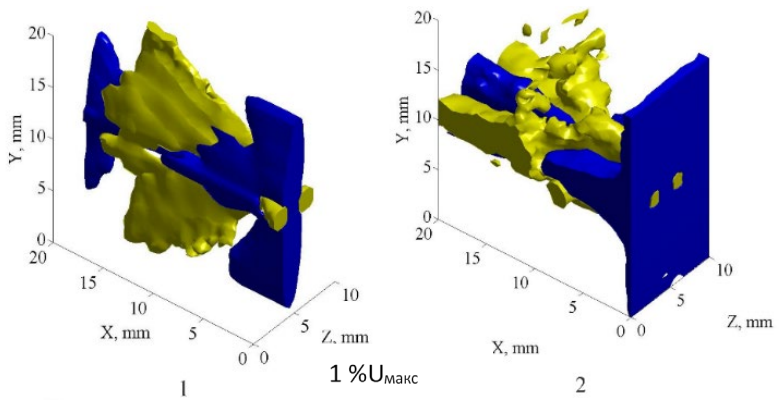


Рис. 3. Изоповерхности отклонения мгновенной скорости от средней скорости. Светлое – превышение средней скорости, темное – дефект средней скорости: *1* – естественный случай; *2* – 1500Гц

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

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ РТУТИ В НЕОДНОРОДНО ОБОГРЕВАЕМОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М. В. Макаров*, Г. Г. Яньков, В. И. Артемов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
** makarovmv2000@yandex.ru*

В работе представлены результаты численного исследования теплообмена при опускном течении ртути в неоднородно обогреваемой вертикальной круглой трубе под воздействием поперечного магнитного поля. Использован метод крупных вихрей (LES) в сопряженной со стенкой трубы постановке с учетом моделирования контактного электрического сопротивления слоя загрязнений на внутренней поверхности стенки. Показано, что при заданных (вычисленных по диаметру трубы) числах Рейнольдса ($Re=10^4$) и Грасгофа ($Gr_q=6\cdot10^7$) увеличение индукции магнитного поля приводит к смене режимов течения, что оказывает существенное влияние на интенсивность теплообмена.

Изучение процессов гидродинамики и теплообмена при течении жидких металлов в каналах является актуальной задачей в связи с перспективой их использования в качестве теплоносителей в различных промышленных установках, в частности в проектируемых бланкетах термоядерных реакторов [1]. Предметом данной работы является исследование явления аномально высоких пульсаций температуры, обнаруженных не так давно, при смешанной конвекции ртути в каналах и трубах различной ориентации под воздействием поперечного магнитного поля, и подробно описанных в обзоре [2].

Настоящая работа является продолжением исследований авторов [3; 4], в которых подробно изложена постановка задачи и ее математическое описание.

Расчетная область (рис. 1) разбита на три участка: зону входного периодического генератора турбулентности (IPG), зону нагрева с постоянной плотностью теплового потока q_w и адиабатной зону.

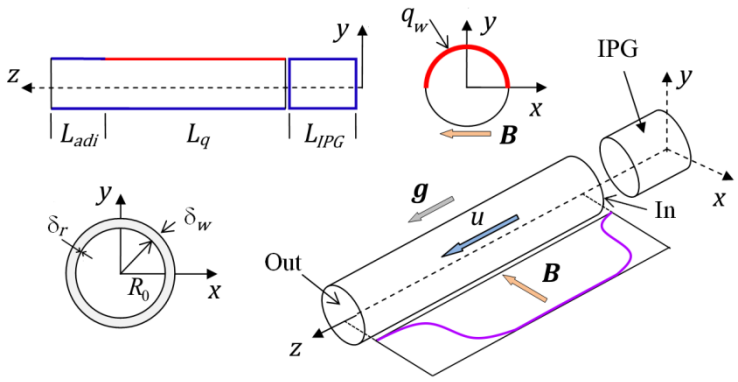


Рис. 1. Схема расчетной области:
u – скорость; $\boldsymbol{g}$ – вектор силы тяжести; $\boldsymbol{B}$ – вектор магнитной индукции

По мере увеличения числа Гартмана (Ha) реализуются пять режимов течения: турбулентный одноструйный; турбулентный двухструйный; неустойчивый двухструйный; устойчивый двухструйный; устойчивый одноструйный.

© Макаров М. В., Яньков Г. Г., Артемов В. И., 2025

Двухструйные режимы характеризуются наличием возвратного (подъемного) течения возле нагреваемой поверхности стенки. Границы режимов существенно зависят от величины контактного электрического сопротивления пленки загрязнений k_r (1).

На рис. 2 показан график числа Нуссельта (1), осредненного по времени и продольной координате в интервале постоянного магнитного поля ($45 \leq z/R_0 \leq 85$), для варианта k_r= 1 000.

$$k_r = \sigma_l \delta_r / (\sigma_r R_0)\,,\ Nu = 2R_0 q_w / (\lambda_l (T_w - T_b))\,, \tag{1}$$

где σ_l, σ_r – удельные электропроводности ртути и пленки загрязнений; δ_r– толщина пленки загрязнений; λ_l – теплопроводность ртути, T_w, T_b – температура стенки при y=1 и среднемассовая температура.

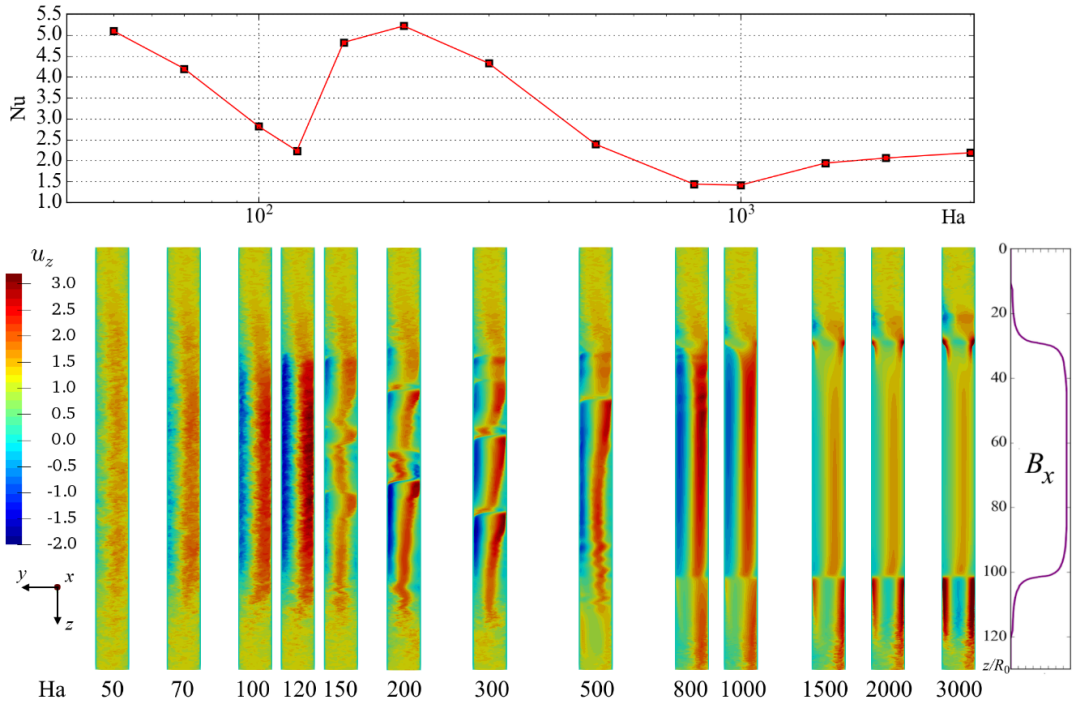


Рис. 2. Изменение числа Nu в зависимости от числа Ha для варианта с большим контактным сопротивлением пленки загрязнений ($k_r = 1\,000$) и поля безразмерной аксиальной скорости в плоскости $y - z$, $x = 0$

Поля аксиальной скорости (рис. 2) иллюстрируют структуру течения для различных режимов. Хорошо видно, что переход от турбулентного одноструйного режима к турбулентному двухструйному сопровождается значительным падением числа Нуссельта. Интенсификация теплообмена наблюдается в неустойчивых двухструйных режимах, в которых возникают аномальные пульсации температуры. С повышением числа Гартмана устанавливается устойчивый двухструйный режим, характеризующийся наихудшей теплоотдачей. Число Нуссельта немного повышается при переходе к одноструйному устойчивому режиму.

Расчеты проведены с использованием CFD-кода ANES [5] на суперкомпьютере «Fisher» ОИВТ РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2023-0017, соглашение № 075-03-2023-383 от 18.01.2023, в сфере научной деятельности на 2023–25 гг.

Список источников

1. Smolentsev S. Physical background, computations and practical issues of the magnetohydrodynamic pressure drop in a fusion liquid metal blanket // Fluids. 2021. Vol. 6. P. 110.

2. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields / O. Zikanov, Y. Listratov, I. Belyaev et al. // Appl. Mech. Rev. 2021. No 73 (1). 010801.

3. Numerical investigation of the effect of the wall properties on downward mercury flow and temperature fluctuations in a vertical heated pipe under a transverse magnetic field / V. I. Artemov, M. V. Makarov, G. G. Yankov, K. B. Minko // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. Vol. 218. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124746.

4. Численное исследование неустойчивости опускного течения ртути в неравномерно обогреваемой круглой трубе под воздействием поперечного магнитного поля / М. В. Макаров, Г. Г. Яньков, В. И. Артемов // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 1. С. 3–19.

5. Код ANES. URL: http://anes.ch12655.tmweb.ru.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИЛИНДРА СО СТЕРЖНЯМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

С. А. Князев*, В. В. Сероштанов, А. А. Гусаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
** leontev803@gmail.com*

Исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен одиночного цилиндра кругового сечения. Два стержня располагались вдоль образующей цилиндра и симметрично разносились относительно лобовой точки на угол 90°. Методом градиентной теплометрии получены распределения местного коэффициента теплоотдачи на поверхности цилиндра в диапазоне чисел Рейнольдса Re = 4 800…20 200. С помощью цифровой трассерной визуализации (PIV) определены компоненты скорости вблизи цилиндра с турбулизаторами и в следе за ним. Показано влияние диаметра турбулизаторов на структуру течения в следе за цилиндром, среднее по поверхности число Нуссельта и теплогидравлическую эффективность системы.

Повышение эффективности теплообмена с помощью поверхностных интенсификаторов – наиболее перспективное направление в теплофизике [1]. Поверхностные интенсификаторы позволяют увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и снизить гидравлическое сопротивление.

Исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен вблизи одиночного цилиндра с применением PIV и градиентной теплометрии. Результаты исследования позволят управлять потоком вблизи цилиндра за счет изменения структуры течения в пограничном слое и смещения точки его отрыва. Исследования проводились для чисел Рейнольдса Re = 4 800…20 200 в аэродинамической трубе научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [1].

Экспериментальной моделью служит полый цилиндр диаметром 66 мм и длиной 600 мм из листа стали толщиной 0,1 мм. Цилиндр имеет три патрубка, в один из который осуществляется непрерывная подача насыщенного водяного пар при атмосферном давлении, в двух других патрубках обеспечивается отвод конденсата и излишков поступающего пара. Таким образом на поверхности цилиндра обеспечивалось постоянство температуры.

Для определения плотности теплового потока на поверхность цилиндра устанавливался градиентный датчик теплового потока (ГДТП) (рис. 1, *а*).

Батарейный ГДТП выполнен из монокристаллического висмута размерами в плане 2 × 2 мм и толщиной 0,2 мм. Чувствительность датчика составляет 4,7 мВ/Вт [2].

Два стержня-турбулизатора устанавливаются на поверхность цилиндра вдоль его образующих. Для жесткого крепления стержней была изготовлена специальная рамка (рис. 1, *б*). Стойка с рамкой не вызывали возмущений в потоке, так как выступали за пределы выходного отверстия конфузора. В работе использованы два набора стержней диаметром 1,6 и 3,2 мм, которые устанавливались симметрично на угол $\psi = 90°$.

На рисунке 2 представлены некоторые результаты исследования.

© Князев С. А., Сероштанов В. В., Гусаков А. А., 2025

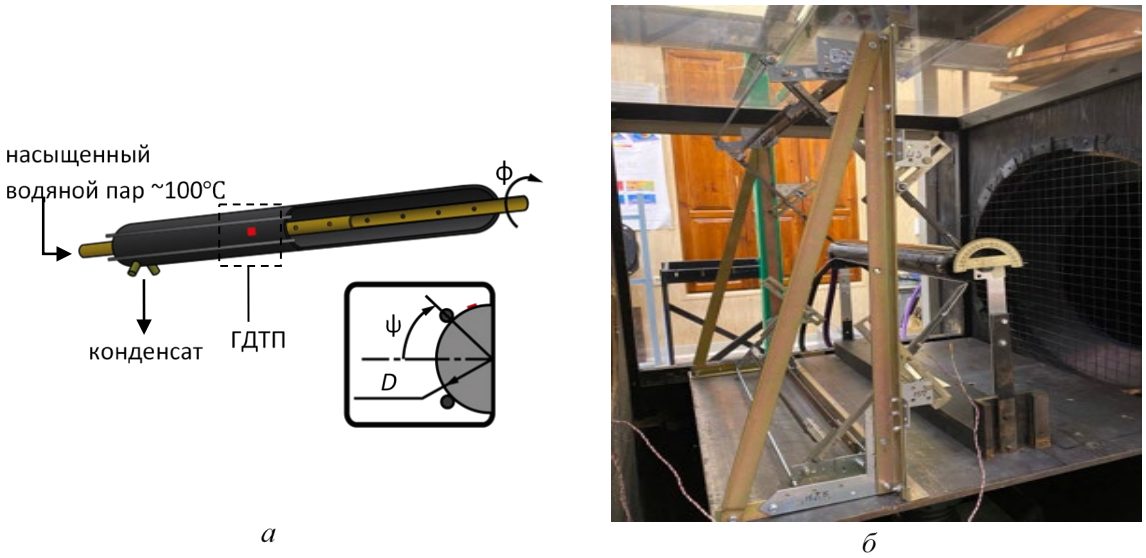


Рис. 1. Исследуемая модель со стержнями-турбулизаторами: *а* – схема; *б* – фото

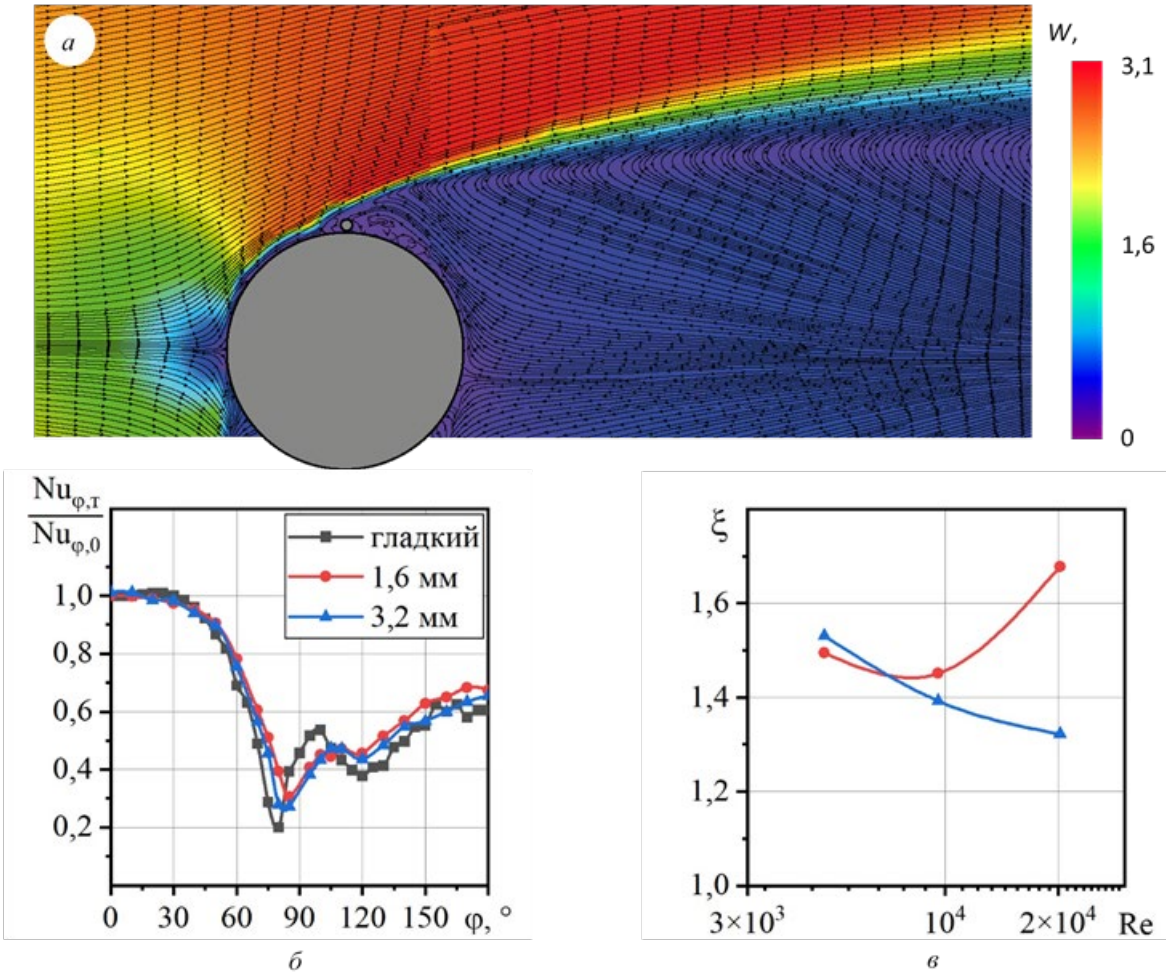


Рис. 2. Визуализация течения вблизи цилиндра со стержнями-турбулизаторами $d = 3{,}2$ мм, $\psi = 90°$ (*а*), распределение местного числа Нуссельта (*б*) и зависимость теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса (*в*)

Установка стержней-турбулизаторов на угол $\psi = 90°$ повышает теплогидравлическую эффективность во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Значитель-

ное повышение теплогидравлической эффективности (до 68 %) наблюдается для турбулизаторов меньшего диаметра. Следует отметить, что повышение вызвано снижением сопротивления, а интенсивность теплообмена не отличается от обтекания гладкого цилиндра.

Список источников

1. Селезнева М. Д., Князев С. А., Клюс А. А., Сероштанов В. В. Интенсификация теплообмена в одиночной овально-траншейной лунке на пластине при изменении угла наклона от 0 до 90° // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1, № 4. С. 30–41.

2. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Основы градиентной теплометрии. СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2012. 203 с.

3. Antonia R. A., Rajagopalan S. (1990). Determination of drag of a circular cylinder. AIAA Journal, 28(10), 1833–1834.

ТЕПЛОФИЗИКА СПИНОДАЛЬНОГО РАСПАДА БИНАРНЫХ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

А. В. Мелких[1,2*], П. В. Скрипов[2]

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина*
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
[2]*Институт теплофизики УО РАН*
630090, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 1
** melkikh2014@gmail.com*

Представлены новые данные о нестационарном переносе теплоты частично растворимыми бинарными жидкостями при глубоком проникновении в область их метастабильных и нестабильных (кратковременно перегретых относительно диффузионной спинодали) состояний. Объект исследования – водный раствор полипропиленгликоля-425, имеющий нижнюю критическую температуру растворения.

Спинодальный распад – это механизм, при котором одна термодинамическая фаза самопроизвольно разделяется на две фазы (без зародышеобразования). Разложение происходит, когда нет термодинамического барьера для разделения фаз. В результате разделение фаз путем разложения не требует событий зародышеобразования, возникающих в результате термодинамических флуктуаций, которые обычно вызывают разделение фаз. Наименее исследованными являются быстрые процессы спинодального распада [1].

В данном докладе представлены новые данные о нестационарном переносе теплоты частично растворимыми бинарными жидкостями при глубоком проникновении в область их метастабильных и нестабильных (кратковременно перегретых относительно диффузионной спинодали) состояний. Объектом исследования являлся водный раствор полипропиленгликоля-425 (ППГ), имеющий нижнюю критическую температуру растворения (НКТР). В ходе опытов по импульсному нагреву зонда степень перегрева достигала 200 К при скорости нагрева зонда 10^5 К/с. Основным режимом нагрева был режим постоянной мощности с характерной длительностью импульса 10 мс. Давление, как параметр, изменяемый в серии измерений, варьировалось от 1 до 100 МПа.

При достижении определенной степени перегрева обнаружено существенное усиление теплообмена (УТ) (сплошная линия на рис. 1). Этот результат мы связываем со спинодальным распадом, как естественным механизмом релаксации в рассматриваемой части фазовой диаграммы. Неожиданным результатом стало обнаружение стадии ухудшенного теплообмена, предшествующей стадии УТ. Эти стадии отражают характерные особенности спинодального распада при данных условиях. Эффект увеличения теплообмена подтверждает перспективность использования растворов с НКТР в качестве хладагентов.

В второй части рассматривается релаксация раствора при докритических давлениях, сопровождающаяся вскипанием смеси (рис. 2). Для учета наличия минимальной температуры спонтанного вскипания в определенном диапазоне скоростей нагрева, что не характерно для полностью совместимых растворов, построена физическая модель.

Результаты исследования использованы для уточнения условий спинодального распада раствора с НКТР, представляющего собой малоизученный фазовый переход на фоне нестабильных состояний. Развитие исследования предполагает поиск общего критерия спинодального распада в условиях быстрого нагрева таких растворов.

© Князев С. А., Сероштанов В. В., Гусаков А. А., 2025

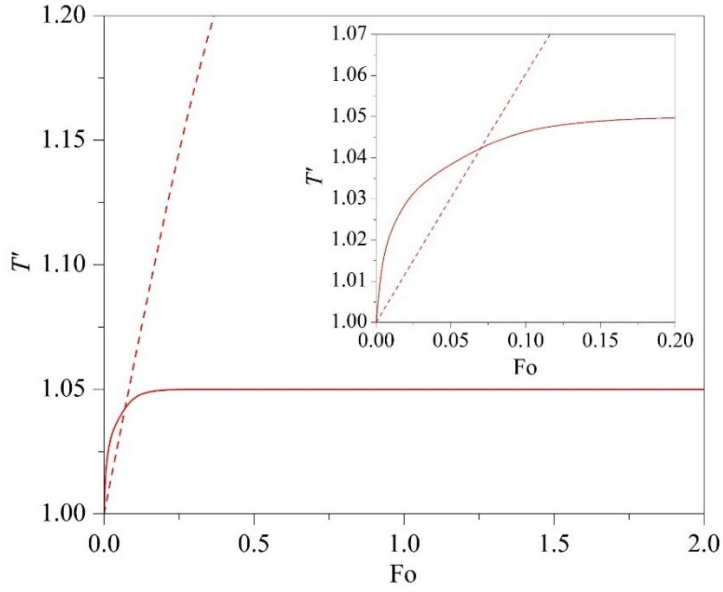


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры зонда от безразмерного времени при A′ = 300, B = 1,5 (сплошная линия) и для A′ = 0; B = 1 (пунктирная линия)

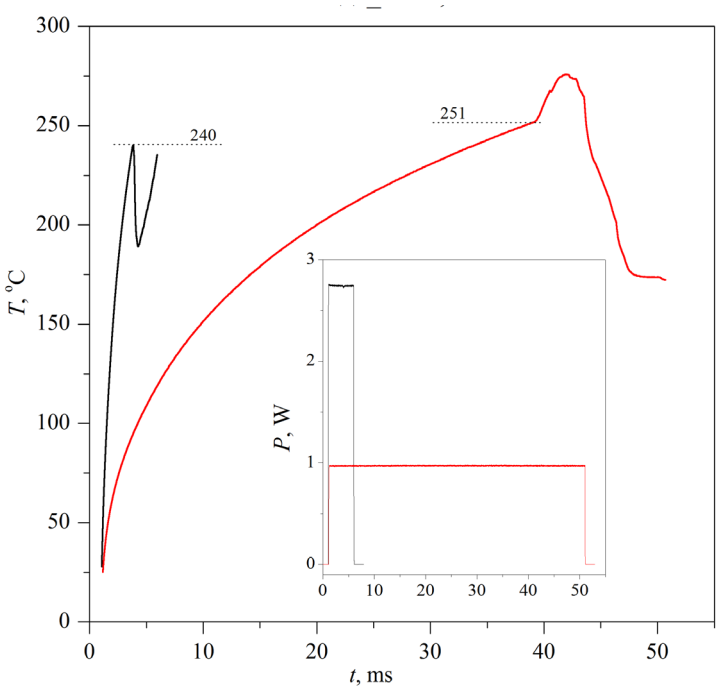


Рис. 2. Вскипание раствора ППГ-425/вода, содержащего 60 % ППГ, при длительностях импульса 5 и 40 мс. Здесь основной график дополнен графиком задаваемых значений мощности

Разработана модель теплопереноса при распаде нестабильного раствора, основанная на анализе зарождения, роста и движения домена новой фазы в поле градиента температуры. В безразмерных переменных баланс энергии зонда представлен в следующем виде:

$$\frac{dT'}{dt'} = -2\left(\frac{T'-1}{\sqrt{t'}}\right)\left(1 + A'\left(T'-1\right)\sqrt{t'}\right) + B\,,$$

здесь B – безразмерный источник теплоты.

В основе уравнения лежит эффект Марангони – движение капель, обогащенных одним из компонентов в поле градиента температур (слагаемое, пропорциональное A').

Результаты моделирования согласуются с результатами экспериментов в условиях мощного тепловыделения и малых временных и пространственных масштабов.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 23-69-10006.

Список источников

1. Skripov P. V., Igolnikov A. A., Rutin S. B., Melkikh A. V. Heat transfer by unstable solution having the lower critical solution temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer 184 (2022) 122290.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ВНУТРИ РАСПОЛОЖЕННЫХ В РЯД НАКЛОННЫХ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК

В. В. Сероштанов[1*], А. А. Клюс[2], С. А. Исаев[2], В. Ю. Митяков[1], С. З. Сапожников[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б
[2] Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова
196210, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38
** serosht_vv@spbstu.ru*

Представлено исследование теплообмена при турбулентном обтекании воздухом однорядного пакета овально-траншейных лунок. Экспериментальная модель представляет прямоугольную пластину с рядом из четырех овально-траншейных лунок, нагретую до 373 К. Число Рейнольдса, определяемое по ширине лунок, составило $3 \cdot 10^4$. Угол наклона (поворота) к набегающему потоку 45°. Местное относительное число Нуссельта внутри лунок, полученное в физическом эксперименте с помощью градиентной теплометрии, согласуется с численными прогнозами на основе RANS-подхода с применением многоблочных вычислительных технологий и SST-модели в пакете VP2/3. Показано, что по ходу движения воздуха повышение относительного числа Нуссельта (как местного, так и среднего по поверхности лунок) возрастает с номером овально-траншейной лунки.

В настоящий момент предложено большое количество методов повышения интенсивности теплообмена, различающихся как уровнем интенсификации, так и увеличением гидравлического сопротивления. Аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных овально-траншейных лунках (ОТЛ) [1], открытая методами численного моделирования, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи (КТО) с темпом, опережающим рост гидравлических потерь относительно гладкой поверхности теплообмена. Трехмерная структура потока, вихреобразование, а также и влияние на интенсивность теплообмена одновременно нескольких геометрических параметров (форма, глубина, длина, наклон к вектору скорости набегающего потока) и гидродинамических режимов подтверждает актуальность исследований теплообмена в ОТЛ экспериментальными и численными методами.

В работе экспериментально и численно исследован конвективный турбулентный теплообмена в однорядном пакете четырех обогреваемых ОТЛ, установленном на пластине. Все ОТЛ имеют ширину D, относительную глубину $h/D = 0{,}25$ и удлинение траншейной вставки $L = 5$. Шаг между ОТЛ составляет $2{,}05D$; угол наклона ОТЛ к вектору скорости набегающего потока $\theta = 45°$.

Теплофизический стенд создан на базе дозвуковой аэродинамической трубы научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [2]. В рабочей зоне трубы размещалась прямоугольная пластина с размерами в плане 0,45 × 0,75 м из стального листа толщиной 0,2 мм. К пластине снизу припаян прямоугольный короб, в который подается насыщенный водяной пар при атмосферном давлении: температура обогреваемого участка пластины оставалась постоянной (373 К). На обогреваемом участке пластины впаяны 4 ОТЛ из листа меди толщиной 0,2 мм. Ширина всех лунок D равна 40 мм. Местная плотность теплового потока измерена с помощью батарейных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) на основе монокристаллического висмута с размерами 2,5 × 2,5 × 0,2 мм [2]. Действие ГДТП основано на поперечном эф-

© Сероштанов В. В., Клюс А. А., Исаев С. А., Митяков В. Ю., Сапожников С. З., 2025

фекте Зеебека: в среде с анизотропией термо- и электрофизических свойств, через которую проходит тепловой поток, возникает поперечная термоЭДС, связанная с проходящим через нее вектором плотности теплового потока. ГДТП устанавливались в продольном срединном сечении ОТЛ и в сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее.

В качестве численной модели рассматривается цифровой двойник экспериментального стенда. Ширина канавки D и скорость набегающего потока U_∞ выбраны в качестве параметров обезразмеривания. Радиус скругления кромок канавок составляет 0,025. Число Прандтля (Pr) для воздуха принимается 0,71; число Рейнольдса (Re) задается равным $3 \cdot 10^4$. Для описания турбулентного течения вдоль пластины с ОТЛ применяется система стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), замыкаемых дифференциальными уравнениями модели переноса сдвиговых напряжений (SST), и уравнение энергии с помощью пакета VP2/3. Решение рассматриваемых уравнений в частных производных основывается на концепции расщепления по физическим процессам с использованием процедуры коррекции давления SIMPLEC [3]. Применяются многоблочные вычислительные технологии (МВТ), основанные на разномасштабных структурированных сетках с их частичным перекрытием. Подробное описание математической модели, постановка и решение задачи представлены в [3].

В качестве примера на рис. 1 показаны распределения относительного коэффициента теплоотдачи в срединном продольном сечении первой и четвертой ОТЛ.

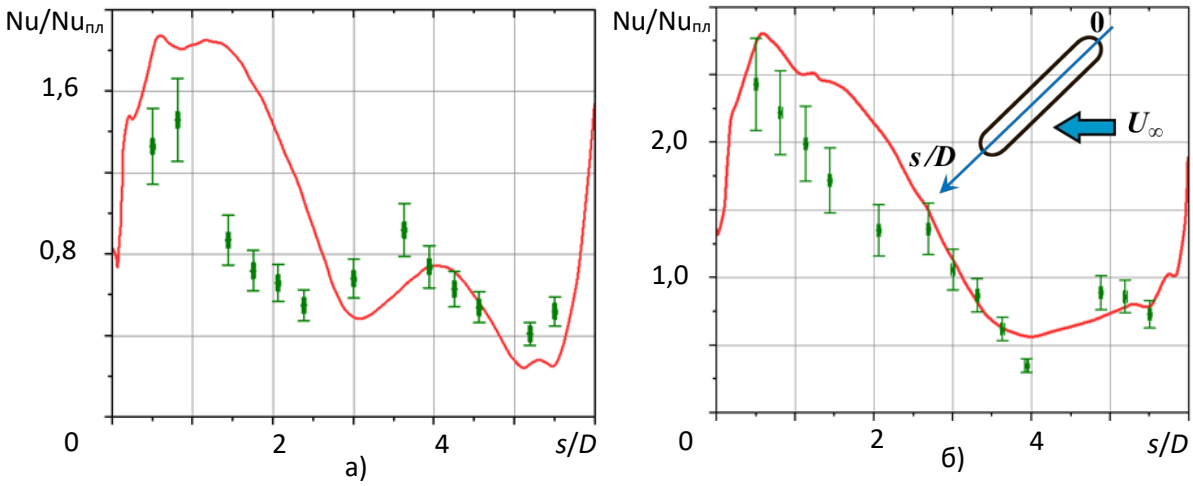


Рис. 1. Распределение относительных чисел Нуссельта в продольных сечениях первой (а) и четвертой (б) ОТЛ (точки –эксперимент, линия –численное моделирование)

По координате s (рис. 1) вдоль срединных сечений ОТЛ наблюдается пик во входной части лунки, превосходящий КТО на плоской стенке. Далее, по мере удаления от входа, относительное число Нуссельта снижается, становясь существенно меньше 1. В задней части поведение кривых немонотонно. Сферические сегменты ОТЛ являются областями угнетенного теплообмена. Подобный характер наблюдается на всех 4 ОТЛ, однако уровень пиковых значений увеличивается, а область угнетенного теплообмена сокращается с увеличением номера ОТЛ. Относительный КТО на дне лунки при переходе от первой к четвертой возрастает в 1,5 раза, а в окрестности наветренной кромки – почти в 2,5 раза.

Список источников

1. Исаев С. А. Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 83–88.

2. Seroshtanov V. V., Selezneva M. D., Maslov V. A., Gusakov A. A. Flow and Heat Transfer Characteristics during the Flow around Tandem of Circular Cylinders // J. Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2023. Vol. 16, N 5. P. 628–638.

3. Исаев С. А., Судаков А. Г., Никущенко Д. В. [и др.]. Тесты для валидационных задач аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на структурированных поверхностях с экстраординарными перепадами давления // Изв. РАН. МЖГ. 2023. № 5. С. 70–81.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА С ПАРНОЙ СПИРАЛЬНО-ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРОЙ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Е. В. Панкратов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Российская Федерация, Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17
e.pankratov@narfu.ru

В работе представлены результаты исследования закрученного потока в кольцевом канале с неподвижными стенками, создаваемого аксиально-лопастным закручивателем. Особое внимание уделено анализу условий возникновения вторичных вихрей, формирования спирально-вихревых структур и их динамике. Для описания устойчивости течения использованы модифицированные параметры числа Тейлора, учитывающие локальную закрутку потока. Исследование проведено экспериментально, а также численным методом с использованием модели турбулентности SST k–ω. Получены зависимости по длине канала, которые показывают, что на начальном участке потока происходит потеря устойчивости, приводящая к образованию спирально-вихревой структуры. Работа направлена на углубление понимания механизмов формирования вихрей в закрученных потоках.

В кольцевых каналах при закрутке потока или около криволинейных поверхностей массовые силы могут вызывать гидродинамическую неустойчивость, сопровождающуюся формированием вторичных вихрей [1]. Такие вихри усиливают локальный теплообмен за счет диссипации тепловой энергии [2]. Большинство исследований вторичных течений сосредоточено на случаях вращения поверхностей канала [3] и влиянии осевого потока w_z [4]. Однако образование вторичных вихрей при неподвижных стенках канала ($\omega_i = 0$ и $\omega_o = 0$) и начальной закрутке потока остается недостаточно изученным.

Для анализа условий возникновения вторичных вихрей, сопровождающегося образованием вторичных течений в кольцевом канале при вращении одного из цилиндров, принято использовать критерий подобия Тейлора. Этот критерий можно представить в следующем виде:

$$\mathrm{Ta} = \mathrm{Re}_{i,o}\sqrt{\frac{\delta}{R_{i,o}}} = \left(\frac{\omega_{i,o}\cdot\delta\cdot R_{i,o}}{\nu}\right)\sqrt{\frac{\delta}{R_{i,o}}} = \frac{\omega_{i,o}}{\nu}R_{i,o}^{1/2}\delta^{3/2}, \quad (1)$$

где $\omega_{i,o}$ – угловая скорость, рад/с; δ – ширина зазора, м; $R_{i,o}$ – радиус цилиндров, м; ν – кинематическая вязкость, м^2/с.

В случае, когда движение жидкости определяется только начальной закруткой потока при неподвижных поверхностях канала ($\omega_i = 0$ и $\omega_o = 0$) и учитывая, что угловую скорость можно записать в виде $\omega = w_\varphi/R$, число Тейлора может быть записано в следующем модифицированном виде:

$$\mathrm{Pa} = \mathrm{Ta}^2 = \mathrm{Re}_\varphi^2\left(\frac{\delta}{R}\right) = \left(\frac{w_\varphi\cdot\delta}{\nu}\right)^2\frac{\delta}{R} = \frac{w_\varphi^2\cdot\delta^3}{\nu^2 R} = \frac{\int_{R_i}^{R_o}\rho w_\varphi^2 R^3 dR}{\int_{R_i}^{R_o}\mu w_z R dR}, \quad (2)$$

где w_φ – окружная скорость, м/с; w_z – осевая скорость, м/с; R – радиус кривизны, м; μ – динамическая вязкость, Па·с.

Закрутка потока осуществлялась аксиально-лопастным закручивателем (22 лопасти, угол закрутки $\varphi = 0$–$90°$). Кольцевой канал имел $D_1 = 2R_1 = 133$ мм, $D_2 = 2R_2 = 172$

© Панкратов Е. В., 2025

мм, длину $L = 1000$ мм, гидравлический диаметр $D_г = 40$ мм, относительную длину $z = 25$ и безразмерный радиус $\eta = 0{,}767$.

Было проведено численное моделирование течения воздуха в кольцевом канале при закрутке потока $\varphi = 75^o$ в программном комплексе ANSYS Fluent (модель турбулентности SST k-w CC). Результаты представлены на рис. 1.

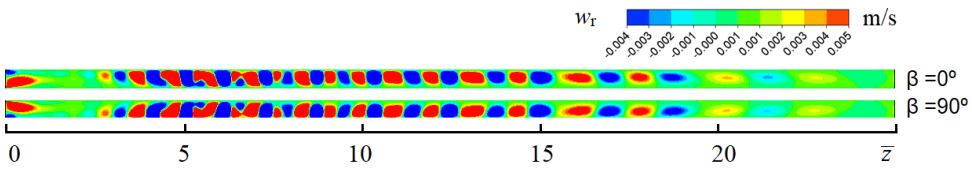


Рис. 1. Распределение радиальной составляющей скорости при $Re_{вх}$=1629, $Pa_{вх}$=10^5, φ =75°

Исходя из распределения радиальной составляющей скорости, можно сделать вывод, что при определенных условиях в зазоре кольцевого канала при начальной закрутке потока и неподвижных поверхностях кольцевого канала могут формироваться спирально-вихревые структуры с чередующимся левым и правым направлением вращения, как показано на рис. 2.

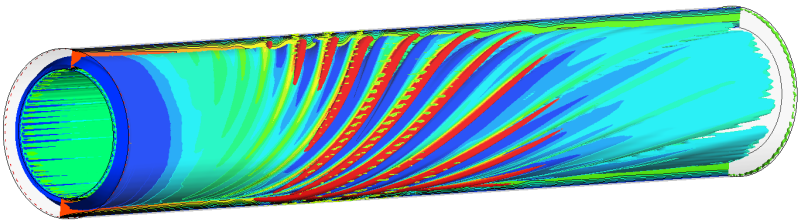


Рис. 2. Распределение W и λ_2-критерия при при $Re_{вх}$ = 1629, $Pa_{вх}$ = 10^5, φ = 75°

Для дальнейшего анализа было построено распределение локального числа Тейлора по длине кольцевого канала, которое представлено на рис. 3.

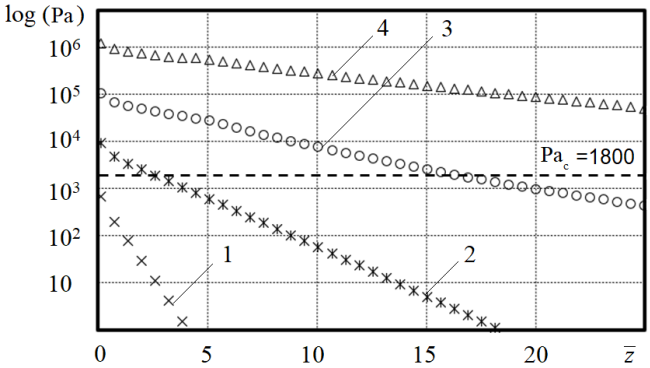


Рис. 3. Распределение локального числа Pa по длине кольцевого канала:
1 – $Re_{вх}$=163, $Pa_{вх}$=$2 \cdot 10^3$; *2* – $Re_{вх}$=515, $Pa_{вх}$=$2 \cdot 10^4$; *3* – $Re_{вх}$=1629, $Pa_{вх}$=$2 \cdot 10^5$; *4* – $Re_{вх}$=5152, $Pa_{вх}$=$2 \cdot 10^6$

Для случая с $Re_{вх} = 1629$, $Pa_{вх} = 2 \cdot 10^5$, $\varphi = 75^o$ на начальном участке канала наблюдается потеря устойчивости и образование самоорганизующегося винтового течения. При Pa ≈ 1800 происходит вырождение вихрей из-за раскрутки потока и увеличения осевой скорости. Проведенное исследование впервые показало влияние локаль-

ной закрутки потока на формирование парных спирально-вихревых структур в кольцевом канале с неподвижными стенками, что отличает его от классических работ, посвященных системам с вращающимися поверхностями.

Полученные зависимости локального числа Pa и динамика вырождения вторичных вихрей расширяют понимание процессов закрутки и могут быть использованы для оптимизации систем теплообмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Список источников

1. Щукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1980.

2. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow // International Journal of Thermal Sciences – INT J THERM SCI. 2011. Т. 50. С. 1138–1155.

3. Wimmer M. Taylor vortices at different geometries // Physics of Rotating Fluids : Lecture Notes in Physics / сост. R. Beig [и др.]; ред. C. Egbers, G. Pfister. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. Т. 549. С. 194–212.

4. Andereck C. D., Liu S. S., Swinney H. L. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1986. Vol. 164. P. 155–183.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗА ПРЕПЯТСТВИЯМИ В КАНАЛЕ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ РАСХОДА

Н. С. Душин

ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31
ndushin@bk.ru

Изучено влияние наложенной нестационарности течения на характер формирования вихрей за обратным уступом и массивом выступов с использованием двумерных оптических измерений и спектральной кластеризации. В экспериментах изменялась частота и амплитуда пульсаций расхода, что влекло за собой периодическое изменение скорости течения в диапазоне чисел Струхаля по высоте препятствия от 0,015 до 0,62 и относительной амплитуды скорости β в диапазоне от 0,1 до 0,8. Обосновано существование трех различных нестационарных режимов течения в ближнем следе за препятствием и получены характеризующие эти режимы критерии. Получена единая для обратного уступа и массива выступов карта режимов течения, учитывающая изменение варьируемых параметров, доказана возможность прогнозирования режимов течения только по числу Струхаля. Проанализирована связь установленных границ режимов течения со спектром естественных частот и частотами flapping и shedding. Показано, какое влияние на формирование вихрей оказывает амплитуда наложенных пульсаций скорости.

Исследование направлено на поиск и обоснование критериев для прогнозирования режимов формирования вихрей в ближнем следе за обратным уступом и массивом выступов при нестационарном течении газа в канале в широком диапазоне частот и амплитуд наложенных пульсаций скорости. Решение этой задачи позволяет оптимизировать исследования структуры течения в каналах с элементами дискретной шероховатости, например, каналах теплообменных аппаратов, на нестационарных режимах течения, упрощает применение результатов исследований при их реализации в технических устройствах и вносит вклад в обобщенное понимание влияния эффектов от наложенной нестационарности на течение в каналах рассмотренной формы.

Для измерения характеристик вихрей применялся двумерный оптический метод Smoke Image Velocimetry (SIV). Поиск и обоснование критериев прогнозирования режимов течения выполнены с использованием спектральной кластеризации (одного из алгоритмов машинного обучения без учителя) в комбинации с методом определения количества кластеров «self-tuned k method». Выбор спектральной кластеризации в работе связан с особенностями топологии исходных данных. В качестве исходных данных для матрицы взаимосвязи использованы корреляционные матрицы характеристик вихревых структур (диаметра и пространственного положения). Коэффициенты корреляции рассчитаны исходя из изменения рассматриваемых характеристик по фазам. Собственные значения и собственные векторы рассчитаны по нормализованной матрице Лапласа. Описанный алгоритм является оригинальным и позволяет исключить субъективный вклад при группировке данных.

Все расчеты для обратного уступа и массива выступов выполнялись независимо, но обобщение результатов проводилось в единой системе координат. В частности, отображение результатов кластеризации на плоскость управляющих параметров $\beta(A_u fh/U_b^2)$ позволило установить хорошее согласование данных для обоих типов препятствий и получить единую карту режимов течения. Границы между режимами течения в этой плоскости линейные и сходятся в начале координат, что позволяет охаракте-

© Душин Н. С., 2025

ризовать их последовательными диапазонами чисел Струхаля (St). С этой точки зрения выделенные режимы течения можно назвать аналогично классификации [1]: низкочастотный, высокочастотный и быстро осциллирующий, заменив турбулентное число Стокса на число Струхаля, вычисленное по высоте препятствия h, что естественно для отрывных течений.

Анализ структуры течения показал, что низкочастотный режим характеризуется формированием крупномасштабной вихревой структуры (с диаметром до 4,2h) и реализуется на нестационарных режимах при числах Струхаля до 0,093. На высокочастотном режиме вблизи препятствия образуется вихрь с высоким значением завихренности и масштабом порядка высоты препятствия. Высокочастотный режим имеет место для диапазона чисел Струхаля от 0,093 до 0,24. При числах Струхаля более 0,24 реализуется быстро осциллирующий режим, который характеризуется формированием последовательности мелких вихрей, не контактирующих со стенкой канала в ближнем следе за препятствием.

Конечно, переход между режимами течения происходит не скачком, и структура потока меняется постепенно. В то же время примененный алгоритм кластеризации делит анализируемые объекты на группы таким образом, чтобы объекты, принадлежащие одной группе, были максимально похожи друг на друга, и при этом сильно отличались от объектов, находящихся в других группах. Из этого следует, что распространять характерные эффекты, полученные для некоторых точек, на весь выделенный режим можно, но их «интенсивность» в пределах режима может быть разной.

Полученные значения граничных чисел Струхаля сопоставимы с известными данными о частотах flapping и shedding. Анализ этого аспекта с привязкой к спектрам естественных частот пульсаций скорости при стационарном обтекании рассматриваемых препятствий показал, что низкочастотный режим течения полностью связан с частотами flapping. Высокочастотный режим в целом находится в диапазоне частот shedding. Граница между высокочастотным и быстро осциллирующим режимами находится в области затухания всплесков амплитуды пульсаций скорости. При этом быстро осциллирующий режим проявляется при частотах внешнего воздействия, превышающих частоты shedding, и находится на участке амплитудно-частотой характеристики с более крутым наклоном. Пик амплитуды пульсаций скорости в спектре естественных частот на границе частот shedding и flapping соответствует наиболее крупным и интенсивным вихрям.

Влияние амплитуды примененного способа воздействия на поток проявляется в изменении диапазона скорости ядра потока в течение периода воздействия. Очевидно, что при увеличении амплитуды воздействия диапазон наблюдаемых скоростей также увеличивается. Соответственно, образующиеся за препятствием вихри имеют большую скорость вращения и в течение периода смещаются на большее расстояние. На низкочастотном режиме большая начальная скорость вращения ядра вихря способствует увеличению его масштаба. Так, при $\beta = 0{,}29$ масштаб вихря достигает 3h, а при $\beta = 0{,}7h$ – 4h. На высокочастотном режиме увеличение β способствует увеличению скорости обратного течения над препятствием. При приближении числа Струхаля в канале с обратным уступом к 0,2 и 0,25 в канале с массивом выступов, увеличение β выше 0,2 сопровождается поднятием оси вращения вихря над препятствием до 1,5h и вихрь может обтекать препятствие, за которым он сформировался. При низких амплитудах внешнего воздействия ось вращения вихря поднимается только до высоты препятствия. Если значение $\beta > 0{,}45$, то эффект поднятия вихря над препятствием на высокочастотном режиме проявляется независимо от близости числа Струхаля к обозначенным частотам.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты

докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение № 62/2024-ПД).

Список источников

1. Ramaprian B. R., Tu S. W. Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2. The detailed structure of the flow // J. Fluid Mech. 1983. Vol. 137, P. 59–81.

НОВЫЕ ФУТЕРОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА УГЛЕРОДНОГО СЫРЬЯ

А. В. Прошкин[1*], Г. Е. Нагибин[2], В. В. Пингин[1], Д. Г. Агафонов, А. Г. Сбитнев

[1] ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»
660111, Российская Федерация, Красноярск, ул. Пограничников, д. 37/1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** Aleksandr.Proshkin@rusal.com*

В работе рассмотрены актуальные проблемы алюминиевого производства, касающиеся энерго- и ресурсосбережения, экологии. Показано, что одним из возможных направлений их решения могут быть новые неформованные футеровочные материалы (НФМ) на основе продуктов пиролиза углеродного сырья. Описаны технологии их монтажа и последующего повторного использования (рециклинга). Показаны преимущества электролизеров, футерованных НФМ, заключающиеся в повышении тепловой и экономической эффективности их применения за счет более низкой плотности и стоимости, повышенной производительности монтажа, сокращения количества образующихся отходов и повышения сроков службы электролизеров.

Приведены методики лабораторных и промышленных исследований теплофизических свойств футеровочных материалов на основе продуктов пиролиза углеродного сырья. Приведены результаты сравнительного анализа характеристик традиционных и новых футеровочных материалов. Изложены результаты исследования коэффициентов теплопроводности, термического расширения и усадки отработанных футеровочных материалов, а также результаты сопоставительных испытаний катодных устройств с повторно используемыми и исходными материалами. Приведено описание особенностей электролизеров с новыми футеровочными материалами при пуске электролизеров и в процессе их последующей службы.

© Прошкин А. В., Нагибин Г. Е., Пингин В. В., Агафонов Д. Г., Сбитнев А. Г., 2025

РАЗВИТИЕ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ АНОДНОГО ГАЗА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ СОДЕРБЕРГА

А. А. Дектерев[1, 2*], П. А. Необъявляющий[1, 2], Д. А. Дектерев[1, 2], Ар. А. Дектерев[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** dekterev@mail.ru*

Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований газового горения в устройствах и системах термического обезвреживания горючих компонент анодного газа, выделяющегося в процессе электролиза по технологии Содерберга. Показана эволюция устройств термического обезвреживания анодного газа, применяемых на заводах компании РУСАЛ, начиная от традиционных щелевых горелок и заканчивая новыми системами газоудаления, разработанными для технологии «ЭкоСодерберг». На основе выполненных авторами исследований были разработаны технические решения по модернизации рассматриваемых устройств, позволяющие значительно сократить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Технические решения были апробированы и внедрены в технологию на заводах компании РУСАЛ.

При производстве алюминия в электролизере Содерберга анодные газы, выделяющиеся из-под анода, улавливаются газосборным колоколом (ГСК) и эвакуируются через горелочные устройства в газосборную сеть системы газоочистки электролизного корпуса. В традиционной технологии Содерберга основную роль в обезвреживании анодного газа играют дожигательные горелочные устройства, установленные на выходе из ГСК электролизеров.

Цель представленных работ заключалась в комплексном, расчетно-экспериментальном исследовании аэродинамики и тепломассообмена в устройствах улавливания, транспортировки и термического обезвреживания анодных газов алюминиевого производства, оптимизации режимов работы и конструкций этих устройств.

В ходе реализации первой части работы были выполнены следующие задачи:

– разработана математическая модель процессов аэродинамики, тепломассообмена в горелочных устройствах для дожигания анодного газа;

– проведены натурные экспериментальные исследования теплофизических параметров газовых потоков в устройствах улавливания, сжигания и транспортировки анодных газов для идентификации и адаптации математической модели;

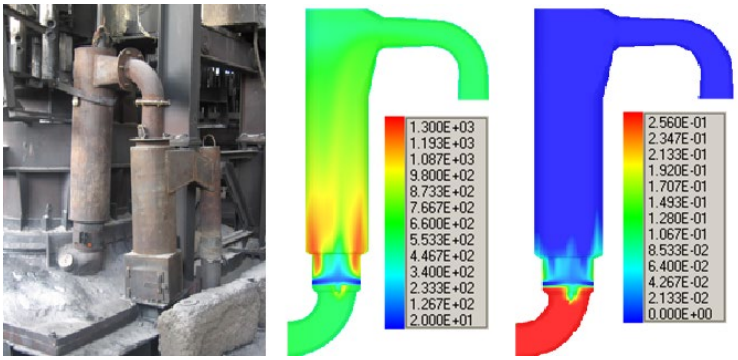
– выполнено численное исследование процессов тепломассообмена в горелочных устройствах электролизеров Содерберга, установлено влияние состава анодного газа и расхода эжектируемого воздуха, а также конструкции исследуемых устройств на эффективность обезвреживания анодного газа алюминиевого производства;

– разработаны технические решения по оптимизации конструкции горелочных устройств для дожигания анодного газа электролизеров Содерберга.

Разработанные оптимизированные конструкции горелочных устройств (рис. 1) были реализованы в виде опытных образцов и испытаны в промышленных условиях. Предложенные конструкции имели высокие рабочие и эксплуатационные показатели. Снижение концентрации загрязняющих веществ на выходе из горелки составило: по СО в 3 раза; по пыли в 1,8 раза; смолистые в 2,4 раза; бенз(а)пирен в 5,5 раза.

© Дектерев А. А., Необъявляющий П. А., Дектерев Д. А., Дектерев Ар. А., 2025

Однако, несмотря на высокую эффективность термического обезвреживания анодных газов в усовершенствованных конструкциях горелок, электролизеры Содерберга демонстрировали низкую эффективность ГСК по улавливанию газов. Это приводило к повышенным вредным выбросам в рабочую зону электролизных корпусов и далее в атмосферу через аэрационные фонари.



а б в

Рис. 1. Горелочное устройство для дожигания анодных газов:
а – вид горелки; *б* – поле температур в вертикальном сечении; *в* – поле концентраций CO

При разработке технологии «ЭкоСодерберг» сотрудниками ООО РУСАЛ ИТЦ была спроектирована новая безгорелочная купольная система газоудаления, представляющая ГСК улучшенной конструкции с четырьмя куполами, от которых осуществляется газоудаление. Разработанная конструкция подразумевала сжигание горючих компонент анодного газа в пространстве под ГСК и в куполах (рис. 2).

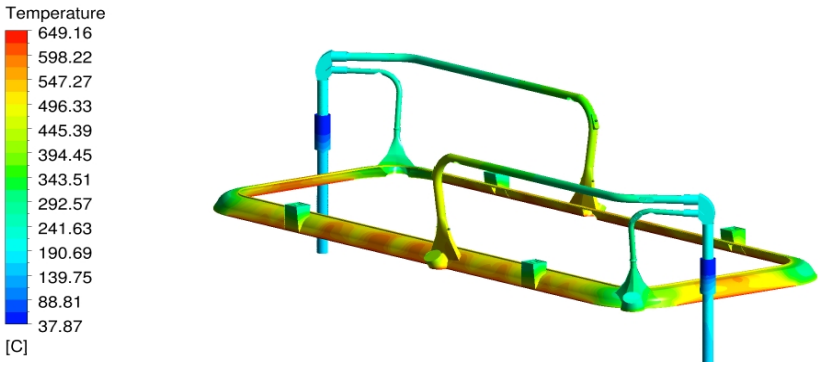


Рис. 2. Геометрия купольной ГСК и распределение температуры по поверхности

Опытная эксплуатация купольных систем газоудаления (СГУ) показала высокую герметичность при повышении уровня разрежения под ГСК и, как следствие, снижение выбросов анодных газов от электролизеров в электролизный корпус. Однако эффективность термического обезвреживания газов в купольных СГУ оказалась ниже, чем в дожигательных горелках традиционной технологии. Оптимизации купольных СГУ была посвящена вторая часть работы.

В ходе реализации второй части работы были решены следующие задачи:

– проведены натурные экспериментальные исследования теплофизических параметров газовых потоков в купольных СГУ;

– разработана математическая модель процессов аэродинамики, тепломассообмена в купольной СГУ;

– выполнено численное исследование процессов тепломассообмена в купольных СГУ электролизеров «ЭкоСодерберга», установлено влияние состава анодного газа, расхода и мест эжекции воздуха, а также конструкции элементов СГУ на эффективность улавливания и обезвреживания анодного газа;

– разработаны технические решения по модернизации купольных СГУ для электролизеров «ЭкоСодерберг», обеспечивающих правильное дожигание анодных газов в подколокольном и купольном пространстве, позволившие при сохранении эффективности ГСК повысить эффективность термического обезвреживания газов.

Разработанные технические решения были адаптированы на электролизеры Содерберга различных моделей и применялись при переводе предприятий РУСАЛа на технологию «ЭкоСодерберг». Электролизеры, прошедшие модернизацию, демонстрируют снижение выбросов загрязняющих веществ в среднем на 14 %, а фтора – более чем на 32 %.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ, ИНДУЦИРУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

П. И. Поляков[1*], И. О. Тепляков[1], С. М. Юдин[1, 2]

[1]*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук*
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/2
[2]*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
** paul.ingvarsson@yandex.ru*

Представлены результаты численного расчета электровихревых течений в расплаве In-Ga-Sn, индуцированных синусоидальным током низкой частоты (0,1–20 Гц), в полусферическом медном сосуде. Получены поля скорости и температур расплава. Показан характер влияния частоты синусоидального тока на движение и теплопередачу в жидком металле.

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают при пропускании электрического тока, имеющего неоднородное пространственное распределение, через объем проводящей жидкости [1]. ЭВТ наблюдаются в электрометаллургических печных агрегатах [2], электрошлаковой сварке [3], термоядерной энергетике [4] и в жидкометаллических батареях [5]. В диссертации [6] показано, что в электрометаллургических печных агрегатах за счет использования низкочастотного тока увеличивается коэффициент мощности печных комплексов и повышается качество выплавляемого металла.

В настоящей работе, выполненной в лаборатории 10.2 ОИВТ РАН, осуществлен численный расчет ЭВТ, индуцированных переменным током низкой частоты (0,1–20 Гц), в полусферическом медном сосуде. Рассчитана нестационарная задача распределения электромагнитного поля, движения проводящей жидкости и переноса тепла в цилиндрических координатах в расчетной области, показанной на рис. 1. В качестве модельной жидкости использован эвтектический расплав In-Ga-Sn со свойствами, описанными в [7].

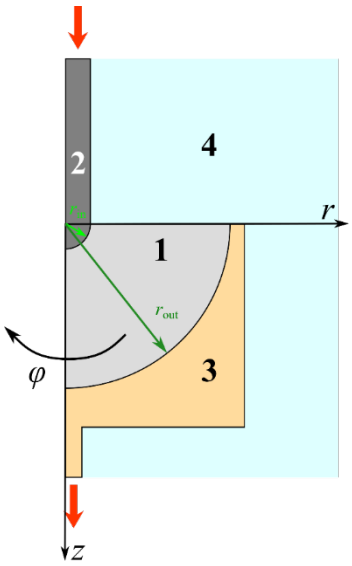


Рис. 1. Расчетная область: *1* – область расплава; *2* – электрод с полусферическим наконечником радиусом $r_{in} = 2{,}5$ мм; *3* – медный сосуд с полусферической полостью радиусом $r_{out} = 94$ мм; *4* – воздух; красными стрелками показаны ввод и вывод электрического тока

© Поляков П. И., Тепляков И. О., Юдин С. М., 2025

В ходе расчетов варьировались амплитуды силы и частоты пропускаемого тока. Получены поля скорости и температуры в области расплава. Показано, что при повышении частоты тока уменьшаются колебания скорости и переноса теплоты, уменьшается перенос тепла от электрода в объем расплава, профили осевой компоненты скорости уплощаются.

Для оценки качества перемешивания решена задача о переносе нейтральной примеси. В объеме расплава выделена зона, заполненная примесью, свойства которой неотличимы от свойств среды. По распределению доли примеси в объеме расплава и времени достижения требуемой осредненной по объему концентрации примеси делается вывод о качестве перемешивания.

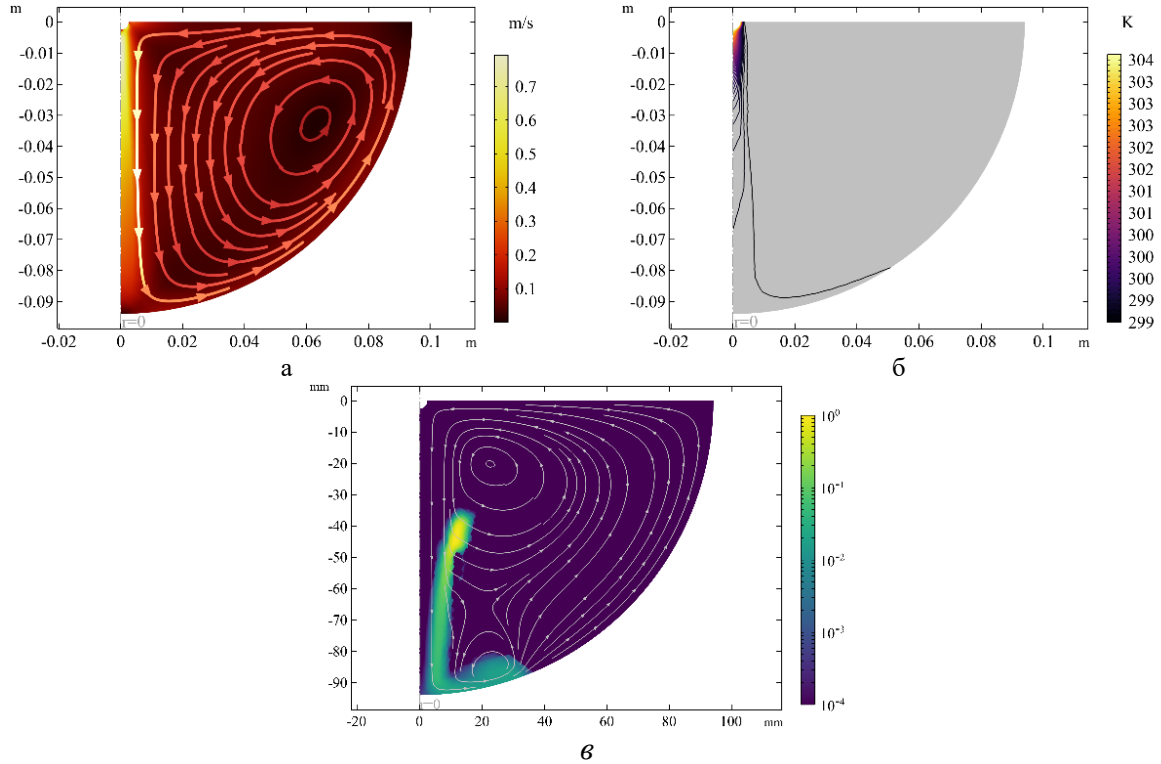


Рис. 2. Рассчитанные поля скорости (*а*), температуры (*б*) и концентрации нейтральной примеси (*в*) при токе 1000 А и частоте 0,5 Гц

Список источников

1. Бояревич В. В., Фрейберг Я. Ж., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. Рига : Зинатне, 1985.

2. Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В. Магнитная динамика в металлургии. М. : Металлургия, 1974. 240 с.

3. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковый металл. Киев : Наукова думка, 1981. 680 с.

4. Marty P., Martin-Witkowski L. Contrôle de la convection Marangoni thermique dans les procédés de bombardement électronique // International Journal of Thermal Sciences. 2000. Vol. 339(2). Pp. 285–294.

5. Stefani F., Galindo V., Kasprzyk C., Landgraf S., Seilmayer M., Starace M., Weber N., Weier T. Magnetohydrodynamic effects in liquid metal batteries // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 143, 012024

6. Нехамин С. М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты. М. : НИУ «МЭИ», 2015.

7. Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Eckert S., Gerberth G., Novakovic R. Thermophysical Properties of the Liquid Ga−In−Sn Eutectic Alloy // Journal of Chemical & Engineering Data. 2014. Vol. 59. Pp. 757–763.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРЕВА РАСПЛАВА НА ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ СОВМЕЩЕННОМ ЛИТЬЕ И ПРЕССОВАНИИ

А. С. Потапенко*, А. П. Скуратов, А. В. Ивлев

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** komvzvodt-81@mail.ru*

На основе трехмерной компьютерной модели сложного теплообмена проведено численное исследование зоны прессования процесса непрерывного совмещенного литья и прессования опытного алюминиевого сплава АК-12 в установке с горизонтальным, карусельным кристаллизатором. Изучена динамика изменения температуры затвердевшего сплава и контактирующих элементов установки в переходном тепловом режиме при различном перегреве заливаемого расплава. Определено влияние характера теплообмена в переходном тепловом режиме на температурное поле затвердевшего сплава при возникновении в зоне прессования дополнительных источников тепла. Показано, что по мере разогрева кристаллизатора и инструмента прессования в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля в контрольном сечении металла вблизи пресс-матрицы со сдвигом области с максимальной температурой к контактирующим поверхностям с затвердевшим сплавом. Определена величина тепловой энергии, образующейся в зоне прессования, требующая организации принудительного охлаждения элементов установки. Проведена оценка динамики изменения температуры кристаллизатора и прессового инструмента в зоне прессования во всем периоде переходного теплового процесса при различной величине перегрева расплава.

Установки, реализующие энерго- и ресурсосберегающую технологию совмещения операций непрерывного литья и обработки давлением, имеют разнообразные конструкции, основными элементами которых является кристаллизатор и инструмент прессования. Основным технологическим параметром процесса непрерывного совмещенного литья и прессования является промежуток времени между моментами заливки в кристаллизатор расплава и поступления затвердевшего сплава в инструмент прессования. Правильный выбор условий затвердевания слитка, существенно влияющий на формирование его структуры и свойств, связан с организацией теплообмена в различные тепловые периоды работы установки: переходном и установившемся [1–3]. Вместе с тем процесс прессования сплавов является сложным и энергоемким процессом. При прессовании выделяется большое количество теплоты, образованной действием сил трения и пластической деформации металла. При увеличении скорости прессования интенсивно растет температура деформируемого металла и при достижении критических температур происходит разрушение пресс-изделия [4; 5]. В отечественной промышленности к инновационным установкам, совмещающих в себе процессы литья и прессования можно отнести горизонтальную машину полунепрерывного литья заготовок (ГМПЛЗ) [6]. Следует также отметить усовершенствованный процесс Экстролинг, реализованный в опытно-промышленной установке СЛИПП-2,5, который представляет собой способ совмещения процессов прокатки и прессования в одном очаге деформации. В данной технологии выдавливание металла осуществляют через прессовую матрицу за счет активных сил контактного трения между валками и заготовкой [7]. За рубежом широкое распространение, особенно в цветной металлургии, получили агрегаты Super Caster итальянского производства фирмы Fata-Hunter, отличительной особенностью которых являются большие диаметры валков-кристаллизаторов, каждый

© Потапенко А. С., Скуратов А. П., Ивлев А. В., 2025

из которых имеет индивидуальный привод от электродвигателя постоянного тока через планетарный редуктор [8].

В работе рассмотрена установка непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов с горизонтальным карусельным кристаллизатором, в которой жидкий металл заливается через дозатор в кольцевую канавку вращающегося колеса-кристаллизатора и затвердевает до входа в неподвижную камеру прессования, образованную на участке сопряжения канавки с дугообразным сегментом. Затвердевший металл, поступая в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы в виде пресс-изделия. Процессы заливки жидкого металла в канавку, его затвердевание и прессование протекают непрерывно. Совмещение процессов непрерывного литья и прессования металла в единую технологическую цепочку возможно при таких тепловых условиях, которые обеспечивают затвердевание расплава в канавке колеса-кристаллизатора и стабилизацию температуры в сечении расплава перед зоной прессования, а также обеспечивается достаточный отвод тепла от прессового инструмента.

Цель работы заключалась в проведении теоретических исследований влияния перегрева заливаемого алюминиевого расплава на величину тепловой энергии, образующейся в зоне прессования металла в установке непрерывного совмещенного литья и прессовании с горизонтальным, карусельным кристаллизатором. На основе трехмерной компьютерной модели сложного теплообмена изучена динамика изменения температуры, затвердевшего опытного алюминиевого сплава АК-12 в процессе прессования в установке с горизонтальным, карусельным кристаллизатором при различной величине его перегрева. Определена величина и влияние выделяющегося тепла в зоне прессования от сил трения и деформации сплава в переходном тепловом режиме на температурное поле затвердевшего сплава в контрольном сечении вблизи пресс-матрицы. Показано: по мере разогрева кристаллизатора и инструмента прессования в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля затвердевшего расплава, которое в контрольном сечении вблизи пресс-матрицы характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к контактирующим с металлом поверхностям.

Список источников

1. Krol M., Tanski T., Snopinski P., Tomiczek B. Structure and properties of aluminium – magnesium casting alloys after heat treatment // Journal of thermal analysis and calorimetry. 2017. Vol. 127. N 1. P. 299–308.

2. Wan Y. C., Xiao H. C., Jiang S. N., Tang B., Liu C. M., Chen Z. Y., Lu L. W. Microstructure and mechanical properties of semi – continuous cast MG-GD-Y-ZR alloy // Materials science and engineering. 2014. Vol. 617. N 1. P. 243–248.

3. Liu J., Liu C. Optimization of mold inverse oscillation control parameters in continuous casting process // Materials and manufacturing processes. 2015. Vol. 30. N 4. P. 563–568.

4. Potapenko A. S., Skuratov A. P., Gorohov YU. V. Dinamika zatverdevaniya alyuminievogo splava pri nestacionarnom teplovom rezhime ustanovki nepreryvnogo lit'ya i pressovaniya. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. T. 21. N 7. S. 109–118.

5. Skuratov A. P., Potapenko A. S., Gorohov YU. V. Issledovanie teplovoj raboty ustanovki nepreryvnogo lit'ya i pressovaniya alyuminiya v perekhodnom rezhime. ZHurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. 2017. T. 10. No. 3. S. 337–345.

6. Kryukov I. Yu., Naumova M. G., Vdovin K. N., Larina T. P. Razrabotka matematicheskoj modeli teplovogo sostoyaniya kristallizuyushchejsya zagotovki pryamougol'nogo secheniya v gorizontal'noj mashine polunepreryvnogo lit'ya. Technical sciences. 2016. No 10. C. 306–311.

7. Dovzhenko N. N., Sidel'nikov S. B., Belyaev S. V., Soldatov S. V., Bespalov V. M., Leonov V. V. Sovershenstvovanie konstrukcii opytno-promyshlennoj ustanovki SLIPP-2,5. ZHurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. 2012. T. 5. No. 7. C. 817–828.

8. Philippe Jarry, Michel Rappaz. Recent advances in the metallurgy of aluminium alloys. Part I: Solidification and casting. Comptes Rendus Physique. 2018. Vol. 19. No. 8. P. 672–687.

О РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

М. И. Петухов*, В. А. Демин

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Российская Федерация, Пермь, ул. Букирева, д. 15
** geniusmaxp@yandex.ru*

В работе изучается процесс протекания постоянного электрического тока через слой жидкого диэлектрика, расположенного между плоскими металлическими электродами. Для описания данного процесса используется физико-математическая модель, включающая диффузию и электромиграцию ионов, а также транспорт ионных пар в диэлектрике. Уравнения переноса и электростатики совместно с граничными условиями на потоки позволяют описать замкнутый цикл окислительно-восстановительного процесса. По полученным стационарным профилям концентраций ионов и электрического потенциала построены вольт-амперные характеристики. Производится анализ нелинейности вольт-амперных характеристик.

Теоретическое исследование посвящено процессам установления электрического тока в жидком диэлектрике, помещенном между двумя плоскими электродами, на которых поддерживается постоянная разность потенциалов. Согласно предложенной физико-математической модели поведение ионов проводимости и ионных пар описывается при помощи соответствующих уравнений переноса, в которых учитываются диффузия, электромиграция, рекомбинация и диссоциация [1–3]. Связь концентрации ионов с напряженностью электрического поля осуществляется при помощи дополнительного уравнения электростатики. В задаче учитывается, что на электродах происходит восстановление ионов с их дальнейшим превращением в ионную пару. Таким образом, в совокупности с граничными условиями на потоки данная система уравнений позволяет описать замкнутый цикл окислительно-восстановительного процесса.

Результатом численного решения одномерной задачи являются стационарные профили концентраций и электрического потенциала. Их анализ позволяет выделить два режима прохождения электрического тока в зависимости от разности потенциалов, приложенной к электродам. Так, при малых значениях разности потенциалов электропроводность обуславливается интенсивными рекомбинацией, диссоциацией и переносом ионов в приэлектродных пограничных слоях. При этом крупномасштабного движения ионов между электродами нет. Из-за присутствия области с малой напряженностью электрического поля в объеме диэлектрика на пути от одного электрода к другому ион с большой вероятностью рекомбинирует. Увеличение приложенного к электродам напряжения приводит к качественной перестройке всех профилей. Напряженность поля в диэлектрике теперь достаточна для организации прямой миграции между электродами.

Такие изменения проявляются и в вольт-амперных характеристиках, которые выходят из начала координат и имеют несколько точек перегиба при развитии пограничных слоев. При достижении системой сквозной миграции ионов между электродами вольт-амперная характеристика выходит на участок линейного роста. Угол наклона данной прямой определяется электропроводностью среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Пермского края, проект № 24-29-20277.

© Петухов М. И., Демин В. А., 2025

Список источников

1. Pontiga F., Castellanos A. Physical mechanisms of instability in a liquid layer subjected to an electric field and a thermal gradient // Physics of fluids, 1994, 6, 1684.

2. Melnikov S. Ion transport and process of water dissociation in electromembrane system with bipolar membrane: modelling of symmetrical case // Membranes, 2023, 13, 47.

3. Schiffbauer J., Ganchenko N., Ganchenko G., Demekhin E. Overlimiting current due to electro-diffusive amplification of the second Wien effect at a cation-anion bipolar membrane junction // Biomicrofluidics, 2018, 12, 064107.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ В ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ (Ni_2V+ Ni_3V)

Ю. А. Абзаев[1], А. А. Клопотов[1], С. А. Гуда[2, 3], М. С. Сыртанов[4], Г. Г. Волокитин[1], В. Ю. Лавров[1*]

[1]Томский государственный архитектурно-строительный университет
6340003, Российская Федерация, Томск, пл. Соляная, д. 2
[2]Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов, Южный федеральный университет
344090, Российская Федерация, Ростов-на-Дону, ул. Андрея Сладкова, д. 178/24
[3]Институт математики, механики и компьютерных наук имени И. И. Воровича, Южный федеральный университет
344090, Российская Федерация, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, д. 8а
[4]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
6340050, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 30
** valentinlavrov99@gmail.com*

В упорядоченных фазах Ni_3V и Ni_2V на основе теоретических расчетов, проведенных в рамках квазигармонического приближения, получены температурные зависимости свободной энергии Гельмгольца, энергии Гиббса, энтропии и теплоемкости в температурном интервале от 0 до 970 К. Установлено, что в температурном интервале от 0 до 670 К более стабильным является соединение Ni_2V. По достижении температуры 670 К более стабильным становится соединение Ni_3V. Рентгеноструктурным методом установлено, что исследуемый сплав с химическим составом Ni–29 ат.%V является двухфазным и содержит упорядоченные соединения Ni_3V и Ni_2V.

В бинарных сплавах Ni-V в области составов 27–33 ат.%V в результате эвтектоидного распада при температуре ниже 908 °C из разупорядоченного твердого раствора на основе ГЦК решетки образуется двухфазная смесь из упорядоченных фаз Ni_2V и Ni_3V со сверхструктурами «типа Pt_2Mo» и $D0_{22}$ соответственно [1]. Элементарные ячейки этих кристаллических структур приведены на рис. 1. Упорядочивающаяся фаза Ni_2V со сверхструктурой типа $MoPt_2$ получается поворотом и трансляцией исходной ГЦК решетки [2]. Перестройка элементарных ячеек показана на рис. 1.

Двухфазная смесь из упорядоченных фаз Ni_2V и Ni_3V обладает уникальными физико-химическими свойствами, обусловленными их кристаллической структурой и особенностями фазовых взаимодействий. Важной особенностью двухфазной смеси (Ni_2V + Ni_3V) является способность образовывать в сплаве с составами Ni + (27–33) ат.%V упорядоченные сверхструктуры с высокой термодинамической стабильностью. Так, в работе [3] показано, что при старении происходит образование ламельной микроструктуры, состоящей из двухфазной смеси из соединений Ni_3V и Ni_2V. Сплавы в таком состоянии обладают высокой термической стабильностью и в этих сплавах при длительных отжигах не наблюдается значительного укрупнения микроструктурных элементов. Такие микроструктуры могут быть полезны для применения в высокотемпературных материалах. Данные сплавы обладают высокой прочностью и твердостью при повышенных температурах, что делает их перспективными материалами для использования в условиях высоких температур и нагрузок, таких как компоненты турбин и двигателей [4]. В связи с этим актуальными являются работы по определению термодинамических параметров бинарных соединений на основе никеля и ванадия в области составов Ni + (27–33) ат.%V

© Абзаев Ю. А., Клопотов А. А., Гуда С. А., Сыртанов М. С., Волокитин Г. Г., Лавров В. Ю., 2025

Целью настоящей работы является расчет температурных зависимостей термодинамических параметров в соединениях Ni_3V и Ni_2V на основе расчетов из первых принципов в рамках модели Дебая и квазигармоническом приближении в температурном интервале от 0 до 970 К, а также данные рентгеноструктурных исследований сплавов в области составов Ni + (27–35) ат.%V.

Рентгеноструктурные исследования сплавов из области составов Ni+(27–35) ат.%V проводили на дифрактометре Shimadzu 7000 в монохроматизированном Cu_{Ka} и Cr_{Ka} излучениях по схеме Брегга – Брентано.

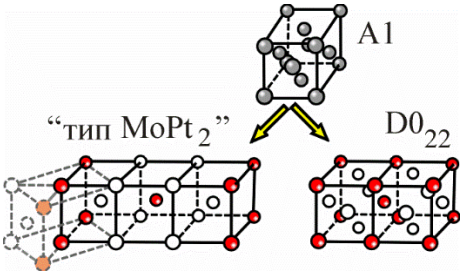


Рис. 1. Элементарные ячейки разупорядоченного твердого раствора со структурой A1, соединения Ni_3V со сверхструктурой $D0_{22}$ и соединения Ni_2V сверхструктурой «типа $MoPt_2$» [2]

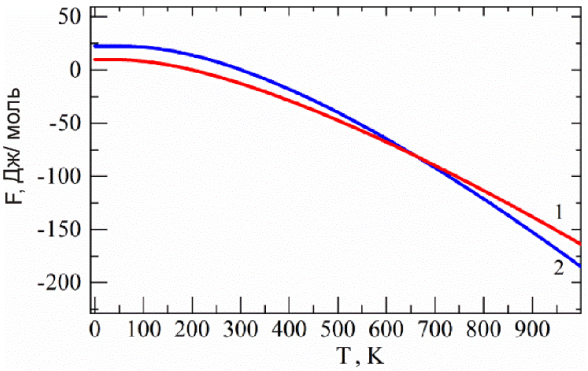


Рис. 2. Температурные зависимости свободной энергии соединений Ni_2V (*кривая 1*) и Ni_3V (*кривая 2*), вычесленные в рамках модели Дебая

Рентгеноструктурным методом установлено, что исследуемый сплав с химическим составом Ni–29 ат.%V является двухфазным и содержит упорядоченные соединения Ni_3V и Ni_2V. Тогда как сплав состава Ni+33 ат.%V содержит только одно соединение Ni_2V.

В работе проведены расчеты из первых принципов в рамках модели Дебая и квазигармонического приближения (QHA) на основе функционала электронной плотности, выполненных в коде Phonopy [5] с интерфейсом VASP.

В результате проведенных расчетов получены температурные зависимости свободной энергии Гельмгольца (рис. 2), энергии Гиббса, энтропии и теплоемкости в температурном интервале от 0 до 970 К в соединениях Ni_3V и Ni_2V. Установлено, что в температурном интервале от 0 до 670 К более стабильным становится соединение Ni_2V. По достижении температуры 670 К более стабильным становится соединение Ni_3V. Показано, что в высокотемпературной области теплоемкость соединения Ni_2V почти на 30 % больше, чем для соединения Ni_3V. Также установлено, что наиболее интенсивно, начиная с температуры 250 К, происходит рост значений энтропии в соединении Ni_3V по сравнению с ростом энтропии с температурой в соединении Ni_2V.

Полученные термодинамические данные соединений Ni_2V и Ni_3V и достоверность расчетных данных позволяют их использовать в алгоритмах проектирования новых конструкционных материалов на основе никеля и ванадия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEMN-2023-0003.

Список источников

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник. Т. 1, 2, 3-2 / под ред. Н. П. Лякишева. М. : Машиностроение, 1996–2000.

2. Козлов Э. В., Кормин Н. М., Матвеева Н. М. Стабильность и кристаллографические особенности сверхструктур // Металлы. 2007. № 5. С. 192–195.

3. Singh J. B., Sundararaman M., Mukhopadhyay P. Evolution and thermal stability of Ni_3V and Ni_2V phases in a Ni-29 at. pct Valloy // Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, Vol. 29, pp. 1883–1894.

4. Mitao S., Tsuyama S., Minakawa K. Microstructure and mechanical properties of Ni_3V-based alloys // Materials Science and Engineering A, 1991, Vol. 143(1–2), pp.51–62.

5. Togo A. First-principles Phonon Calculations with Phonopy and Phonopy // J. Phys. Soc. J, 2023, Vol. 92, pp. 012001-1-21.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКОЙ

Н. Ян Лун[1, 2*], В. И. Терехов[1, 2]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** yln1999@mail.ru*

Проведено экспериментальное исследование теплообмена в канале с одиночной траншейной лункой. Положение лунки в канале соответствовало углу наклона к направлению потока ф = 90° и ф = 45°. Число Рейнольдса, вычисленное по эквивалентному гидравлическому диаметру, варьировалось в диапазоне Re = $2\cdot10^4$…$8\cdot10^4$. Тепловые граничные условия соответствовали q_w= const. Максимальная величина локальной интенсификации теплообмена достигается на задней по потоку кромке траншеи и равна Nu/Nu_0 = 1,75. Средняя теплоотдача при этом возрастает незначительно как при обтекании перпендикулярно ориентированной лунки (ф = 90°), так и под углом ф = 45° к потоку, и ее величина не превышает $Nu/Nu_0 \leq 1{,}2$.

Задача повышения эффективности теплообменных аппаратов является сложной и важной. Согласно численному моделированию [1], удлиненные траншейные лунки обладают высокими теплогидравлическими характеристиками. Авторы объясняют аномальные свойства наклонных траншейных лунок наличием мощных вторичных вихревых течений вдоль размаха траншеи, которые приводят к интенсификации теплообмена. Однако экспериментального подтверждения эти выводы не получили [2].

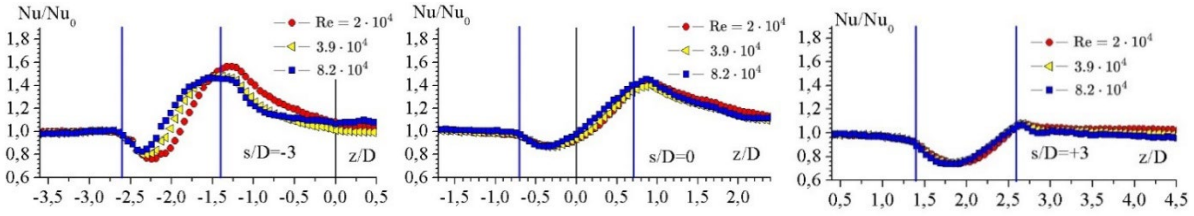
Локальные характеристики теплообмена. Все измерения были проведены на установке, описанной в [2]. Там же даны размеры канала и траншеи. Все опытные данные в работе представлены в виде изменения параметра интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 по поверхности канала.

Если траншея располагается перпендикулярно потоку, то картина теплообмена качественно подобна обтеканию полусферической лунки [3]. Перед лункой начинается небольшое снижение теплоотдачи, а по мере продвижения внутрь лунки теплообмен ослабевает, и минимум достигается в первой половине лунки. Затем теплообмен возрастает, превышает уровень до лунки и выходит на максимум в окрестности задней кромки. Максимум теплообмена соответствует точке присоединения пограничного слоя. После лунки наблюдается вначале спад теплообмена, а затем его восстановление (после двух калибров). При этом по размаху траншеи изменения теплоотдачи не наблюдается и все профили совпадают между собой.

Принципиально по-иному ведет себя теплоотдача при ориентации траншеи под углом φ = 45° к потоку. Эти данные изображены на рис. 1. Видно, что распределения в различных сечениях по размаху траншеи значительно отличаются друг от друга и наибольший теплообмен достигается в области втекания потока в траншею ($s/D = -3$, рис. 1, *а*). В сечении выхода потока из траншеи ($s/D = +3$, рис. 1, *в*) интенсивность теплообмена понижается, что обусловлено гидродинамическими особенностями отрыва потока в наклонной траншее [2].

Максимальная интенсификация локального теплообмена, как это следует из рис. 1, составляет примерно 70 % во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса. Такого же порядка эта величина получена и в работе [4] для иных размеров траншеи и тепловых граничных условий. На выходе из траншеи интенсификации теплообмена не происходит.

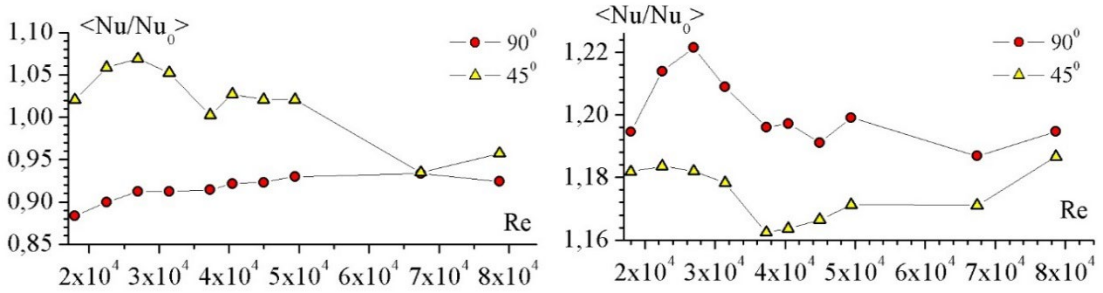
© Ян Лун Н., Терехов В. И., 2025



а *б* *в*

Рис. 1. Профили значений Nu/Nu_0 для угла наклона траншеи φ = 45° в сечении:
а – *s*/*D* = –3; *б* – *s*/*D* = 0; *в* – *s*/*D* = +3

Средние характеристики теплообмена. Важной характеристикой теплообменного аппарата является величина средней теплоотдачи. В работе путем интегрирования полей чисел Нуссельта находился средний теплообмен по всей поверхности траншеи, а также по участку канала длиной l/*D* = ±3, где *D* – ширина траншеи (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Среднее относительное число Нуссельта $<Nu/Nu_0>$:
а – по лунке; *б* – по участку l/*D* = ±3

Теплообмен непосредственно в лунке лучше у наклонной лунки φ = 45°, чем у нормально ориентированной φ = 90° (рис. 2, *а*). Эффект интенсификации у наклонной траншеи весьма слабый, а при φ = 90° в ней и вовсе происходит подавление теплопереноса.

Ожидаемо, что значения среднего по участку $<Nu/Nu_0>$ как для нормально ориентированной, так и для наклонной лунок выше, чем значение средней по поверхности лунки теплоотдачи. Это объясняется тем, что основное усиление теплообмена происходит в области за лункой. При обтекании перпендикулярно ориентированной траншеи, эффект интенсификации теплообмена лежит в пределах $<Nu/Nu_0>$ = 1,19…1,21. Для наклонной лунки тот же показатель чуть ниже: $<Nu/Nu_0>$ = 1,16…1,19. Полученные данные в целом согласуются с данными работы [5], где средний по участку теплообмен для повернутой на φ = 45° лунки выше, чем в плоском канале в 1,22 раза. При этом эффекты аномальной интенсификации теплообмена, обнаруженные в численных исследованиях в работе [1], в настоящем экспериментальном исследовании не подтверждаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00358.

Список источников

1. Isaev S. A et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dence packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145. pp. 118737.

2. Терехов В. И., Терехов В. В., Чохар И. А., Ян Лун Н. Экспериментальное исле-дование структуры течения в одиночной траншейной лунке // Т и А. 2022. Т. 29, № 6. С. 935–947.

3. Terekhov V. I., Kalinina S. V., MshvidobadzeYu. M. A review on heat transfer coef-ficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // J. Enhanced Heat Transfer, 2017. Vol. 24. Is. 1-6. P. 411–426.

4. Isaev S., Seroshtanov V., Mityakov V., and Sapozhnikov S. Gradient heatmetry and PIV combination in the study of flow in an oval-trench dimple // J. of Phys.: Conf. Ser., 2023.

5. Leontiev A. I., Kiselev N. A., Vinogradov Yu. A., Strongin M. M., Zditovets A. G., Burtsev S. A. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape, Int. J. of Thermal Sciences. 2017. Vol. 118. P. 152–167.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. Ф. Глашин

ООО «Нефтегазтехносервис»
625026, Российская Федерация, Тюмень, ул. Широтная, д. 112
** msf-052@mail.ru*

В докладе рассматриваются инерциальное и неинерциальное движения, а также скорость света и гравитационного взаимодействия. Автор вводит постулаты классической физики, расширяя их применение. В статье формулируются следующие постулаты: 1) всякая физическая система является неинерциальной, т. е. движется с ускорением и вращением (кручением); 2) гравитационное взаимодействие имеет скорость, превышающую скорость света. На взгляд автора, предложенный подход позволит обойти противоречия, заключенные в парадоксах теории относительности, и на основе предложенных постулатов разработать и создать новые технические решения.

Альберт Эйнштейн «...отвергает гипотезу полного увлечения эфира. Следовательно, остаются две возможности: 1. Эфир полностью неподвижен, то есть он не принимает абсолютно никакого участия в движении материи. 2. Эфир увлекается движущейся материей, но он движется со скоростью, отличной от скорости движения материи». Далее Эйнштейн заявляет: «1. ...нельзя создать удовлетворительную теорию, не отказавшись от существования некоей среды, заполняющей все пространство. 2. Развитие второй гипотезы требует введения каких-либо предположений относительно связи между эфиром и движущейся материей». В этом году уже 120 лет как написана статья [1; 2], однако другой подход так и не был рассмотрен.

Цель. Рассмотреть второе заявление Эйнштейна с введением условий связи между эфиром и движущейся материей.

I. Сравнение постулатов классической физики и теории относительности (СТО).

В классической физике действуют постулаты: 1. Пространство евклидово. 2. Время абсолютно. 3. Возможны любые скорости движения материальных тел. 4. Принцип близкодействия при распространении взаимодействий через среду. 5. Принцип относительности Галилея: «Прямолинейное и равномерное движение системы отсчета не влияет на ход механических процессов в системе».

Постулат 1 СТО гласит: «Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, эти изменения состояния относятся». Или в другой формулировке: «Невозможно обнаружить факт равномерного и прямолинейного движения с помощью любых физических экспериментов, проводимых внутри движущейся лаборатории».

Постулат 2 СТО формулируются следующим образом: «Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определенной скоростью v, независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом».

Или в другой формулировке: «Невозможно получить скорость объекта, превышающую скорость света в вакууме, а кроме того, скорость света не зависит от способов наблюдения и измерения».

Леон Бриллюэн написал [3]: «… теория относительности – блестящий пример великолепной математической теории, построенной на песке и ведущей ко все

© Глашин С. Ф., 2025

большему нагромождению математики в космологии (типичный· пример научной фантастики)».

II. Формулировка 1-го постулата для инерциального и неинерциального движения.

Постулат 1. «Существует одна и только одна абсолютная инерциальная (неподвижная) система отсчета. Всякая физическая система Вселенной является неинерциальной, как правило, движется неравномерно, криволинейно, с ускорением и/или вращением (для газообразных систем преобладают вихревые движения, для твердых тел – вращение вокруг оси). Частным случаем таких систем являются инерциальные системы, движущиеся равномерно и прямолинейно».

Или в другой формулировке: «Можно обнаружить факт равномерного и прямолинейного движения с помощью физического эксперимента, проводимого внутри движущейся лаборатории».

III. Формулировка 2-го постулата для скорости света и гравитационного взаимодействия.

Постулат 2. «Скорость света является максимальной известной величиной скорости изученных физических систем. Однако существующее гравитационное взаимодействие имеет скорость Cg превышающую скорость света на несколько порядков. Можно получить скорость физического тела, превышающую скорость света, кроме этого, скорость света зависит от способа наблюдения и измерения».

Следствие 1. Если вместо $\beta = v/c$ в преобразовании Лоренца (где – v скорость тела, c - скорость света), ввести величину $S = v/Cg$, где $Cg = 10^8$*с – скорость гравитации, то получим S-преобразования (похожие на преобразования Лоренца), но без парадоксов близнецов, сокращения длины, рост массы тела и др.

Следствие 2. В нашей Вселенной имеются источники и стоки материи. Источниками являются ядра планет и звезд, где при высоком давлении за счет механизма вихревого движения образуется материя (протоны и нейтроны) из эфира (вакуума или темной материи). Существуют стоки, где материя переходит в состояние эфира (вакуума или темной материи), в качестве которых можно предположить «черные дыры».

Следствие 3. Взаимодействие материальных тел и эфира (обмен энергией) происходит в процессе вихревых (для газа) или вращательных (твердые тела) движений.

IV. Примеры. Р. Фейнман, Дж. Уилер писали: «В вакууме (или эфире), заключенном в объеме обыкновенной электрической лампочки, энергии такое большое количество, что ее хватит, чтобы вскипятить все океаны на Земле».

Пример 1. Трансформатор или катушка Николы Тесла (10.07.1856–07.01.1943). Тесла называл ее «аппаратом для производства электрических токов высокой частоты и потенциала». Т. е. это генератор электрического тока, использующий вихревое электромагнитное поле для получения электричества.

Пример 2. Летающая тарелка Виктора Шаубергера (30.06.1885–25.10.1958), на базе которого был создан диск Белонце, потреблял только воду и воздух, а принцип его действия включал в себя Implosion (вихревые движения флюида).

Пример 3. Станет реальностью создание ракет, летающих с гиперсветовыми скоростями.

Выводы. Кризис в естествознании XIX в. привел к возникновению неклассической модели мира, одним из краеугольных камней которой явилась специальная теория относительности А. Энштейна. XX в. стал триумфальным для этой модели. Однако, в очередной раз подтверждая справедливость теории Томаса Куна о смене парадигм в науке, некогда стройные положения СТО не бесспорны и требуют настоятельной корректировки. Предложенная попытка осмысления ранее известных положений теории Эйнштейна позволила автору дополнить характеристики инерционности систем констатацией их вращения, а также раздвинуть понимание предельной скорости

во Вселенной. Предложенные постулаты рассматриваются в качестве совершенствования постнеклассического варианта физики.

Список источников

1. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел // Собр. науч. тр. Т. 1. С. 7–35.

2. Эйнштейн А. Принцип относительности и его следствия // Собр. науч. тр. Т. 1. С. 135–164.

3. Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. М. : МИР, 1972. 145 с.

Секция 5
Гидродинамика и теплофизика в задачах нефтегазовой индустрии

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ ДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО – ВОДА

И. И. Рыжков[1*], И. А. Харченко[1], Р. А. Ваганов[2], И. Р. Волкова[3], Г. В. Акимочкина[4], Е. В. Фоменко[4]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[3] ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50
[4]Институт химии и химической технологии СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/24
** rii@icm.krasn.ru*

В работе представлены результаты по разделению эмульсии вода – дизельное топливо с помощью керамических микрофильтрационных мембран на основе микросфер летучих зол со средним размером пор 0,46 мкм. В процессе фильтрации при разностях давлениях 2 и 6 атм наблюдалось значительное падение потока с 2900–4400 л/м^2 час до 40–80 л/м^2 час за счет осаждения капель дизельного топлива с размером порядка 0,3 мкм на стенки пор. Задержание дизельного топлива составило 75–96 %, что показывает принципиальную возможность его удаления из водных растворов с помощью ультрафильтрации.

Очистка сточных и подтоварных вод от нефти и нефтепродуктов представляет собой сложную комплексную задачу. При закачке воды в пласт остаточная концентрация нефти не должна превышать 30 мг/л, при сбросе в открытые водоемы – не более 10 мг/л. Основными способами снижения концентрации нефти и нефтепродуктов в воде являются отстаивание, центрифугирование, флотация, фильтрация [1; 2]. Среди различных методов очистки сточных вод широко применяется мембранное разделение из-за его эффективности и надежности для непрерывной обработки. Существует достаточное количество исследований, подтверждающих эффективность керамических мембран в процессах очистки воды от нефти и нефтепродуктов [3–5].

Целью настоящей работы является применение керамических микрофильтрационных мембран для разделения эмульсий дизельное топливо (ДТ) – вода. В качестве сырья для получения керамических мембран использовалась узкая фракция дисперсных микросфер (~10 мкм), полученная методом аэродинамического разделения из летучей золы от сжигания Кузнецкого угля марки «Т». Подложки диаметром 25 мм и высотой 3 мм были получены методом холодного прессования при давлении 80 МПа с последующим отжигом в муфельной печи при 1100 °С. Методом водопоглощения измерена открытая пористость мембран, которая составила 25 %. С помощью газожидкостной порометрии исследовано распределение пор по размерам. Минимальный, средний и максимальный размер пор составили 0,22; 0,46 и 1,34 мкм соответственно. Жидкостная проницаемость по воде измерялась путем измерения потока воды через мембрану при разности давлений от 1 до 4 бар и составила 234 л/м^2 час бар.

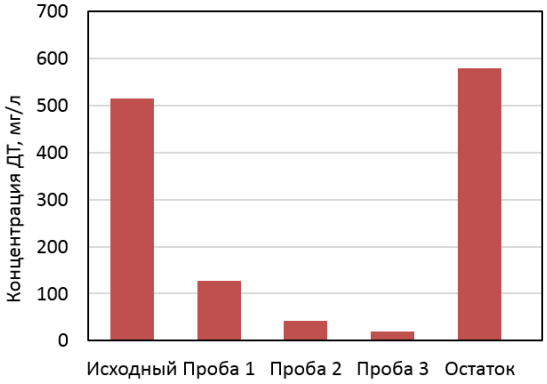
Эксперименты по фильтрации проводили на лабораторной установке, состоящей из фильтрационной ячейки тупикового типа, компрессора, регулятора давления, весов и магнитной мешалки. Исследуемый раствор заливался в ячейку, в верхнюю часть которой подавался сжатый воздух от компрессора через регулятор давления, на котором задавалось требуемое давление в ячейке. Зависимость потока пермеата от времени ре-

© Рыжков И. И., Харченко И. А., Ваганов Р. А., Волкова И. Р., Акимочкина Г. В., Фоменко Е. В., 2025

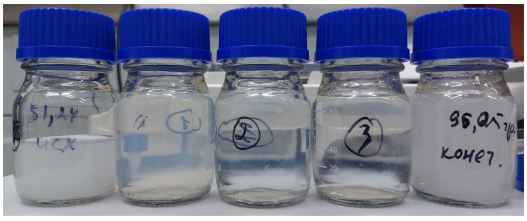
гистрировалась с помощью весов, соединенных с компьютером. В процессе фильтрации осуществлялся сбор последовательных проб пермеата. Концентрация дизельного топлива в пробах измерялась спектрофотометрическим методом при длине волны 540 нм на спектрофотометре Specol 1300 (Analytik Jena GmbH+Co. KG). На основе анализа концентраций определялось задержание растворенного вещества $R = 1 - C_p / C_f$, где C_p – концентрация в пермеате, C_f – концентрация в сырьевом потоке.

В эксперименте исходная концентрация дизельного топлива составляла 500 мг/л, объем раствора – 400 мл, разность давлений 2 бар. В процессе фильтрации поток снизился с 4400 л/м^2 час до 40 л/м^2 час в течение 130 минут. После этого разность давлений была повышена до 6 атм, в результате поток возрос до 2900 л/м^2 час, а затем снизился до 80 л/м^2 час в течение 90 минут. Падение потока связано с осаждением капель дизельного топлива на поверхности пор мембраны и соответствующим уменьшением их размера. Размер капель (~ 0,3 мкм) был несколько меньше среднего размера пор мембраны (0,46 мкм). За время эксперимента были собраны три последовательные пробы объемом 100 мл. Концентрации исходного раствора, проб и раствора, оставшегося в фильтрационной ячейке, показаны на рис. 1, *а*, а фотографии собранных проб – на рис. 1, *б*. Концентрация ДТ в пробах 1, 2, 3 составила 128, 43, 20 мг/л, что соответствует значениям задержания растворенного вещества 75, 92 и 96 %. Концентрация в оставшемся растворе увеличилась до 578 мг/л.

После экспериментов проводилась очистка мембран от загрязнения в водном растворе NaOH с последующим отжигом при 800 ºС в течение 2 часов.



(а)



(б)

Рис. 1. Концентрации ДТ в исходном растворе, последовательных пробах и в остаточном растворе (*а*); фотография соответствующих растворов (*б*)

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность использования керамических микрофильтрационных мембран на основе микросфер летучих зол для удаления дизельного топлива из водных эмульсий.

Работа выполнена в рамках проекта № FWES-2024–0032 (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Список источников

1. Яблокова М. А., Иваненко А. Ю., Турыгин В. Ю. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института. 2012. № 14. С. 78–84.

2. Веприкова Е. В., Терещенко Е. А., Чесноков Н. В., Щипко М. Л., Кузнецов Б. Н. Журнал Сибирского федерального университета. Химия, 2010, 3 (3), 285–304.

3. Agarwal A., Samanta A., Nandi B. K., Mandal A. Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 194, 2020, 107475.

4. Malik N., Bulasara V. K., Basu S. Ceramics International, 2020, V. 46 (5), 6889-6898.

5. Zou D., Fan W., Xu J., Drioli E., Chen X., Qiu M., Fan Y. Journal of Membrane Science, 2021, V. 621, 118954.

6. Fomenko E. V., Akimochkina G. V., Anshits A. G., Fadeeva N. P., Kharchenko I. A., Elsuf'ev E. V., Shabanova K. A., Maksimova A. A., Ryzhkov I. I. Membranes and membrane technologies, 2024, V. 6 (2), 71–83.

7. Fadeeva N. P., Volkova I. R., Kharchenko I. A., Elsuf'ev E. V., Fomenko E. V., Akimochkina G. V., Afanasova K. A., Nemtsev I. V., Tarasova L. S., Yushkin A. A., Nebesskaya A. P., Prozorovich V. G., Ivanets A. I., Ryzhkov I. I. Ceramics International, 2024, V. 50 (24), 52890–52903.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

М. И. Аршинский[1], Ю. В. Жильцов[1*], А. П. Горохов[1], О. А. Голованов[2]

[1] ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть»
660098, Российская Федерация, Красноярск, ул. 9 Мая, д. 65д
[2]ООО «Харампурнефтегаз»
625023, Российская Федерация, Тюмень, ул. Одесская, д. 7б
**ZhiltsovYuV@knipi.rosneft.ru*

В работе проводится CFD-моделирование элемента установки комплексной подготовки газов. Был воссоздан процесс очистки газа от мелкодисперсных примесей в системе предварительной очистки газов. CFD-модель позволила оценить гидрогазодинамику движущейся среды и получить картину распределения долей частиц, капель жидкости и газовой фазы для оценки эффективной работы отдельных элементов системы предварительной очистки газов. Полученные результаты моделирования коррелируют с технологическими параметрами действующей установки.

Интенсивное развитие газодобывающей отрасли ведет к необходимости усовершенствования процессов обработки и подготовки природного газа перед отправкой потребителю. Добыча и подготовка природного газа связаны с решением множества инженерных задач. При изменении режимов газовых скважин в процессе эксплуатации для поддержания эффективности и производительности современных установок комплексной подготовки газов (УКПГ) необходимо постоянно проводить оптимизацию процессов подготовки и реконструкцию технологического оборудования. Для более эффективных расчетов и принятия правильных решений по реконструкции и оптимизации оборудования на УКПГ целесообразно применение CFD-моделирования – инструмента вычислительной гидрогазодинамики, позволяющего производить вычисление характеристик потоковых процессов, протекающих внутри аппаратов методом конечных объемов.

Цель CFD-моделирования элемента УКПГ – изучение процесса смешения жидкой и твердой фазы в объеме расчетной модели. Одной из основных задач является получение минимальной концентрации равномерной смеси, состоящей из жидкости и твердых частиц в области выхода из расчетной модели. Рассматриваемый в данной работе элемент УКПГ состоит из завихрителя, форсунок подачи раствора и емкости горизонтального сепаратора пробкоуловителя. Схема расчетной модели приведена на рис. 1.

Для CFD-моделирования многофазных систем движения твердых и жидких частиц в газовом потоке было рассмотрено два основных подхода: подход Эйлера – Эйлера и подход Эйлера – Лагранжа.

Подход Эйлера – Лагранжа рассматривает дисперсную фазу (капли/частицы) индивидуально, часто применяется для описания систем методом траекторий. С его помощью вычисляются траектории отдельных капель/частиц, пренебрегаются столкновения между ними. Данный метод имеет ряд ограничений, связанных с концентрацией объемной доли частиц в газовой среде менее 10 % [1].

Более широкое применение получил подход Эйлера – Эйлера для численных расчетов процессов в многофазных системах. Он основан на пространственно-осредненных уравнениях Навье – Стокса. В отличие от подхода Эйлера – Лагранжа

© Аршинский М. И., Жильцов Ю. В., Горохов А. П., Голованов О. А., 2025

движение дисперсной фазы здесь показано как взаимодействие взаимопроникающих континуумов (областей движения). Данный подход можно считать эффективным по времени, так как он требует меньше вычислительных ресурсов и упрощает моделирование турбулентности [2].

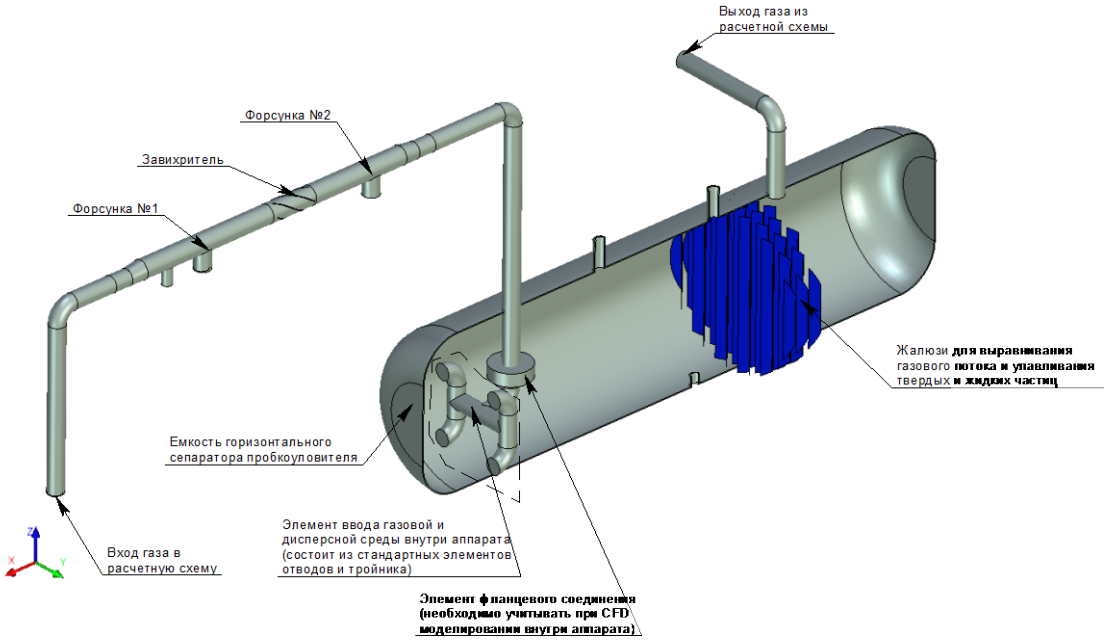


Рис. 1. Схема расчетной модели

Цветовая карта изменения концентраций твердых и жидких частиц в расчетной геометрии приведена на рис. 2. По результатам проведенного расчета следует, что эффективность аппарата по улавливанию частиц жидкости составила 98,7 % (суммарная эффективность по улавливанию твердых частиц составила 58 %).

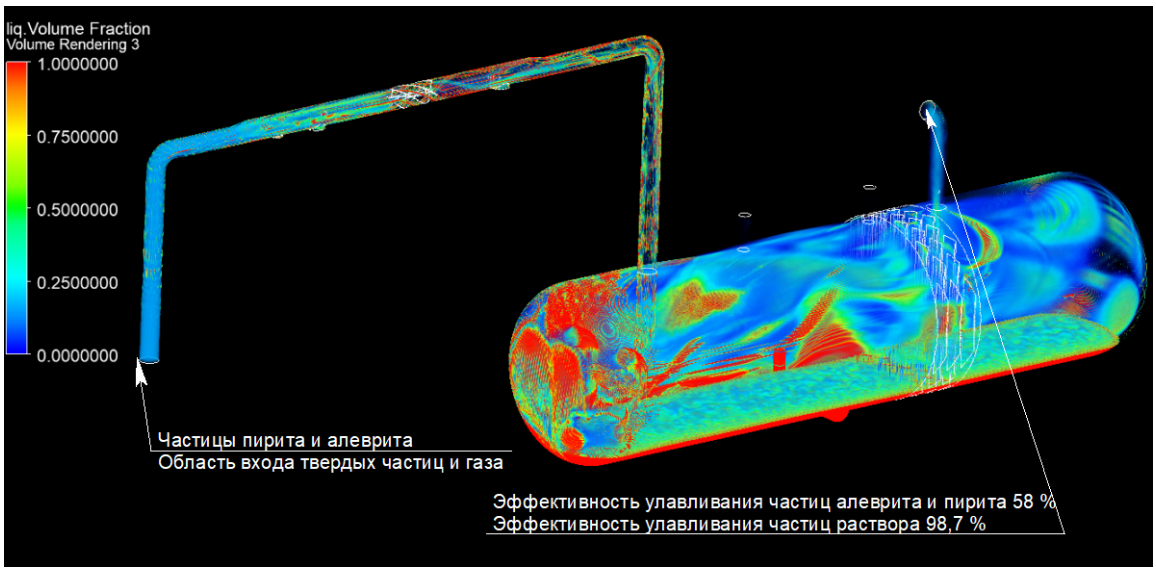


Рис. 2. Цветовая карта изменения концентраций жидкой фазы и твердых частиц пирита и алеврита в расчетной геометрии

С помощью CFD-моделирования был воссоздан процесс очистки газа от мелкодисперсных примесей в системе предварительной очистки газов. 3D-модель позволила оценить гидрогазодинамику движущейся среды и получить картину распределения долей частиц, капель жидкости и газовой фазы для оценки эффективной работы отдельных элементах расчетной схемы. Полученные результаты моделирования коррелируют с технологическими параметрами действующей установки, совместно с ООО «Харампурнефтегаз» приняты к расширению практики применения CFD-моделирования для решения разнообразных инженерных задач.

Список источников

1. Инженерно-технический журнал ANSYS Solutions. Русская редакция Весна 2007.

2. Харьков В. В., Багаева К. А. К вопросу выбора подхода для моделирования движения частиц при сушке дисперсных материалов // Кулагинские чтения: Техника и технологии производственных процессов : сб. ст. XVIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч. 2018. Ч. 2. С. 112–118.

РАЗРАБОТКА CFD-МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ В ЖАРОВЫХ ТРУБАХ ИСПАРИТЕЛЯ БЛОКА ОГНЕВОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

М. И. Аршинский[1], Ю. В. Жильцов[1*], А. П. Горохов[1], О. А. Голованов[2]

[1] ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть»
660098, Российская Федерация, Красноярск, ул. 9 Мая, д. 65д
[2]ООО «Харампурнефтегаз»
625023, Российская Федерация, Тюмень, ул. Одесская, д. 7б
**ZhiltsovYuV@knipi.rosneft.ru*

Проводится CFD-моделирование испарителя блока огневой регенерации для определения причин возникновения локальных высоких температур и аварийного режима, причина последнего – образование отложений осадка в межтрубном пространстве из-за высоких температур. Благодаря CFD-моделированию можно воссоздать симуляцию процесса горения топочных газов в жаровых трубах и сопряженного теплообмена между газовой средой и нагреваемым гликолевым раствором в объеме испарителя. Полученные результаты моделирования коррелируют с технологическими параметрами действующей установки испарителя.

В данной работе проводится CFD-моделирование испарителя блока огневой регенерации (БОР) с целью определения причин возникновения локальных высоких температур и аварийного режима. Причиной аварийного режима работы испарителя является образование твердых отложений в межтрубном пространстве из-за высоких температур. CFD-моделирование позволяет воссоздать симуляцию процесса горения топочных газов в жаровых трубах и сопряженного теплообмена между газовой средой и нагреваемым гликолевым раствором в объеме испарителя.

Рассматриваемый в данной работе элемент испарителя БОР состоит из газовой горелки, жаровых труб, дымогарных труб. На основании сборочных чертежей БОР была построена 3D-модель испарителя, которая применена в CFD-моделировании. После этого осуществлялось импортирование модели в программный комплекс ANSYS CFX. Схема расчетной 3D-модели приведена на рис. 1.

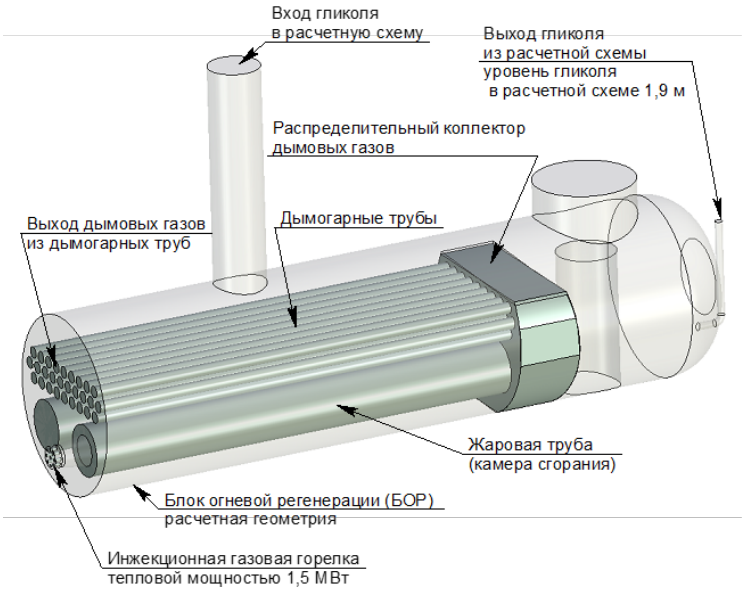


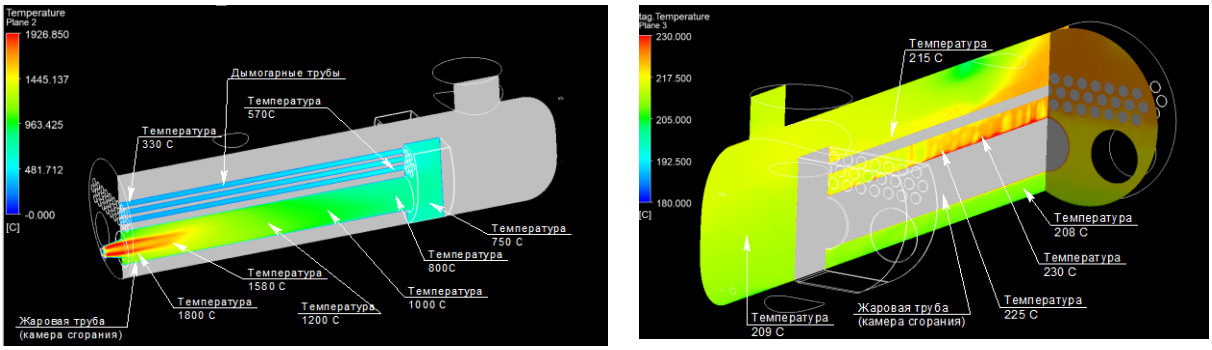
Рис. 1. Схема расчетной 3D-модели испарителя

© Аршинский М. И., Жильцов Ю. В., Горохов А. П., Голованов О. А., 2025

При исследовании газовой динамики в камере сгорания использованы физические модели, предназначенные для описания теплообмена, многофазного течения, химических реакция и выделения тепла в ходе горения, влияния турбулентных пульсаций. Численное решение данной системы выполнено методом конечных объемов в программном комплексе вычислительной гидродинамики ANSYS CFX.

Реакции горения считались в одну ступень, т. е. горючее окисляется сразу до конечных продуктов реакции (CO_2 и H_2O). Процесс горения определялся моделью горения EDM. Данная модель предполагает, что скорость химических реакций значительно превышает скорость турбулентного перемешивания горючих веществ и окислителя [1]. При этом скорость перемешивания остается единственным фактором, определяющим скорость горения смеси. Данное допущение (приемлемое для реагирующих смесей с большими числами Дамкеллера) позволяет исключить из рассмотрения химическую кинетику, что существенно упрощает расчетную модель [2; 3].

Результаты моделирования процесса горения и нагрева представлены в форме цветовых карт (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Цветовая карта температурных полей: *а* – в сечении жаровой трубы; *б* – гликолевого раствора в сечении расчетной схемы

Цветовая карта изменения температурных полей, приведенная на рис. 2, показывает, что в сечении жаровой трубы расчетной модели создается область с локальной максимальной температурой 1929 °С. По мере удаления от инжекционной газовой горелки температура в центральной части жаровой трубы снижается до 1000 °С. Также из цветовой карты следует, что температура дымовых газов в области выхода из расчетной схемы составляет 330 °С.

С помощью CFD-моделирования были воссозданы процесс горения топливного газа и нагрева гликолевого раствора в объеме испарителя БОР. 3D-модель позволила оценить гидрогазодинамику движущейся среды и получить картину распределения температурных полей в объеме расчетной схемы с целью оценки эффективной работы отдельных элементов испарителя. Полученные результаты моделирования коррелируют с технологическими параметрами действующей установки БОР и совместно с ООО «Харампурнефтегаз» приняты к расширению практики применения CFD-моделирования для решения разнообразных инженерных задач.

Список источников

1. Руководство пользователя ANSYS CFX, выпуск 2020 R1. Раздел Руководство по теории ANSYS CFX-Solver.
2. Варантц Ж., Масс Ю., Диббл Р. Горение. 1996. Р. 219–221.
3. Филд М., Хоксли П. Горение пылевидного угля/ BCURA, 1967.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕТОДАХ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

С. Ф. Мулявин*, Ю. В. Земцов, С. И. Грачев

Тюменский индустриальный университет
625026, Российская Федерация, Тюмень, ул. Мельникайте, д. 70
** muljavinsf@tyuiu.ru*

Рассматриваются физико-химические методы увеличения нефтеотдачи и нанотехнологии. Проведен системный анализ результатов исследований физико-химических методов увеличения нефтеотдачи и нанотехнологий для обоснования их совместного применения в повышении нефтеотдачи. В этой связи рассмотрена классификация методов увеличения нефтеотдачи с включением нанотехнологий.

Коэффициент извлечения нефти равен отношению извлекаемых запасов нефти к геологическим запасам нефти. Коэффициент извлечения нефти (КИН) определяется как произведение двух коэффициентов: коэффициента охвата процессом вытеснения (Кохв) и коэффициента вытеснения (Квыт).

Средний КИН по России равен 0,35 д. ед., по США – 0,48 д. ед. Если принять текущие извлекаемые запасы нефти по России ~30 млрд т, то прирост ΔКИН даже на 2 % составляет уже ~600 млн т.

Основные физико-химические методы увеличения нефтеотдачи (МУН) включают: эмульсионные, полимерные, полимер-дисперсно-волокнисто-наполненные системы, термотропные, силикатные, осадкообразующие, нефтеотмывающие, ПАВ-полимерные закачки. Ключевые геолого-физические критерии, определяющие выбор реагента и механизма воздействия на пласт: пластовая температура; приемистость нагнетательных скважин; обводненность продукции скважин участка; степень выработки начальных извлекаемых запасов; проницаемость пласта на участке [1].

Физико-химические МУН имеют большой опыт применения как в России, так и за рубежом. Российскими учеными и специалистами разработаны химические агенты воздействия, продолжается разработка новых реагентов. Нефтяные компании широко используют ранее предложенные технические средства и технологии по воздействию на пласт. Физико-химические МУН применяются на различных типах коллекторов и залежах УВ. Однако имеются ограничения применения ряда агентов по пластовой температуре (≤ 70 °С), по коэфф. проницаемости (> 30 мД) и др.

В настоящее время драйвером добычи нефти на большинстве месторождений Западной Сибири являются низкопроницаемые коллекторы (1–10 мД), разработка которых с применением систем горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта (ГС с МГРП) меняет изначальные свойства геологического объекта, что требует учета при обосновании системы разработки.

В результате применения системы заводнения на нефтяных залежах тип коллектора из преимущественно порового преобразуется в порово-трещинный, а фильтрационные потоки определяются сетью техногенных и естественных каналов низкого фильтрационного сопротивления (НФС). Техногенное изменение пустотного пространства коллектора вызывает изменение механизма выработки запасов и опережающее обводнение добывающих скважин.

Следовательно, при проектировании системы разработки низкопроницаемого объекта необходимо учитывать динамические преобразования коллектора в процессе воздействия, вызванные наличием естественных трещин и техногенно образованной

© Мулявин С. Ф., Земцов Ю. В., Грачев С. И., 2025

сети макротрещин. Так как сеть трещин является проводником закачиваемого агента, то предлагаемые технологии и активные агенты для вытеснения нефти из низкопроницаемой матрицы обеспечат повышение Квыт и Кохв и добычи нефти!

Наночастицы – активная примесь в закачиваемом агенте. Использование наноэмульсий, микронаноэмульсий, наножидкостей, содержащих наночастицы материалов, представляет большой интерес в перспективе развития и повышения эффективности физико-химических МУН (табл. 1).

Таблица 1

Место нанотехнологий в классификация физ-хим МУН

Технологии МУН с применением составов:	Критерии для выбора технологий: пределы (оптимум)				
	Пластовая температура, °С	Приемистости нагнетательных скважин, м³/сут	Обводненность участка, %	Степень выработки, % от НИЗ	Проницаемость, мкм² × 10^{-3}
Эмульсионные	10-100 (40-70)	100-500 (150-300)	40-90 (50-85)	20-80 (40-70)	30-500 (70-300)
Полимерные	10-90 (50-75)	150-700 (200-400)	50-95 (60-85)	30-90 (50-80)	50-1000 (150-500)
Полимер-дисперсно-волокнистые системы	10-125 (50-90)	350-2000 (400-1000)	50-98 (80-95)	50-95 (70-90)	100-2000 (300-800)
Термотропные	60-125 (75-90)	100-400 (150-250)	40-95 (50-85)	30-80 (40-70)	20-500 (50-300)
Силикатные	10-150 (55-95)	150-500 (200-350)	60-98 (75-95)	40-80 (50-75)	20-500 (80-250)
Осадкообразующие	10-150 (55-100)	150-800 (200-450)	60-98 (80-90)	30-85 (55-80)	10-700 (50-300)
Нефтеотмывающие	10-90 (40-80)	50-500 (100-400)	25-90 (40-75)	30-90 (30-60)	10-500 (50-300)
Нанотехнологии	10-150 (50-105)	50-300 (60-250)	0-70 (40-60)	0-60 (20-40)	5-1000 (30-100)

В настоящее время нанотехнологии проходят лабораторные исследования, и авторы [2] считают, что необходимы: создание линейки наножидкостей для различных коллекторов; отработка технологий их закачки; проведение опытно-промышленных экспериментов.

Микронановодогазовые смеси (МН ВГС). Промышленные испытания технологии воздействия микроВГС, разработанной ООО «ИНКО», осуществлены на опытном участке пластов $БВ_8^0$ и $БВ_8^{1-3}$ Самотлорского месторождения в 2006–2008 гг. [3]. Использованы водогазовые смеси, полученные трехступенчатым гидродинамическим эжекционно-диспергирующим устройством и содержащие пузырьки попутного газа размером до 60 мкм. Технологический эффект составил 24955 т, или 6238 т на 1 обработку, или 1041 т на 1 доб. скв. участка воздействия. К настоящему времени в нашей стране развивается практическое направление МУН с применением микроВГС, создаваемых диспергаторами, что позволяет получать устойчивую водогазовую систему.

Дальнейшее развитие нанотехнологий МУН с использованием вытесняющего (активного) агента нановодогазовых смесей представляется весьма интересным как с научной точки зрения, так и с позиции возможности практической реализации в России в ближайшей перспективе.

Результатами лабораторных, опытно-промышленных и коммерческих проектов доказана эффективность реализации ПАВ-полимерных технологий. При разработке низкопроницаемых объектов (1–10 мД) с применением заводнения и системы горизонтальных скважин с МГРП природный поровый коллектор преобразуется в техногенный порово-трещинный.

Предлагаем совершенствование заводнения с применением активной примеси (наноразмеров) для вытеснения нефти из поровой матрицы низкопроницаемых коллекторов, преобразованных в техногенный порово-трещинный. Необходимо разработать программу проведения вузами и институтами РАН лабораторных (на кернах) и опытно-

промысловых работ по реализации нанотехнологий на низкопроницаемых коллекторах. Продолжить исследование и внедрение технологии МН ВГС.

Список источников

1. Мазаев В. В., Земцов Ю. В., Александров В. М. Применение физико-химических методов увеличения нефтеотдачи на коллекторах юрских отложений Западной Сибири. Тюмень, 2024. 280 с.

2. Применение наносуспензий для увеличения нефтеотдачи / А. В. Минаков, В. Я. Рудяк и др. // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 7. С. 68–72.

3. Савицкий Н. В. Результаты экспериментальных исследований и промысловых испытаний технологии вытеснения нефти мелкодисперсной водогазовой смесью // SPE 138067. 2010. 10 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРОВ БИНАРНЫХ СОЛЕЙ В ЯЧЕЙКЕ С РАДИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ

А. А. Максимова[1,2*], И. И. Рыжков[2]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** sokolova.ann2001@gmail.com*

В работе исследуется модель концентрационной поляризации в фильтрационной ячейке с радиальным течением раствора. Численные расчеты показывают хорошее согласие с корреляциями, полученными на основе упрощенных уравнений движения и массопереноса, подтверждая эффективность предложенной модели для анализа фильтрации и транспорта солей. Модель раствора с одним нейтральным компонентом обобщена для случая бинарной соли, состоящей из двух однозарядных ионов. При этом задержание соли определяется как стерическим, так и электростатическим механизмами (взаимодействием ионов с заряженной поверхностью мембраны). Это подчеркивает важность учета различных факторов, влияющих на перенос ионов, и способствует более глубокому пониманию взаимодействий между компонентами раствора и мембраной.

Для разделения, очистки и концентрирования растворов широко используются баромембранные процессы: микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос [1]. В данных процессах создается трансмембранная разность давлений, которая вызывает поток растворителя и растворенного вещества через мембрану. Растворенное вещество полностью или частично задерживается мембраной, в результате чего на ее поверхности возникает высококонцентрированный слой, оказывающий сопротивление массопереносу. Это явление называется концентрационной поляризацией [2]. Поляризационные явления сопровождают многие мембранные процессы разделения. Так как падение потока негативно сказывается на технико-экономических показателях мембраны, необходимо принимать меры для устранения причин, связанных с этим явлением. Для уменьшения проявлений концентрационной поляризации применяют перемешивание раствора, регулируют скорость потока вдоль мембраны либо влияют на коэффициент массопереноса путем изменения форм и размеров модуля, снижая длину или увеличивая его гидродинамический диаметр [3]. Для более глубокого понимания и предсказания эффектов концентрационной поляризации активно используется математическое моделирование. Ранее в работах были рассмотрены одномерные (пленочные) модели и двумерные модели концентрационной поляризации, которые показали хорошее согласие с экспериментальными данными [4].

Целью данной работы является сравнение аналитических и численных подходов для описания концентрационной поляризации в установке тангенциальной фильтрации с радиальным течением раствора. В данной установке сырьевой поток подается в центр мембраны перпендикулярно к ее поверхности, движется в радиальном направлении от центра к краям мембраны и удаляется через щелевой зазор, прилегающий к краю мембраны. Последняя характеризуется жидкостной проницаемостью и задержанием растворенного компонента (соли). В работе рассмотрены двумерная осесимметричная и трехмерная математические модели течения растворителя и растворенного вещества (один нейтральный компонент – соль) в фильтрационной ячейке с мембраной в виде

© Максимова А. А., Рыжков И. И., 2025

плоского диска заданного диаметра. Данные численные модели сравниваются с корреляциями, основанными на автомодельных решениях упрощенных уравнений движения и массопереноса [5]. Эти корреляции позволяют прогнозировать зависимость концентрации на поверхности мембраны от скоростей входного потока и потока через мембрану, радиуса ячейки и гидродинамических размеров модуля.

Показано, что при фиксированной скорости сырьевого потока увеличение скорости через мембрану увеличивает концентрацию вблизи нее, а при фиксированной скорости потока через мембрану увеличение скорости сырьевого потока уменьшает среднюю концентрацию и влияние концентрационной поляризации (рис. 1).

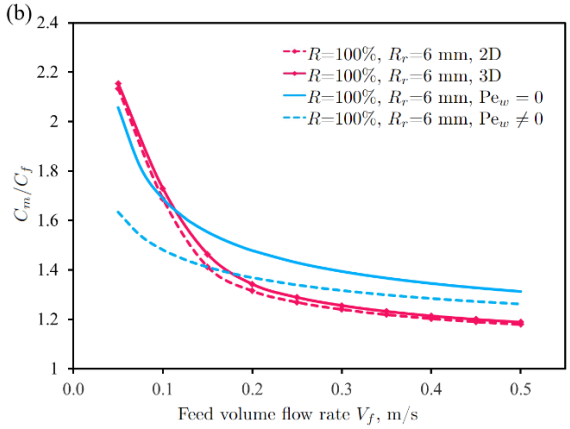


Рис. 1. Зависимость отношения средней концентрации на мембране к концентрации сырьевого потока от скорости сырьевого потока при скорости через мембрану 0,0278 мм/с

Также было установлено хорошее согласие данных, полученных на основе численного расчета в Ansys Fluent с корреляциями на основе автомодельного решения упрощенных уравнений движения и массопереноса. Выполнено обобщение модели для одного нейтрального компонента на случай бинарной соли, состоящей из двух однозарядных ионов. В обобщенной модели учитывается транспорт ионов через мембрану и их задержание за счет стерических и электростатических механизмов. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования дизайна фильтрационной ячейки с радиальным течением раствора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00269.

Список источников

1. Mulder M. Basic principles of membrane technology / Kluwer Academic publishers, Dodrecht. Boston. London, 1999. 512 p.

2. Andrew L. Zydney Stagnant film model for concentration polarization in membrane systems // Journal of Membrane Science 130 (1997). P. 275–281.

3. Miranda M., Campos B.L.M., Concentration polarization in a membrane placed under an impinging jet confined by a conical wall – a numerical approach // Journal of Membrane Science 2001. N 182. P. 257–270.

4. Sablani S. S., Goosena M. F. A., Al-Belushi R., Wilf M. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review // Desalination. 2001. N 141. P. 269–289.

5. De S., Bhattacharya P.K. Prediction of mass-transfer coefficient with suction in the applications of reverse osmosis and ultrafiltration // Journal of Membrane Science. 1997. N 128. P. 119–131.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И НЕФТЕВЫТЕСНЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭМУЛЬСИЙ

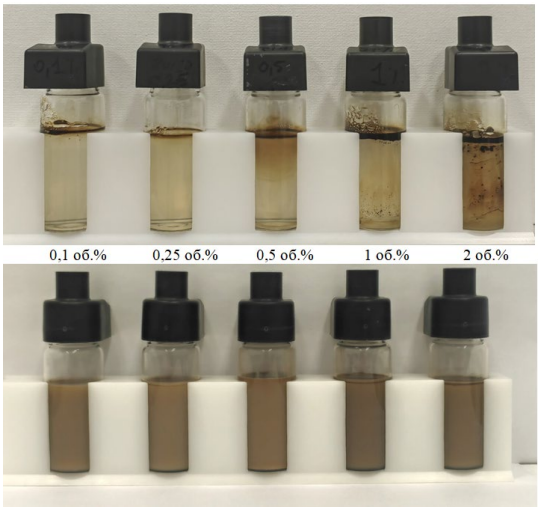
С. С. Лубенец*, А. Д. Скоробогатова, Д. В. Гузей

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** slubenets@sfu-kras.ru*

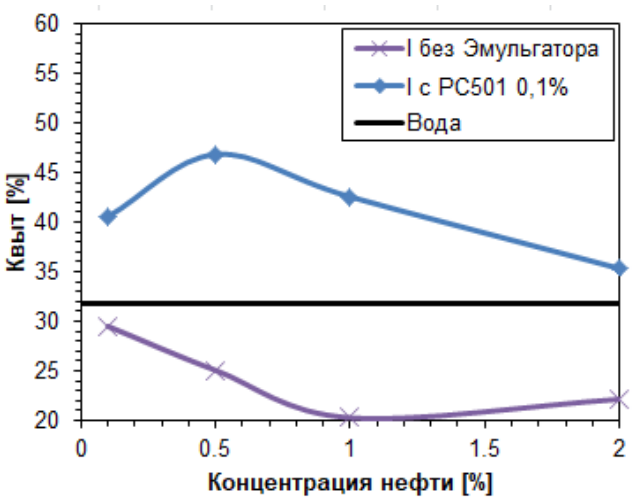
Последние десятилетия характеризуются снижением добычи нефти в нефтедобывающих регионах, однако непрерывно повышающийся глобальный спрос на энергию приводит к необходимости дальнейшего углубления степени добычи нефти на старых месторождениях, для чего применяются третичные методы, к перспективным направлениям которых относят процессы довытеснения нефти низкоконцентрированными эмульсиями. В работе исследовалась стабильность низкоконцентрированных эмульсий в зависимости от содержания углеводородной фазы от 0,1 до 2 об.% без использования эмульгатора и с 0,1 об.% эмульгатора PC-501, далее проводилось экспериментальное исследование по вытеснению полученными эмульсиями нефти из микрофлюидных чипов, позволяющих моделировать сложную пористую структуру горной породы с исследовательскими приложениями в области добычи нефти для изучения возможности применения их как нефтевытесняющих агентов.

В работе рассматривались эмульсии с нефтью марки I в качестве углеводородной фазы (УВ) с концентрацией от 0,1 до 2 об.% с двумя параллелями – без эмульгатора и с 0,1 об.% PC-501 (рис. 1, *а*). В общем случае наблюдалось снижение устойчивости с ростом концентрации выше 1 об.%, при этом для значений от 0,1 до 1 стабильность образцов изменялась монотонно.

С полученными низкоконцентрированными эмульсиями были проведены экспериментальные исследования по вытеснению нефти из микрофлюидных чипов, позволяющих моделировать сложную пористую структуру горной породы (рис. 1, *б*). В результате проведенных экспериментов была получена зависимость коэффициента вытеснения нефти.



а



б

Рис. 1. Фотографии готовых эмульсий (*а*), зависимость $К_{выт}$ от концентрации нефти марки I (*б*)

© Лубенец С. С., Скоробогатова А. Д., Гузей Д. В., 2025

Анализ результатов микрофлюидных экспериментов показал, что для эмульсий, приготовленных без добавления эмульгатора для всех концентраций УВ, наблюдается снижение эффективности вытеснения нефти. Добавка 0,1 % эмульгатора позволила значительно повысить устойчивость эмульсий, что оказало положительный эффект на значения коэффициента нефтевытеснения, так концентрация 0,5 % УВ-фазы в эмульсии позволяет повысить $К_{выт}$ на 14 % по сравнению с водой.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (№ FSRZ-2020–0012).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ: ВЫТЕСНЕНИЕ НЕФТИ ГАЗОМ И ВОДОЙ

К. В. Новоселов

Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 15
Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2
knov2110@yandex.ru

Исследуются многофазные течения в пористых средах с использованием варианта решеточного уравнения Больцмана (LBM) – модели градиента цвета. Моделируется поведение несмешивающихся трехфазных систем в твердой пористой матрице, построенной на основе томографических данных. Уделено внимание воспроизведению углов смачивания и динамике контактной линии, что критично для описания взаимодействия фаз. Выполнено последовательное моделирование двухфазного вытеснения нефти водой и трехфазного вытеснения с добавлением газа, что повысило эффективность удаления остаточной нефти. Был проведен расчет фазовой проницаемости. Исследование подчеркивает значимость учета трехфазных взаимодействий для повышения нефтеотдачи и оптимизации добычи ресурсов.

Многофазные течения в пористых средах являются ключевым аспектом в понимании и оптимизации процессов, таких как добыча нефти и управление водными ресурсами. В данном исследовании мы применили метод решеточного уравнения Больцмана (LBM) с использованием модели градиента цвета [1] для моделирования несмешивающихся трехфазных течений в цифровом керне, полученном методом томографии. Особое внимание уделено корректному воспроизведению углов смачивания, что имеет решающее значение для точного описания взаимодействия фаз на границах раздела. Для этого мы опирались на подход, предложенный в работе [2], где описана реализация динамики контактной линии в трехфазных системах с использованием LBM.

В рамках исследования проведено последовательное моделирование процессов вытеснения. На первом этапе осуществлялось двухфазное вытеснение нефти водой до установления стационарного состояния, что позволило получить распределение насыщенности фаз и проанализировать эффективность данного процесса (рис. 1).

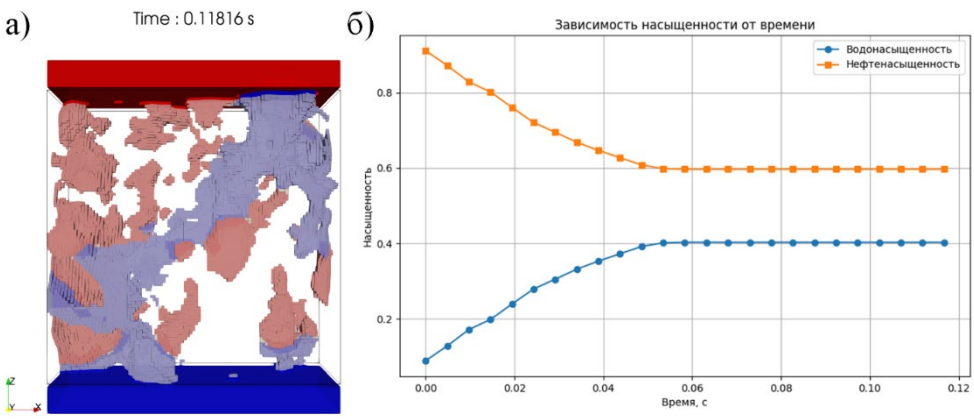


Рис. 1. Пространственное распределение фаз в поровом пространстве керна (*а*); красным цветом обозначена нефть, синим – вода. График зависимости насыщенности различных фаз от времени (*б*)

© Новоселов К. В., 2025

Затем, после реинициализации нескольких слоев расчетной области с добавлением газа, было смоделировано трехфазное вытеснение, где газ выступал в роли дополнительного вытесняющего агента. Такой подход позволил изучить влияние газа на эффективность удаления остаточной нефти из пористой среды (рис. 2).

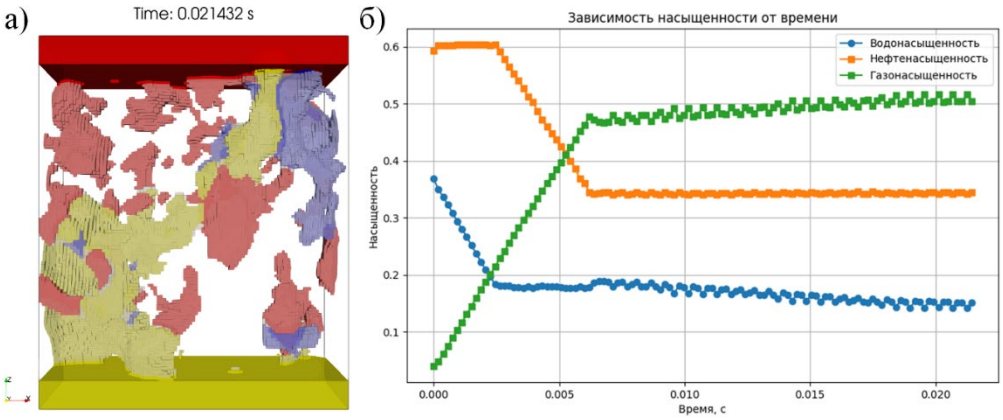


Рис. 2. Пространственное распределение фаз в поровом пространстве керна (*а*); красным цветом обозначена нефть, синим – вода, желтым – газ. График зависимости насыщенности различных фаз от времени (*б*)

Для количественной оценки относительной фазовой проницаемости мы использовали подход, аналогичный описанному в работе [3]. В их исследовании моделирование многофазных течений в пористой среде проводилось с использованием изображений микроструктуры породы, что позволяет учитывать особенности динамики течений и взаимодействия фаз. Применение такого подхода в нашей работе позволило провести расчет фазовой проницаемости и изучить эффективность процессов вытеснения нефти.

Результаты нашего моделирования показали, что введение газа на втором этапе значительно повышает эффективность вытеснения нефти, что подтверждается полученными графиками насыщенности фаз. Эти данные согласуются с теоретическими представлениями о механизмах вытеснения и подчеркивают важность учета трехфазных взаимодействий при разработке методов повышения нефтеотдачи.

Таким образом, использование метода решеточного уравнения Больцмана в сочетании с цифровыми моделями керна и современными подходами к учету углов смачивания и относительной проницаемости фаз позволяет глубже понять и предсказать поведение многофазных систем в пористых средах. Это открывает новые возможности для оптимизации процессов добычи нефти и разработки более эффективных технологий в этой области.

Работа выполнялась при поддержке Научно-технического центра Газпромнефти.

Список источников

1. Sébastien Leclaire, Marcelo Reggio, Jean-Yves Trépanier. Progress and investigation on lattice Boltzmann modeling of multiple immiscible fluids or components with variable density and viscosity ratios // Journal of Computational Physics. 2013. Vol. 246. P. 318–342.

2. Sheng Li, Haihu Liu, Jinggang Zhang, Fei Jiang, Guang Xi. Modeling of three-phase displacement in three-dimensional irregular geometries using a lattice Boltzmann method // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. P. 122108.

3. Jiang F., Tsuji T. Estimation of three-phase relative permeability by simulating fluid dynamics directly on rock-microstructure images // Water Resour. Res. 2016. Vol. 53. P. 11–32.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ РАСТВОРАМИ ПАВ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ИЗ МИКРОФЛЮИДНОГО ЧИПА, ИМИТИРУЮЩЕГО МОДЕЛЬ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ТЕРРИГЕННОГО КОЛЛЕКТОРА

А. И. Пряжников*, С. С. Лубенец,
М. И. Пряжников, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** andron2793@yandex.ru*

Проведены систематические экспериментальные исследования для топологии микрофлюидного чипа, имитирующего модель пористой среды терригенного коллектора по определению эффективности вытеснения нефти растворами ПАВ, модифицированными наночастицами. Исследовалась зависимость от размера и материала наночастиц. Увеличение концентрации нанодобавки дает положительный эффект от дополнительной модификации растворов ПАВ наночастицами.

В настоящее время применение микро- и нанофлюидных технологий интенсивно исследуется в различных направлениях нефтегазового дела. К сожалению, подавляющая часть этих передовых исследований выполняется за рубежом. Преимуществами микрофлюидного исследования по сравнению с обычными методами заводнения являются отличная визуализация процессов вытеснения нефти из модели пористой среды, простая очистка и возможность многократного использования микрофлюидного чипа, широкий диапазон температуры и давления исследований, отличная химическая совместимость [1; 2].

Проведены экспериментальные исследования на микрофлюидном чипе, имитирующем модель пористой среды терригенного коллектора по определению эффективности вытеснения нефти растворами ПАВов AES и SDS с концентрацией 0,05 масс.% модифицированными наночастицами с массовыми концентрациями 0; 0,25 и 0,5 масс.%, помимо этого исследовалась зависимость от размера и материала наночастиц.

Использование растворов ПАВ не сильно повышает $К_{выт}$ по сравнению с вытеснением водой. Так, в частности раствор AES (0,05 масс.%) повышает $К_{выт}$ на 2,67 %, а раствор SDS (0,05 масс.%) – на 8,3 %. Однако модификация этих растворов ПАВ наночастицами оксида кремния SiO_2 позволяет дополнительно повысить коэффициента вытеснения нефти. Модификация наночастицами оксида кремния (силиказоль марки 1030) размером 10 нм с концентрацией 0,5 масс.% позволяет повысить коэффициента вытеснения, так для раствора SDS $К_{выт}$ составил 25,75 % по сравнению с водой, в сравнении с чистым раствором SDS 17,45 %, а для раствора AES прирост коэффициента вытеснения составил 20,3 % по сравнению с водой, или в сравнении с чистым раствором AES 17,63 % соответственно. При этом использование данной наносуспензии без ПАВ дает увеличение коэффициента вытеснения нефти по сравнению с водой на 2,11 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022.

© Пряжников А. И., Лубенец С. С., Пряжников М. И., Минаков А. В., 2025

Список источников

1. Pryazhnikov A. I., Pryazhnikov M. I., Lobasov A. S., Minakov A. V. A Systematic Microfluidic Study of the Use of Diluted Silica Sols to Enhance Oil Displacement // Nanomaterials/ 2024. Vol. 14 (14). P. 1233.

2. Pryazhnikov A. I., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Minakov A. V. Comparative analysis of the effectiveness of using surfactant solutions and nanosuspensions to enhance oil recovery. // Journal of Molecular Liquids. 2025. Vol. 419. P. 126773.

ВАЛИДАЦИЯ ПОРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ

С. А. Филимонов*, А. В. Минаков, Д. В. Гузей

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** sfilimonov@sfu-kras.ru*

Представлены результаты валидации математической модели поросетевого моделирования транспорта неньютоновской степенной жидкости в системе микроканалов. Для валидации разработанной модели было проведено сравнение результатов расчета с результатами, полученными в ходе физического эксперимента и CFD-расчетов (3D CFD). В качестве тестовой задачи рассмотрено течение неньютоновской жидкости в микрофлюидных чипах. В ходе исследования варьировался расход жидкости через микрочип. Критерий сравнения – перепад давления по длине микрофлюидного чипа. Тестирование показало хорошее согласование результатов расчетов разработанной поросетевой модели с результатами как физического эксперимента, так и 3D CFD. Стоит отметить, что поросетевая модель считает кратно быстрее, чем 3D CFD.

В работе представлены результаты валидации разработанной математической модели (netFlow) путем сравнения зависимости перепада давления от расхода степенной жидкости через два микроканальных чипа. Сравнение проводилось с результатами физического эксперимента и результатами расчетов, в двух разных программных пакетах AnsysFluent и SigmaFlow для одной степенной жидкости. На рис. 1, *а,* представлена фотография одного из использованных чипов. Ширина каналов чипа меняется в диапазоне от 27 до 389 мкм, толщина чипа 42 мкм. Сетевая модель чипа состоит из 185 узлов и 282 ветвей (рис. 1, *б*).

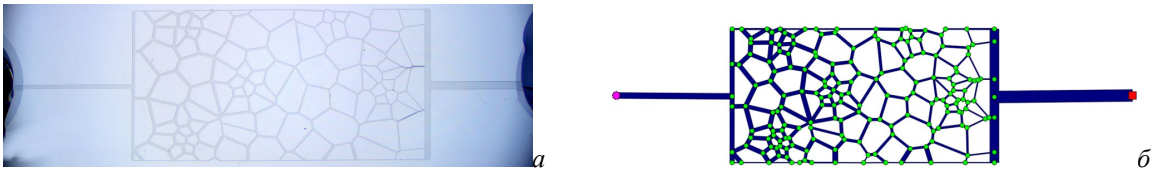


Рис. 1. Микроканальный чип: *а* – геометрия; *б* – сетевая модель

Рабочей жидкостью был раствор полиакриламидного полимера PRAESTOL® A2540 с массовой концентрацией 0,05 %. Реологические параметры полимерного раствора: $n = 0{,}4$; $k_v = 0{,}3$. Расход жидкости варьировался в диапазоне от 0,1 до 10 мкл/мин (изменение в 100 раз). Результаты тестирования представлены на рис. 2.

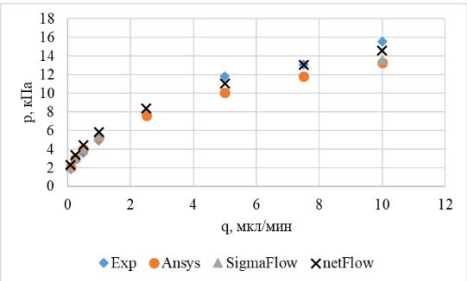


Рис. 2. Зависимость перепада давления от расхода

© Филимонов С. А., Минаков А. В., Гузей Д. В., 2025

Как видно из рис. 2, тестирование показало хорошее совпадение результатов расчета на разработанной поросетевой модели с результатами эксперимента в широком диапазоне расходов, что говорит о том, что разработанная модель хорошо описывает течение неньютоновской жидкости в микроканалах и может быть использована для дальнейших исследований, а также позволяет существенно сократить время проведения расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-30022 (https://rscf.ru/project/23-79-30022).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО РАСПЫЛА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА

Е. Ю. Шадрин*, Е. Б. Бутаков,
Е. П. Копьев, И. С. Садкин

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** evgen_zavita@mail.ru*

На примере дизельного топлива и воды исследуются характеристики газокапельного потока, формируемого при совместном распылении жидкостей струей перегретого водяного пара. С использованием метода цифровой визуализации в широком диапазоне режимных параметров исследована структура и дисперсный состав потока. Показано, что использование исследуемого метода распыла обеспечивает эффективное распыление несмешивающихся жидкостей: характерный размер капель для обоих жидкостей лежит в диапазоне 10–40 мкм. Таким образом, данный метод обеспечивает необходимое качество распыления для экологически безопасного сжигания углеводородного топлива.

Одним из эффективных способов повышения качества сжигания жидкого топлива является его модификация посредством создания топливной смеси, которая состоит из топлива в качестве основного компонента и других жидкостей в качестве добавки к смеси [1]. Одним из зарекомендовавших себя модификаторов является вода. Так, использование водотопливных смесей (эмульсий) позволяет обеспечить снижение выбросов, в частности, оксидов азота и твердых частиц [2]. Несмотря на большую палитру устройств и подходов для создания водотопливных эмульсий, остается проблема износа оборудования и неравномерного расхода компонент топлива и распределения капель воды в смеси. Таким образом, перспективной задачей является разработка методов создания эмульсии без использования смесителей, а, например, на стадии распыления жидкостей.

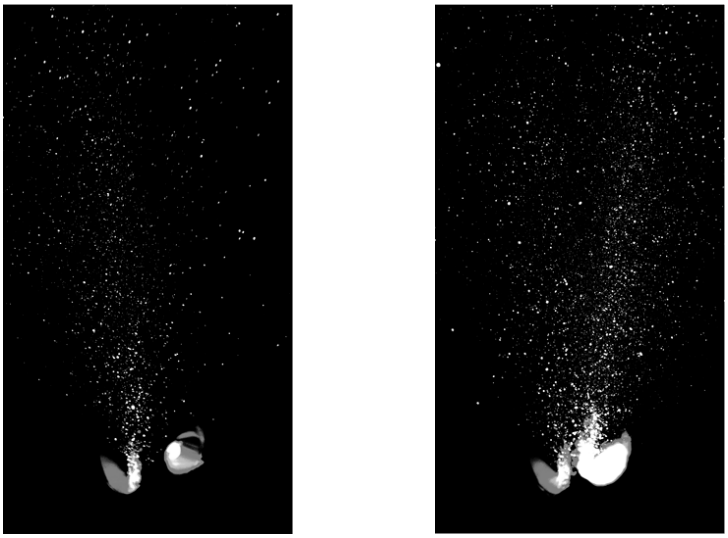
В данной работе исследуется процесс распыления несмешивающихся жидкостей (дизельное топливо и вода) высокоскоростной струей перегретого водяного пара. Данный способ распыла хорошо зарекомендовал себя при распыле углеводородного жидкого топлива, в т. ч. высоковязкого некондиционного топлива, такого как отработанное масло [3], сырая нефть, мазут и т. п.

Для исследования характеристик газокапельного потока использовался метод цифровой визуализации, основанный на использовании широко известного метода PIV. Поток освещается импульсным лазером (длина волны 532 нм), свет которого сформирован в виде лазерного ножа. Образы освещенных капель регистрируются цифровой ПЗС-камерой для последующей компьютерной обработки. В исследуемые жидкости предварительно был подмешан люминесцентный краситель Nile Red: длина волны возбуждающего света соответствует длине волны лазера – 532 нм. При этом использовалось чистое дизельное топливо, а к воде добавлялось небольшое количество этилового спирта для лучшего растворения красителя. Длина волны переизлучаемого красителем света составляла для дизельного топлива 585 нм, для воды – 660 нм, что при использовании различных пороговых светофильтров позволило регистрировать жидкости по отдельности. На рис. 1 представлены характерные фотографии, полученные методом PIV при совместном распыле обоих жидкостей с расходом 0,6 кг/ч для каждой. Представлены результаты объединения 10 полученных фотографий для каждой жидкости. Следует

© Шадрин Е. Ю., Бутаков Е. Б., Копьев Е. П., Садкин И. С., 2025

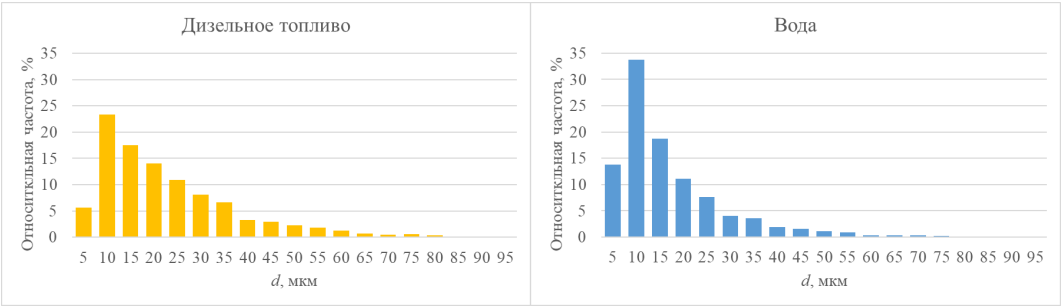
отметить, что использование пороговых светофильтров не позволяло полностью исключить свечение от второй жидкости. Это было учтено при дальнейшей обработке.

На рис. 2 представлен дисперсный состав, вычисленный по результатам цифровой обработки изображения: дизельное топливо (рис. 2, *а*); вода (рис. 2, *б*). Для этого к полученным фотографиям применены следующие процедуры: бинаризация изображения для увеличения контрастности; нахождение границ (Laplace edge detection); определение диаметра сферических образов. Можно видеть, что для обоих жидкостей характерно эффективное распыление: наибольшее количество детектируемых капель лежит в диапазоне 10–40 мкм. Это говорит о применимости используемого метода распыла для решения поставленной задачи распыления несмешивающихся жидкостей без предварительного перемешивания.



а *б*

Рис. 1. Характерные фотографии газокапельного потока, формируемого при совместном распылении воды и дизельного топлива струей перегретого пара: *а* – с фильтрами «оранжевое стекло (> 550 нм) и «сине-зеленое стекло» (< 590 нм), регистрируется только дизельное топливо; *б* – с фильтром «красное стекло» (> 610 нм), регистрируется только вода



а *б*

Рис. 2. Дисперсный состав газокапельного потока, формируемого при совместном распылении воды и дизельного топлива струей перегретого пара: *а* – дизельное топливо; *б* – вода

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-620.

Список источников

1. Sartomo A., Santoso B., Ubaidillah O. Muraza. Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: A review // Energy Convers. Manag. 2020. Vol. 213, No. 112817.

2. Gowrishankar S., Rastogi P., Krishnasamy A., Basavaraj M. G., Kaisare N., Aidhen I. S. Synthesis and characterization of emulsion fuels –Implications to spray and engine studies // Prog. Energy Comb. Sci. 2024. Vol. 101, Art. No. 101133.

3. Anufriev I. S., Shadrin E. Yu., Kopyev E. P., Alekseenko S. V., Sharypov O. V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // Appl. Therm. Eng. 2019. Vol. 163, Art. No. 114400.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ШЛАМА С ПОМОЩЬЮ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

А. В. Шебелев*, А. А. Гаврилов, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** aleksandr-shebelev@mail.ru*

Представлены результаты моделирования неньютовских жидкостей, модифицированными углеродными нанотрубками. Показано влияние их концентрации в растворе на эффективность к выносу шлама и перепад давления. Также получены картины течения суспензии в кольцевом канале.

Оптимизации буровых растворов для увеличения эффективности выноса шлама – это одна из важнейших задач при бурении скважин. Модификация буровых растворов наноматериалами, такими как наночастицы оксидов металлов или углеродные трубки, демонстрирует потенциал для улучшения их реологических, фильтрационных и смазывающих свойств. Однако механизмы взаимодействия нанодобавок с компонентами раствора и их влияние на гидродинамику в условиях высоких давлений и температур остаются недостаточно изученными. В данной работе представлено численное моделирование многофазных течений буровых растворов с нанодобавками, основанное на методах CFD (Computational Fluid Dynamics). Результаты исследования позволяют определить оптимальные концентрации наноматериалов и прогнозировать их эффективность в реальных условиях бурения, что способствует разработке инновационных решений для нефтегазовой отрасли.

Расчетная область представляет собой кольцевой канал с внутренним диаметром D_1 = 0,127 м и внешним диаметром D_2 = 0,2207 м, внутренняя труба вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью ω = 40 об/мин. Плотность бурового раствора была равна 968 кг/м^3. Реология буровых растворов задавалась из экспериментальных данных (табл. 1), для расчетов использовались свойства многочисленных буровых растворов, разработанных в данном проекте, модифицированных одностенными углеродными нанотрубками (ОСУНТ), углеродными многостенными нанотрубками (МУНТ) и гибридными нанодобавками на водной и углеводородной основе. Неньютоновские свойства описываются с помощью модели Гершеля – Балкли.

$$\mu = \left(\tau_0 + k_v \gamma^n\right)\gamma^{-1},$$

где τ_0 – предел текучести, Па; k_v – показатель консистенции, Па·с^n; n – индекс течения; γ – скорость сдвига.

В качестве частиц шлама рассмотрены сферические частицы с размером 0,5 мм, с плотностью 3000 кг/м^3.

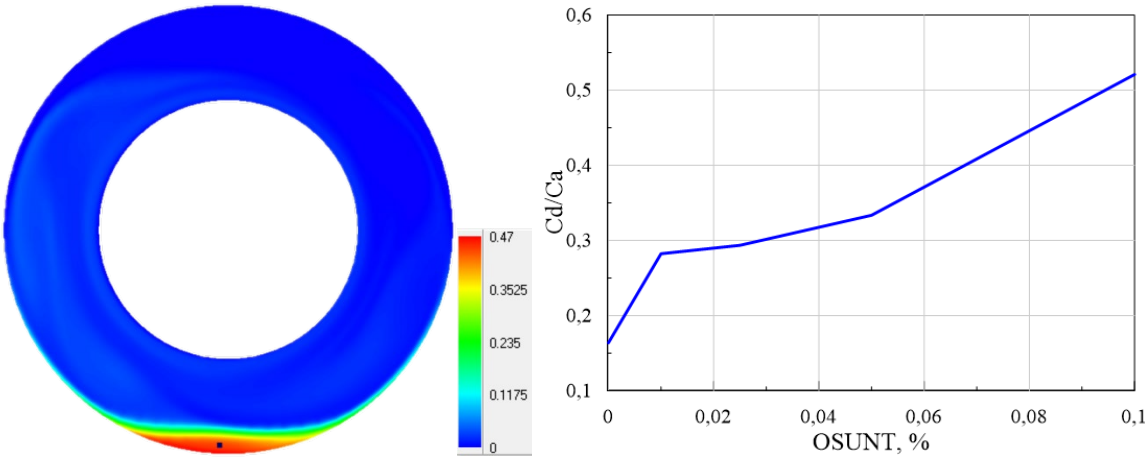
Для численного моделирования использовался программный пакет SigmaFlow. Для решения задачи была построена неструктурированная сетка со сгущением к стенкам, так как постановка задачи периодическая, то вдоль канала построено только две ячейки.

© Шебелев А. В., Гаврилов А. А., Минаков А. В., 2025

Таблица 1

Реологические параметры обратных эмульсий с ОСУНТ

w, масс.%	Модель Хершеля – Балкли			
	τ_0, Па	K, Па·с^n	n	R^2
0,01	4,562	0,714	0,501	0,9996
0,025	4,972	0,786	0,495	0,9994
0,05	5,292	0,851	0,491	0,9997
0,1	5,676	0,878	0,505	0,9993



а *б*

Рис. 1. Распределение концентрации частиц в центральном сечении канала для бурового раствора с концентрацией ОСУНТ 0,1 % (*а*); зависимость эффективности выноса шлама от концентрации добавки ОСУНТ для растворов на УВ основе (*б*)

На рис. 1, *а,* на нижней стенке образуется неподвижная засыпка частичками, высотой в треть канала, немного смещенная влево из-за вращения внутренней трубы.

Как видно из рис. 1, *б,* с увеличение процентного соотношения добавки ОСУНТ способность раствора к выносу шлама повышается в 3,4 раза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022.

Список источников

1. Гаврилов А. А., Шебелев А. В. Одножидкостная модель смеси для ламинарных течений высококонцентрированных суспензий // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 2. С. 84–98.

2. Cheng N. S., Law A. W. K. Exponential formula for computing effective viscosity // J. Powder Technol. 2003. Vol. 129. P. 156–160.

3. Johnson P. C., Jackson R. Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing // Journal of Fluid Mechanics. 1987. Vol. 176. P. 67–93.

4. Picano F., Breugem W. P., Mitra D., Brandt L. Shear thickening in non-Brownian suspensions: an excluded volume effect // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111 (9). P. 98–302.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА РЕОЛОГИЮ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ КСАНТАНА

Е. Н. Волченко*, М. И. Пряжников, С. Д. Казанина, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** envolchenko@yandex.ru*

Исследовано влияние концентрации сферических наночастиц SiO_2 со средним размером 50 нм на реологию полимерных растворов ксантана. Получено, что полимерные растворы имеют псевдопластичную реологию. Добавление наночастиц приводит к повышению вязкости полимерного раствора, при этом коэффициент консистенции раствора с 1 масс.% наночастиц в 1,12 раз превышает базовый раствор ксантана без наночастиц.

В настоящее время актуальным направлением является разработка новых вытесняющих флюидов для повышения нефтеоотдачи пласта путем их модификации наночастицами. Добавление в полимерные растворы наночастиц разной формы, материала, размера и концентрации позволяет получать нефтевытесняющие композиции с широким спектром реологических характеристик.

Проведено исследование реологии водных растворов биополимера ксантанового типа марки «FLOXAN-200» (Интэк-Сервис, Россия), модифицированных сферическими частицами SiO_2 со средним размером 50 нм (ООО «Бардаханов», Россия). Были приготовлены устойчивые полимерные растворы с фиксированной концентрацией полимера 0,4 масс.%. Концентрация наночастиц варьировалась от 0,125 до 1 масс.%. Приготовление полимерных композиций с наночастицами представляло собой двухэтапный процесс. Вначале готовилась суспензия с использованием механического и ультразвукового диспергаторов, а потом добавлялся полимер, и раствор перемешивался с помощью верхнеприводной мешалки.

Зависимости вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига полимерных растворов были получены на реометре MCR 302e (Anton Paar, Австрия) с использованием геометрии «конус/плита». Измерения проводились при постоянной температуре 25 °C в диапазоне скоростей сдвига от 0,1 до 1000 1/с.

Было получено, что кривые течения полимерных растворов с наночастицами с высокой точностью ($R^2 = 0{,}996$) могут быть аппроксимированы степенной реологической моделью ($\tau = K_V \dot{\gamma}^n$, где K_V – коэффициент консистенции жидкости; n – индекс поведения течения жидкости). Исследуемые в данной работе полимерные композиции с добавлением наночастиц являются псевдопластичными жидкостями.

Установлено, что добавление 1 масс.% наночастиц SiO_2 приводит к заметному увеличению вязкости полимерного раствора. Коэффициент консистенции раствора с 1 масс.% SiO_2 на 12 % выше коэффициента консистенции базового раствора без наночастиц. Добавление более низких концентраций диоксида кремния также приводило к повышению вязкости раствора. Индекс поведения течения полимерных растворов немонотонно снижался с ростом концентрации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022 (https://rscf.ru/project/23-79-30022).

© Волченко Е. Н., Пряжников М. И., Казанина С. Д., Минаков А. В., 2025

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РЕОЛОГИИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИММЕТРИИ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ИЗОГНУТОМ U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

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

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** perpetuityrs@mail.ru*

Предложен способ определения показателя консистенции и индекса течения степенной жидкости на основе анализа вторичных вихрей Дина, возникающих в изогнутом канале. Это явление удобно описывать с помощью угла рециркуляции, отсчитываемого от линии, соединяющей начало и конец закругления, до линии, соединяющей радиус закругления и область начала появления вихрей Дина. Были проведены исследования структуры течения неньютоновских жидкостей в U-образном микромиксере. Получены зависимости угла рециркуляции от расхода жидкости при ее параметрах. Предложена универсальная корреляция, описывающая зависимость обратного числа Дина от угла рециркуляции потока, которая позволяет определить параметры неньютоновский жидкости, в т. ч. экспериментально.

Определение параметров степенной (неньютоновской) жидкости является важной задачей, так как неньютоновские жидкости применяются во многих областях промышленности и производства. В частности, в нефтедобывающей отрасли как буровые растворы, необходимые для создания скважин, так и вытесняющие агенты на основе полимеров и ПАВ, необходимые для извлечения нефти, обладают неньютоновскими свойствами. В работе [1] было проведено исследование вихрей Дина в криволинейном микрофлюидном канале и получена методика интерпретации результатов фотометрических наблюдений для численной оценки вязкости ньютоновских жидкостей. Данная методика была применена для оценки вязкости неньютоновских жидкостей. Кроме эксперимента были проведены расчетные исследования в идентичной постановке.

В данной работе на два входа в канал подавались две одинаковые жидкости, окрашенные в разные цвета, которые затем поступали в изогнутый канал. Были рассмотрены течения двух степенных жидкостей со следующими параметрами: показатель консистенции задавался равным 0,006; 0,06 и 0,6 Па·с^n, индекс течения задавался равным 0,4; 0,6 и 0,8. Расходы для обеих жидкостей на входе были одинаковыми и равными 2 мл/мин, 10 мл/мин и 20 мл/мин. Кроме того, были проведены исследования течения двух неньютоновских степенных жидкостей, для создания которых использовался полимер «Полифлок А2020» (НПО «Полифлок») с различной массовой концентрацией. Реологические параметры, измеренные с помощью ротационного вискозиметра, приведены в табл. 1. Расходы этих жидкостей варьировались в пределах 2–20 мл/мин. Были проведены экспериментальные измерения и математическое моделирование.

© Лобасов А. С., Минаков А. В., Якимов А. С., Филимонов С. А., 2025

Таблица 1

Коэффициенты модели для полимера «Полифлок А2020»

%	n	k [Pa s^n]
0,01	0,8103	0,005606
0,05	0,45559	0,25862
0,1	0,50166	0,44057

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

В работе [1] отмечено, что наибольший интерес представляет зависимость обратного числа Дина от значения угла рециркуляции (рис. 1). Как видно, все зависимости ложатся на одну кривую, которую можно аппроксимировать корреляцией вида:

$$\mathrm{De}^{-1}(\theta) = a(\theta - c)^b,$$

где $a = 10^{-4}$, $b = 2$, $c = 15$.

Таким образом, используя определения чисел Рейнольдса и Дина, можно получить систему уравнений вида:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{a(\theta_1 - c)^b} = \dfrac{\rho u_1^{2-n} d_h^n}{k}\sqrt{\dfrac{d_h}{2R}} \\ \dfrac{1}{a(\theta_2 - c)^b} = \dfrac{\rho u_2^{2-n} d_h^n}{k}\sqrt{\dfrac{d_h}{2R}} \end{cases}.$$

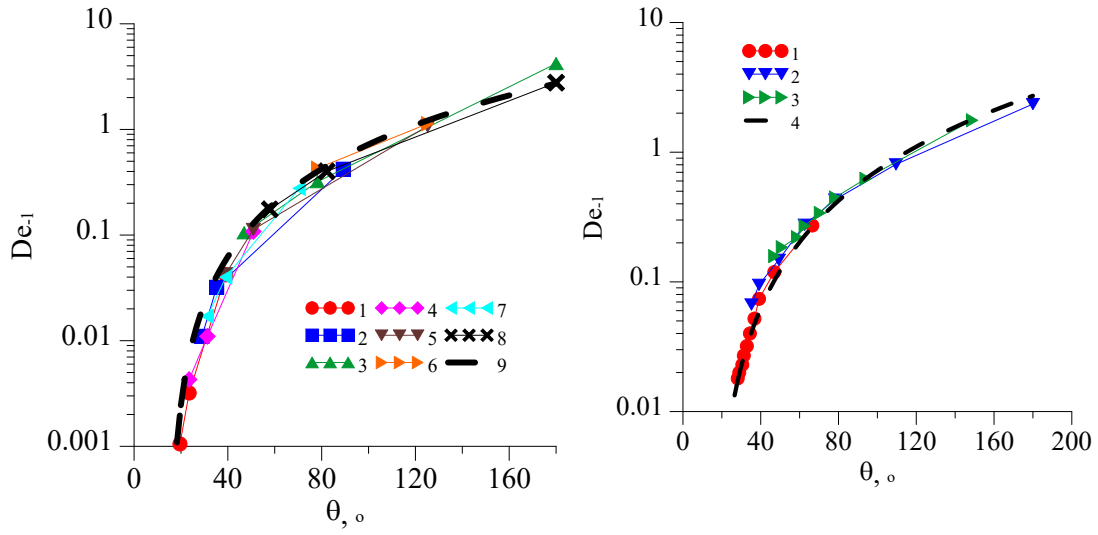


Рис. 1. Зависимость обратного числа Дина от значения угла рециркуляции потока:
1 – φ = 0,01 %; *2* – φ = 0,05 %; *3* – φ = 0,1 %; *4* – корреляция (15)

Решив эту систему, можно получить значения коэффициентов степенной модели n и k, зависящие от измеренных значений угла рециркуляции потока:

$$\begin{cases} n(\theta) = 2 - \dfrac{\ln\left(\dfrac{a(\theta_1 - c)^b}{a(\theta_2 - c)^b}\right)}{\ln\left(\dfrac{u_1}{u_2}\right)} \\ k(\theta) = \rho u_1^{2-n(\theta_1)} d_h^{n(\theta_1)} \cdot a(\theta_1 - c)^b \cdot \sqrt{\dfrac{d_h}{2R}} \end{cases}$$

Список источников

1. Pryazhnikov M. I. et al. Fluid viscosity measurement by means of secondary flow in a curved channel // Micromachines. 2022. V. 13. T 9. P. 1452.

ВЫРАВНИВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ПЕРЕД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ РАСХОДОМЕРОМ ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Н. С. Душин*, Н. Д. Пашкова, И. В. Никифоров

ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31
** ndushin@bk.ru*

Изучено влияние длины камеры смешения, длины поствключенного участка трубопровода и наполнителей в малых кольцевых зазорах цилиндрического устройства подготовки потока на устранение дефекта скорости и асимметрию профилей скорости в ближнем следе за устройством подготовки потока в диапазоне чисел Рейнольдса от 2300 до 5000. В экспериментах рассмотрено стационарное течение газа в трубопроводе с предвключенным участком, имеющим двойной изгиб в перпендикулярных плоскостях (наиболее сложный случай пространственной конфигурации трубопровода с точки зрения выравнивания профилей скорости). Измерения выполнены оптическим методом Smoke Image Velocimetry в кольцевом разрыве трубопровода, помещенном в камеру Эйфеля. В работе сделан акцент на актуальности рассматриваемого вопроса для ультразвуковых расходомеров, так как ультразвуковые расходомеры на сегодняшний день являются наиболее точными средствами измерения расхода газа.

Выравнивание профилей скорости в газотранспортных системах необходимо для повышения точности измерения расхода газа и организации сличительных испытаний расходомеров различных производителей и принципов действия. Влияние формы профилей скорости на точность измерения расхода можно рассматривать с двух сторон: градуировка расходомера при выпуске и эксплуатация. На этапе градуировки наибольшую сложность представляют режимы ламинарно-турбулентного перехода, так как на них нельзя однозначно определить коэффициенты, связывающие расход с выходным сигналом расходомера (коэффициенты преобразования). Это связано с общей нерешенностью проблемы ламинарно-турбулентного перехода. В эксплуатации профили скорости искажаются вследствие многообразия пространственной конфигурации трубопроводов, особенностей работы подключенного к трубопроводам оборудования и запорной арматуры. Кроме того, необходимо принимать во внимание различие условий градуировки расходомеров и условий эксплуатации.

Для выравнивания профилей скорости можно использовать длинные прямолинейные участки трубопровода перед расходомером или использовать устройства подготовки потока (УПП). Более рациональным, а в некоторых случаях единственно возможным является второй подход. УПП обычно работают по принципу полного разрушения предыстории течения и формирования нового поля скорости. При этом производители стараются проектировать устройства так, чтобы новое поле скорости было одинаковым при разных предысториях. При решении задачи выравнивания поля течения в каналах сложной геометрии с источниками акустического шума было предложено УПП цилиндрического типа [1].

Исследования показали перспективность применения такого типа УПП на турбулентных режимах течения при числах Рейнольдса более 5000. При меньших значениях числа Рейнольдса профили имеют дефект скорости. Дефект скорости, в свою очередь, влияет на форму акустического пути и, следовательно, его длину между датчиками ультразвукового расходомера. По этой причине деформация профиля скорости оказывает большее влияние на точность измерения расхода, чем закрутка потока.

© Душин Н. С., Пашкова Н. Д., Никифоров И. В., 2025

Учитывая, что повышение точности измерений на режиме ламинарно-турбулентного перехода является отдельной задачей, ограничимся на данном этапе вопросом устранения дефекта скорости в ближнем следе за цилиндрическим УПП в диапазоне чисел Рейнольдса от 2 300 до 5 000.

Измерение профилей в работе выполнялось двумерным оптическим методом Smoke Image Velocimetry (SIV) в разрыве поствключенного участка трубопровода, помещенного в камеру Эйфеля. Участок трубопровода перед УПП имел два изгиба на 90° в перпендикулярных плоскостях. Известно, что двойной изгиб трубопровода формирует поле скорости с сильной асимметрией и закруткой. Такое поле скорости является наиболее сложным и интересным случаем стационарного течения с точки зрения определения эффективности работы УПП.

Конструктивной особенностью исследованного в [1] УПП является длина цилиндрического картриджа (набора соосных перфорированных цилиндров), которая равна длине расширенной части корпуса УПП. То есть течение на выходе из картриджа сразу попадает в конфузорную часть, в результате чего на периферии ядра потока в поствключенном участке трубопровода формируется область ускорения течения. Установлено, что уменьшить дефект скорости в такой ситуации можно добавлением камеры смешения между выходным сечением картриджа и конфузором корпуса. Варьирование длиной камеры смешения L показало, что скачок в изменении профилей скорости происходит при $L/D = 0{,}33$, где D – диаметр расширенной части корпуса УПП. Изменение профилей при таком значении L/D характеризуется значительным увеличением скорости в ядре потока и улучшением симметрии профилей скорости, однако след ускорения течения на периферии профиля хоть и уменьшается, но по-прежнему превышает скорость на оси канала.

Приемлемое выравнивание профилей скорости произошло при $L/D = 0{,}67$. Дальнейшее увеличение длины камеры смешения значительными изменениями не сопровождалось. Значения скорости и форма профиля при $L/D = 0{,}67$ являются типичными для начального участка течения в трубе, но особенности начальных условий в области стыка УПП с поствключенным участком трубопровода с диаметром d способствуют формированию на дистанции $3{,}5d$ профиля скорости, характерного для трубопровода длиной порядка $10d$ с ударным профилем на входе.

Сопоставимое с диапазоном варьирования L/D увеличение длины поствключенного участка трубопровода при $L/D = 0$ позволило уменьшить асимметрию профилей скорости, но практически не повлияло на уменьшение дефекта скорости. Продольные пульсации скорости в ядре потока при увеличении длины поствключенного участка на два калибра уменьшаются в 1,4 раза. Профиль продольных пульсаций скорости без камеры смешения в целом повторяет подобный профиль для круглой струи. Камера смешения устраняет асимметрию профилей продольных пульсаций скорости, но значения пульсаций скорости в ядре потока сопоставимы с вариантом без камеры смешения. Значения пульсаций скорости в области стенок увеличились до $0{,}12U_b$, соответственно, профиль продольных пульсаций скорости в УПП с камерой смешения стал идентичным профилю в трубе.

Интересно, что заполнение малых кольцевых зазоров УПП (через которые в незаполненном варианте газ практически не протекает) некоторыми наполнителями (дискретные стальные спирали и резиновые кольца) позволяет устранить остаточные проявления закрутки потока. Заполнение резиновыми кольцами также позволило практически нивелировать дефект скорости, тогда как при использовании дискретных спиральных элементов и стальной витой стружки дефект скорости составлял порядка 5 %. Разница в эффективности нивелирования дефекта скорости между исследованными

конфигурациями с наполнителями может быть объяснена особенностями вносимых малых возмущений и различиями в гидравлическом сопротивлении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00873 (https://rscf.ru/project/25-29-00873).

Список источников

1. Душин Н. С., Валеев А. А., Колчин С. А., Душина О. А. Разработка устройства подготовки потока для трубопроводов с источниками акустического шума // Теплоэнергетика. 2023. № 11. С. 54–65.

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ ДИОКСИД УГЛЕРОДА + Н-ТЕТРАДЕКАН

Р. Р. Кабиров, И. Ш. Хабриев*, В. Ф. Хайрутдинов, И. Д. Мухаметзянов, И. М. Абдулагатов

Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68
** termi0@yandex.ru*

В данной работе представлены новые экспериментальные данные по свойствам фазового равновесия газ – жидкость в бинарной системе диоксид углерода – н-тетрадекан на трех выбранных изотермах 313,15 К, 333,15 К и 353,15 К в диапазоне давлений от 3,8 до 19,0 МПа. Измерения проводились с использованием оптической ячейки, работающей при высоких температурах и давлениях. Измеренные данные фазового равновесия газ – жидкость в бинарной системе диоксид углерода – н-тетрадекан использовались для определения критических данных кривой $P_к$ –$T_к$.

Асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) представляют собой сложную углеводородную смесь, включающую асфальтены, смолы, парафины, масла, серу, металлы, растворы солей органических кислот, комплексные соединения, коллоидно-диспергированные минеральные вещества, а также воду и механические примеси. Повышение эффективности экстракционного процесса в части достижения максимального выхода углеводородов и очистки устья нефтяных скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений в значительной степени зависит и определяется изученностью характеристик фазового равновесия систем «извлекаемая компонента (парафин) – экстрагент».

В настоящей работе представлены новые данные о фазовом равновесии и критических свойствах смеси CO_2+н-тетрадекан. Данные охватывают диапазон температур от 313 до 353 К и давлений от 3,8 до 19,0 МПа.

Исследования выполнены на экспериментальной установке, которая подробно описана в работе [1]. Измеренные данные изотермического фазового равновесия (*PTxy*) для бинарной смеси CO_2 + н-тетрадекан с использованием описанного выше метода для трех изотерм 313, 333 и 353 К показаны на рис. 1 (в проекции *P-x*). Измерения проводились при давлении до 19 МПа. Полученный результат показывает, что присутствие н-тетрадекана в паровой фазе незначительно.

В проекции *P-x-y* (при постоянной температуре, см. рис. 1) максимальное давление на изотермической кривой фазового равновесия, при котором состав жидкой (x) и газовой (y) фаз одинаков, т. е. $x = y$, является критической точкой смеси. Другими словами, давление, при котором пересекаются жидкая (полные символы см. на рис. 1) и газовая ветви изотермической кривой фазового равновесия (*P-x*), а жидкая и газовая фазы становятся идентичными, является критическим давлением. При превышении критического давления для каждой изотермы мы получаем сверхкритическое состояние смеси. Полученными значениями критических параметров для смеси CO_2 + н-тетрадекан являются:

T_K = 313 К, P_K = 10,39 ± 0,03 МПа, x = 0,975 ± 0,002 для н-тетрадекана;

T_K = 333 К, P_K = 15,16 ± 0,01 МПа, x = 0,946 ± 0,002 для н-тетрадекана;

T_K = 353 К, P_K = 18,65 ± 0,01 МПа, x = 0,925 ± 0,002 для н-тетрадекана.

На рис. 2 показаны критические точки (P_K – T_K проекция критической кривой) бинарной смеси CO_2+н-тетрадекан, а также соответствующие кривые давления паров

© Кабиров Р. Р., Хабриев И. Ш., Хайрутдинов В. Ф., Мухаметзянов И. Д., Абдулагатов И. М., 2025

для чистых компонентов, рассчитанные по данным EoS [19] для CO_2 и корреляции давления паров для н-тетрадекана [20].

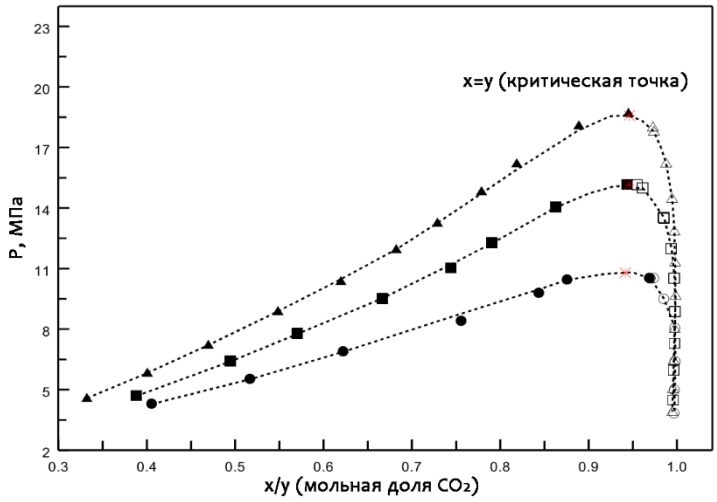


Рис. 1. *PTxy* фазовая диаграмма (VLE) бинарной смеси CO_2 +н-тетрадекан при выбранных изотермах: ● – 313 К; ■ – 333 К; ▲ – 353 К; ∗ – критическая точка (*x=y*). Открытые символы обозначают концентрацию CO_2 в газовой фазе; полные символы обозначают концентрацию CO_2 в жидкой фазе; пунктирные кривые – это интерполированные значения

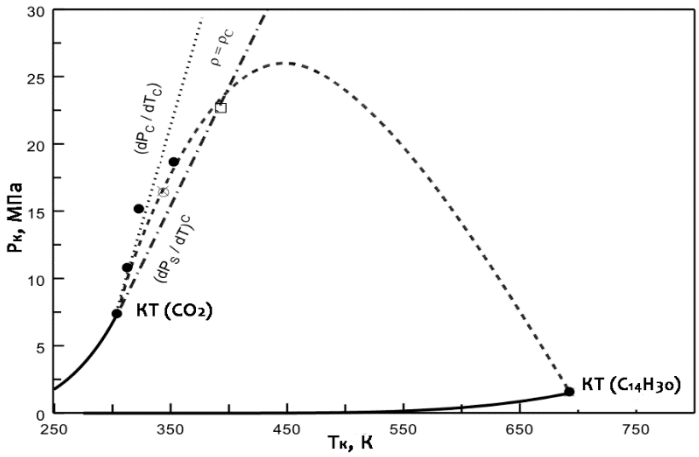


Рис. 2. P_k-T_k проекция критической линии бинарной смеси CO_2+н-тетрадекан вместе с кривыми давления паров для чистых компонентов. Сплошные кривые представляют собой значения давления паров чистого CO_2, рассчитанные по стандартному уравнению состояний (REFPROP [2]), а для н-тетрадекана – по корреляционному уравнению [20]. ● – эта работа; ○ – [3]; □ – [4]; × – [5]; пунктирная кривая – критическая кривая (интерполированные значения); пунктирной линией обозначена критическая изохора чистого растворителя (CO_2) [19]; пунктирная линия – начальный наклон критической кривой P_K-T_K

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10129 (https://rscf.ru/project/22-79-10129).

Список источников

1. Khairutdinov V. F., Gumerov F. M., Zaripov Z. I., Khabriev I. Sh., Yarullin L. Yu., Abdulagatov I. M. Solubility of naphthalene in supercritical binary solvent propane-butane mixture // J. Supercritical Fluids. 2020. № 156. 104628.

2. Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O. NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, REFPROP, version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2018.

3. Gasem K. A. M., Dickson K. B., Dulcamara P. B., Nagarajan N., Robinson R. L. Equilibrium Phase Compositions, Phase Densities, and Interfacial Tensions for CO2 + Hydrocarbon Systems 5. CO2 + n-Tetradecane // J. Chem. Eng. Data. 1989. № 34. Pp. 191–195.

4. Scheidgen A. Fluid phase ngleichgewichte binäer und ternäer Kohlendioxidmischungen mit schwerflüchtigen organischen Substanzen bis 100 MPa. Cosolvency effect, Miscibility windows und L¨ocher in der kritischen Fläche // Dissertation Ruhr-Universit¨at Bochum, Bochum, 1997.

5. Pollack N. R., Enick R. M., Mangone D. J., Morsi B. I., Pollack N. R. et al. Effect of an aqueous phase on CO2/tetradecane and CO2/maljamar-crude-oil systems // SPE Reserv. Eng. 1988. № 3. P. 533–541.

ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ГРАФЕНОВЫХ СУСПЕНЗИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ ГРАФИТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ

О. П. Стебелева*, Л. В. Кашкина

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** opstebeleva@mail.ru*

В работе были синтезированы стабильные водные графеновые суспензии. Графен получен из природного и искусственного графитов методом гидродинамического расслоения с большими скоростями сдвига (жидкофазная эксфолиация) при обработке в миксере роторного типа (Китай). Низко концентрированные водные суспензии графена были исследованы методами РФА, электронной микроскопии, седиментационного анализа.

Применение наночастиц в повышении нефтеотдачи пластов (EOR) предлагает практический подход к решению некоторых проблем, связанных с поверхностью, с которыми сталкиваются современные технологические процессы. Графен представляет собой монослой атомов углерода, образующих гексагональную решетку, обладает прекрасными оптическими, механическими, теплофизическими и электронными свойствами.

Применение графена в повышении нефтеотдачи пластов является перспективным направлением в нефтедобыче. Графен, благодаря своим уникальным свойствам, позволяет улучшить эффективность третичных методов добычи нефти [1]. Ключевые аспекты использования графена в третичных методах добычи нефти – увеличение вязкости жидкости заводнения и снижение поверхностного натяжения на границе раздела масла и воды при эмульсионном заводнении.

Это способствует лучшему смачиванию поверхности породы водной фазой и облегчает отрыв капель нефти от поверхности, повышая тем самым нефтеотдачу. Наночастицы графена могут также улучшать стабильность эмульсий типа «масло в воде», что важно для поддержания однородности смеси воды и нефти, что способствует более эффективному вытеснению нефти из пласта.

Одной из проблем является обеспечение стабильности наночастиц графена в водной фазе в условиях высокого давления и температуры в нефтяных пластах, для предотвращения его агломерации.

Применение высокоскоростной гидродинамической технологии с использованием устройств с большим сдвигом позволяет получить многослойные графеновые частицы с латеральным размером до 1 мкм [2]. Методом акустической спектроскопии определено уменьшение размеров частиц после обработки более чем на три порядка. При диспергировании графитов образуются графеновые квантовые точки (осколки графеновых частиц) размером от 10 до 100 нм. При кавитационных явлениях в процессе гидродинамического расслоения в воде образуются и коллапсируют микропузырьки, генерируя высокие локальные температуры и давления, что приводит к образованию активных форм кислорода. Окисление графеновых квантовых точек активными формами кислорода улучшает стабильность графеновой суспензии.

Полученные в работе суспензии графена с добавлением ПАВ устойчивы к расслоению в течение более чем 9 месяцев. Применение графена в технологиях повышения нефтеотдачи открывает новые горизонты для эффективной добычи нефти. Уникальные свойства графена позволяют решать многие проблемы, связанные с поверхностными явлениями в нефтяных пластах. Однако для широкого внедрения этих техно-

© Стебелева О. П., Кашкина Л. В., 2025

логий необходимы дальнейшие исследования и разработки, направленные на повышение экономической эффективности и экологической безопасности использования наночастиц графена.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022 (https://rscf.ru/project/23-79-30022).

Список источников

1. Goyat R. et al. Enhancing oil–water emulsion separation via synergistic filtration using graphene oxide–silver oxide nanocomposite-embedded polyethersulfone membrane // Waste Manag Res. 2024. P. 0734242X231223914.

2. Rasyotra A. et al. A review of low-cost approaches to synthesize graphene and its functional composites // J Mater Sci. 2023. Vol. 58, N 10. P. 4359–4383.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. В. Ларин*, М. И. Силивина, А. А. Щеглов, А. С. Матяш, В. Д. Лычаков, А. В. Коструба

Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И. И. Ползунова
191167, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6
** LarinAV@ckti.ru*

Рассматриваются проблемы, связанные с испытаниями предохранительной арматуры по ГОСТ 34437–2018, в частности с недостаточной проработкой алгоритмов обработки экспериментальных данных и методики определения коэффициента расхода. Особое внимание уделяется определению коэффициента расхода на жидкости и его зависимости от интенсивности кавитации. Также анализируется вопрос проведения испытаний при перепаде давления, близком к указанному в конструкторской документации. Доклад подчеркивает необходимость дальнейших исследований, также сформулированы предложения по более эффективному и информативному использованию параметра эффективной площади для оценки работоспособности ПК, что может существенно повысить безопасность эксплуатации различных технических агрегатов.

В докладе рассмотрены проблемы, возникающие при проведении испытаний предохранительной арматуры (далее – ПК) по ГОСТ 34437–2018 (далее – ГОСТ), связанные с недостаточной проработкой алгоритмов обработки экспериментальных данных, а также методики определения коэффициента расхода.

Изучение различных отечественных и зарубежных источников показало отсутствие научных работ, основанных на экспериментальном подтверждении и анализе гидравлических характеристик предохранительной арматуры.

Коэффициент расхода α рассчитывается по формуле, представленной в ГОСТ 34437–2018 [1]:

$$\alpha=\frac{G}{3{,}6\cdot F\cdot K_{п}\cdot\sqrt{P_1\cdot\rho_1}},$$

где G – массовый расход среды, кг/ч; F – площадь сечения ПК, равная наименьшей площади сечения в проточной части седла, мм^2; $K_п$ – безразмерная массовая скорость; P_1 – абсолютное давление до ПК, МПа; ρ_1 – плотность среды при параметрах до ПК, кг/м^3.

По ГОСТу коэффициент расхода ПК на жидкости α_2 определяется в режиме развитой кавитации, что характеризуется снижением значения α_2 с увеличением интенсивности кавитации в проточной части изделия. В связи с тем, что коэффициент расхода напрямую влияет на безопасность защищаемого оборудования, необходимо проводить испытания при перепаде давление приближенному к указанному в конструкторской документаци.

В соответствии с ГОСТом (п. 7.4.3.3) при испытаниях ПК по определении коэффициента расхода на воздухе α_1 в случае, если в соответствии с проектом при эксплуатации ПК предполагаются режимы работы, при которых отношение абсолютных давлений $\beta = P_2/P_1 < 0{,}25$, то допускается проводить испытания при $\beta = 0{,}25$ в связи с тем, что отношение давлений $\beta = 0{,}25$ гарантировано обеспечивает критический режим течения в седле клапана, характеризуемое прекращением зависимости α_1 от β.

© Ларин А. В., Силивина М. И., Щеглов А. А., Матяш А. С., Лычаков В. Д., Коструба А. В., 2025

Однако опыт специалистов ОАО «НПО ЦКТИ», полученный при экспериментальном определении коэффициентов расхода на воздухе достаточно большого количества ПК различных производителей, показывает, что проводить испытания ПК при отношении давлений $\beta = 0{,}25$ не всегда целесообразно, так как в зависимости от конструктивных характеристик клапана критический режим течения в седле ПК, при наступлении которого коэффициент расхода остается постоянной величиной $\alpha_1 = \text{const}$, может наступать при значениях коэффициента $\beta > 0{,}25$.

Зависимости $\alpha_1 = f(\beta)$ (рис. 1) полностью подтверждают вывод, сделанный ранее: в зависимости от конструктивных характеристик клапанов критический режим течения в седле испытанных ПК, характеризуемый постоянством $\alpha_1 = \text{const}$, может наступить при значениях коэффициента β, находящихся в диапазоне $0{,}25 \le \beta < 0{,}40$.

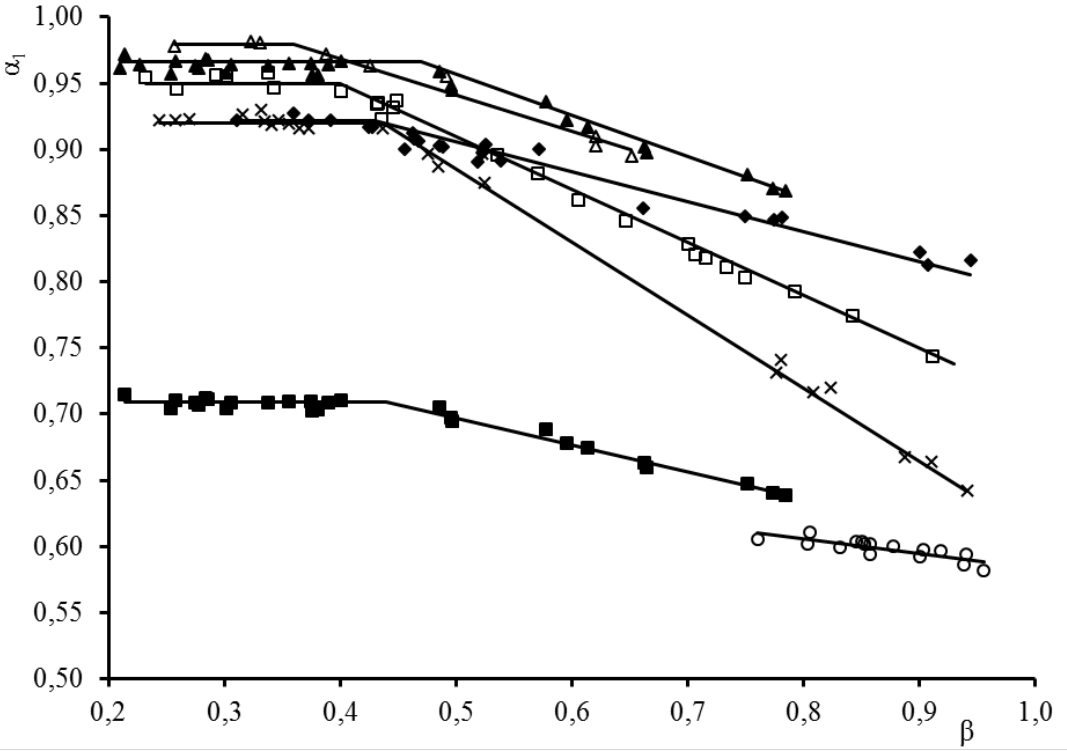


Рис. 1. Экспериментальная зависимость $\alpha_1 = f(\beta)$ ПК различных производителей:
△ – № 1; ▲ – № 2; ╳= № 3; ■ – № 4; □ – № 5; ♦ – № 6; ○ – № 7

Также следует сказать о том, что значение коэффициента расхода α в полной мере не отображает меру интенсивности рассеивания энергии потока в ПК даже с учетом того, что в паспорте ПК, наряду со значением коэффициента расхода α, в обязательном порядке указывается значение диаметра седла d_c либо площади проходного сечения седла F_c. Более информативным и однозначно трактуемым параметром ПК является эффективная площадь αF_c.

Аналог параметра $\alpha_1 F$ применяется в зарубежных стандартах. По значению параметра αF_c в рамках одного номинального диаметра DN можно определить эффективность ПК при сбросе аварийного расхода.

Понятие эффективной площади применяется в расчетах не только трубопроводной арматуры, но и, к примеру, в авиационной промышленности в случае моделирования декомпрессии. Коэффициент расхода и эффективная площадь применяются в широкой сфере, в основном связанной с безопасной эксплуатацией технических агрегатов:

котлов, сосудов и т. д., поэтому развитие экспериментального метода подтверждения безопасной работоспособности ПК является перспективным.

Список источников

1. ГОСТ 34437–2018 Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОДНО- И ДВУМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ В КАРБОНАТНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

А. М. Зорин

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
426069, Российская Федерация, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7
** i@amzorin.ru*

Рассматриваются вопросы корректного учета особенностей строения карбонатного коллектора при моделировании процессов фильтрации флюида в его порах в рамках одномерных и двумерных моделей фильтрации при решении задач моделирования гидравлического разрыва пласта.

Существует несколько видов классификаций нефтеносных пород-коллекторов, наиболее распространенной из них [1] является их распределение на терригенные, карбонатные и кремнистые. При этом породы-коллекторы указанных типов отличаются как по строению, химическому составу, физико-механическим свойствам, так и по фильтрационным характеристикам [2–7]. В настоящее время существенная доля известных и прогнозируемых запасов углеводородов на территории РФ сосредоточены именно в карбонатных коллекторах [8]. Такие породы характеризуются существенной неоднородностью со значительным включением трещин, каверн и, в ряде случаев, пор [9; 10]. Соответственно, фильтрационные свойства такой породы будут существенно неравномерны как в продольном (горизонтальном) направлении, так и в поперечном (вертикальном).

Необходимо отметить, что корректный учет фильтрационных свойств, как и достоверное моделирование процесса фильтрации флюида в пластах, необходимо для обеспечения точности и достоверности как гидродинамических моделей [11] нефтепромысловых пластов, имитационных моделей системы поддержания пластового давления [12], так и для достоверной симуляции и моделирования процессов гидроразрыва пласта [13]. Поэтому вопросы оценки применимости различных моделей фильтрации для численного моделирования гидродинамики, в т. ч. и фильтрации, карбонатных коллекторов не теряют своей актуальности.

Рассматривается задача о процессах пространственной фильтрации в стволе горизонтальной скважины и примыкающих к нему трещинах разного генезиса. Карбонатный коллектор определен как изотропная поровая/пористая среда сложного строения. Поскольку флюид представляет собой смесь нефти, пластовой воды и незначительного количества иных веществ (например, протравочных жидкостей для кислотных обработок, буровых растворов, попутного нефтяного газа и т. д.), то такая субстанция является многофазной средой. Движение многофазной многокомпонентной среды вдоль скважины и в полости трещины описывается в рамках пространственного представления без учета неньютоновских свойств жидкости, при этом фильтрация среды сквозь карбонатный коллектор описывается в рамках одномерной, двумерной и пространственной постановок.

Одномерная модель фильтрации строится на основе классической теории фильтрации [14] и предположений Дюпюи, двумерная модель фильтрации построена с применением гипотезы плоских сечений [15] и модели Беренблатта – Желтова [16]. Коэффициенты фильтрации всех моделей определены на основе фильтрационных испытаний.

© Зорин А. М., 2025

В результате исследования выявлена и обоснована нецелесообразность применения одномерных моделей фильтрации сред для исследования особенностей массопереноса в карбонатных коллекторах. Показана высокая сложность строения карбонатных коллекторов, необходимость применения адаптивных расчетных сеток высокого разрешения для корректного учета геометрических особенностей порового пространства.

Подтверждена возможность и допустимость применения двумерных моделей при использовании реальных, основанных на керновых испытаниях, коэффициентов фильтрации, полученных для фильтрации жидкости в керне в продольном и поперечном направлениях.

Список источников

1. Бурлин Ю. К., Конюхов А. И., Карнюшина Е. Е. Литология нефтегазоносных толщ. М. : Недра, 1991. 286 с.

2. Ханин А. А. Породы-коллекторы нефти и их изучение. М. : Недра, 1969. С. 366.

3. Швецов М. С. К вопросу о терминологии, классификации и о кратких характеристиках осадочных пород. Бюлл. МОИП. Отд. геологии. 1938. Т. XVI, вып. 4. С. 297–312.

4. Швецов М. С. Петрография осадочных пород. М. : Недра, 1958. 416 с.

5. Михайлова М. В. Типы карбонатных массивов и их диагностические признаки // Нефтегазоносность карбонатных формаций : сб. научных трудов. М. : ИГиРГИ, 1987. С. 15–27.

6. Багринцева К. И. Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. М., 1999. 282 с.

7. Toro E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: A practical introduction. 3rd ed. Berlin : Springer, 2009. 724 pp.

8. Головин К. Б., Головин Б. А., Калинникова М. В. Типы и виды коллекторов : учеб.-метод. пособие. Саратов, 2014. 60 с.

9.Chilingar G., Main R., Sinnokrot A. Relationship between porosity, permeability and surface areas of sediments. Sediment. Petrol, 1963. Vol. 33, No. 3.

10. Тафт У. К. Карбонатные породы / под ред. Дж. Чилингара, Г. Биссела, Р. Фэйрбриджа. М. : Мир, 1970. Т. 1. 396 с.; Т. 2. 267 с.

11. Карлсон М. Р. Практическое моделирование нефтегазовых пластов. М., Ижевск, 2012. – 941 с.

12. Зубов М. В. Имитационное моделирование систем поддержания пластового давления при технологии дискретных закачек : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.13.18. Тюмень, 2006. 21 с.

13. Экономидес М., Олини Р., Валько П., Экономидес М. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта от теории к практике / пер. с англ.: И. И. Вафин [и др.] ; под ред. А. Г. Загуренко. М.; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2007. 234 с.

14. Darcy Henry. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau..... Paris: V. Dalmont, 1856. VII+647 c.

15. Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media / McGraw – Hill Book Co. Ins., New-Yorc City, 1937. 763 p.

16. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Прикладная математика и механика. 1960. Т. 24, № 5. С. 852–864.

СКВАЖИННОЕ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ В РАЙОНАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ПОРОДАМИ: РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА

П. Л. Павлова*, П. М. Кондрашов

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** ppavlova@sfu-kras.ru*

Рассматривается проблема добычи нефти в районах с многолетнемерзлыми породами, где из-за растепления теряется около 29 % добытого углеводорода. Особое внимание уделяется выпадению асфальтосмолопарафиновых отложений, снижающему дебит скважин. Традиционные методы борьбы, такие как горячая промывка и электрообогрев, не применимы в районах с многолетнемерзлыми породами из-за теплового воздействия. В качестве альтернативы предлагается инновационное устройство, контролирующее тепловые процессы и создающее необходимый тепловой поток на глубинах образования асфальтосмолопарафиновых отложений. Для изучения влияния теплового потока на изменение температуры построена численная модель с помощью программы Ansys Fluent 2021. Планируется разработать опытный образец устройства, что откроет новые возможности для разработки нефтяных и газовых месторождений в районах с многолетнемерзлыми породами, в частности на арктических территориях.

Многолетнемерзлые породы (далее – ММП) занимают около 60 % территории РФ. По некоторым данным, из-за растепления ММП теряется около 29 % добытого углеводорода. Тем не менее именно эти вызовы являются стимулом для разработки инновационных технологий и подходов для минимизации отрицательного воздействия нефтяных и газовых скважин на экосистему многолетнемерзлых пород, в частности арктических территорий [1].

Добыча нефти сопровождается выпадением асфальтосмолопарафиновых отложений (далее – АСПО), что приводит к уменьшению дебита добывающей скважины. Как показывают исследования, в состав АСПО входят высокомолекулярные соединения в виде парафинов, смол, асфальтенов, меркаптанов, металлоорганических соединений. Количество, форма соединений в нефти разнообразна, что вызывает трудности при их изучении, описании процесса, а вследствие этого подборе методов уменьшения и удаления АСПО при добыче нефти.

Можно отметить, что прослеживается связь между фазовыми переходами пластового флюида при отложении АСПО в скважине. В данном случае пластовый флюид необходимо рассматривать как многокомпонентную смесь, где процесс фазового перехода зависит от термобарических условий скважины. В работе [2] показана зависимость давления и температуры при образовании АСПО.

Выпадение АСПО в скважинах наблюдается в глубинах распространения ММП. ММП обычно имеют высоту толщ от 400 до 700 м. Температура данных пород колеблется от –5 до –8 °С.

Многолетнемерзлые породы являются сложной и уникальной средой со своей экосистемой. Как показывает практика, любое тепловое воздействие приводит к их разрушению или растеплению. Поэтому нерациональное обустройство нефтяных месторождений может привести к авариям или образованию термокарстовых озер.

Для решения проблемы выпадения АСПО наибольшее распространение получили горячая промывка и применение электрообогрева скважин, однако их невозможно применить в данных территориях из-за теплового воздействия на ММП, поэтому необ-

© Павлова П. Л., Кондрашов П. М., 2025

ходимы альтернативные инновационные подходы для борьбы с отложениями АСПО, которые учитывают специфические климатические и геологические условия районов с ММП.

Учитывая факторы фазового перехода и молекулярную диффузию как основные механизмы образования АСПО [3; 4], предложено устройство для минимизации их образования в скважине с учетом условий многолетнемерзлых пород. Разработанное скважинное устройство имеет специальную конструкцию, которая позволяет контролировать тепловые процессы и создавать необходимый тепловой поток на глубинах, где происходит образование АСПО ниже интервала залегания ММП. Внутри скважинного устройства предусмотрено увеличение температуры на его внутренних стенках выше значения температуры, при которой происходит выпадение АСПО за счет нагревательных элементов (рис. 1). Следует отметить, что нагрев трубы, в отличие от технологий горячей промывки и греющих кабелей, можно производить локально на требуемом интервале скважины.

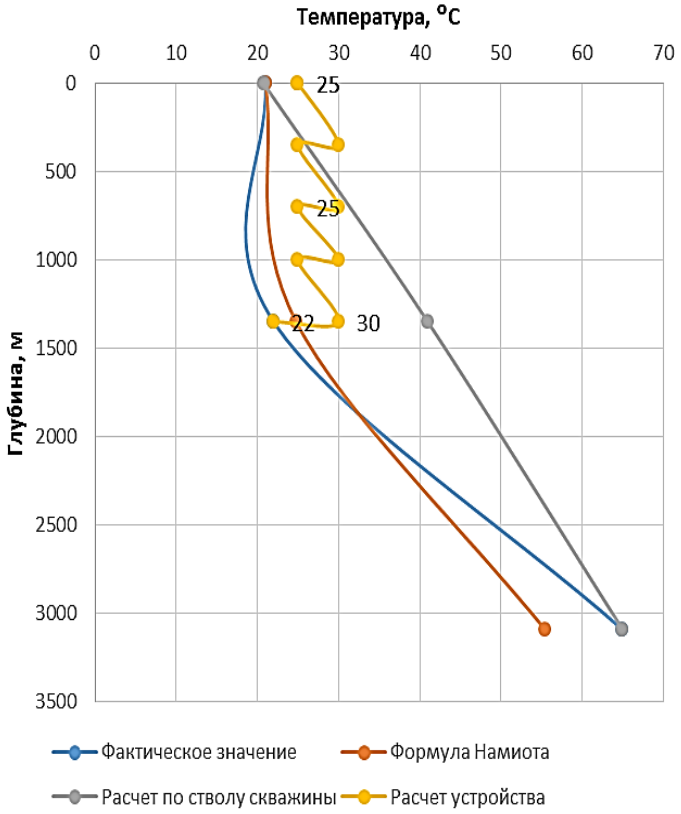


Рис. 1. График изменения температуры

Для изучения влияния теплового потока, генерируемого нагревательным элементом, на изменение температуры вдоль стенки насосно-компрессорной трубы, построена численная модель с помощью программы Ansys Fluent 2021 [5].

В перспективе планируется разработать опытный образец устройства с возможностью управления тепловыми потоками, которые изменят подход и откроют новые возможности и технологии для разработки нефтяных и газовых месторождений в районах с многолетнемерзлыми породами, в частности на арктических территориях. На сегодняшний день разработана концепция данного оборудования с возможностью интеграции в существующие скважины.

Список источников

1. Новиков А. С., Сериков Д. Ю. Особенности технологии бурения скважин в многолетнемерзлых породах // Сфера. Нефть и газ. 2020. № 5. С. 34–35.

2. Ali Syed & Lalji Shaine & Haneef Javed & Khan Muhammad Arqam & Yousufi, Mohsin & Yousaf, Nimra & Saboor, Abdus. (2022). Phenomena, factors of wax deposition and its management strategies. Arabian Journal of Geosciences. 15. 10.1007/s12517-021-09221-6.

3. Sousa Ana & Matos Henrique & Guerreiro L. (2019). Wax deposition mechanisms and the effect of emulsions and carbon dioxide injection on wax deposition: Critical review. Petroleum. 6. 10.1016/j.petlm.2019.09.004.

4. Коробов Г. Ю., Парфенов Д. В. Механизмы образования асфальтосмоло-парафиновых отложений Методики исследования // Neftegaz.RU. 2022. № 8. С. 22–32.

5. Павлова П. Л., Гузей Д. В. Разработка скважинного устройства для управления тепловыми процессами в нефтяных скважинах // Вестник машиностроения. 2022. № 4. С. 9–14.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Д. В. Гузей*, А. В. Минаков, А. А. Гаврилов

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** DGuzey@sfu-kras.ru*

Представлены промежуточные результаты разработки и микрофлюидного тестирования расчетной методики и программного модуля SigmaFlow для моделирования двухфазных несмешивающихся потоков в трехмерных цифровых моделях керна. Проведено систематическое тестирование разрабатываемого программного модуля. Тестирование выполнено на ряде модельных задач конвективно-диффузионного переноса, задачах несмешивающегося течения в микрофлюидных чипах и задачах вытеснения нефти из цифровых моделей керна, полученных с помощью томографии. Проведено сравнение скорости расчетов разрабатываемого программного обеспечения с Ansys Fluent. Показано, что разрабатываемый код в среднем в три раза быстрее.

Огромный практический интерес на сегодняшний день представляют задачи течений несмешивающихся жидкостей в пористых горных средах при добыче нефти и газа [1]. В связи с истощением традиционных запасов углеводородов приходится осваивать месторождения с трудноизвлекаемыми запасами. Это требует разработки новых методов увеличения нефтеотдачи. Для описания течений при многофазной фильтрации в пористых средах широко применяется численное моделирование, которое в данном случае имеет свои особенности, связанные с доминирующей ролью капиллярных сил. В последнее десятилетие в нефтегазовой индустрии активно развивается новое направление – цифровой керн [2].

В данной работе представлены промежуточные результаты разработки и микрофлюидного тестирования расчетной методики и программного модуля для моделирования двухфазных несмешивающихся потоков в трехмерных цифровых моделях керна. Программный модуль разрабатывается авторами работы на основе программного ядра отечественного комплекса CFD программ SigmaFlow [3].

На основе программного ядра SigmaFlow разработана математическая модель описания нестационарного процесса течения несмешивающихся жидкостей в трехмерных цифровых моделях керна с разрешением межфазной границы на основе модели Навье – Стокса для несжимаемой жидкости и метода жидкости в ячейках (Volume of fluid method, VOF) [4] и с учетом сил поверхностного натяжения и эффектов смачивания поверхности. В модель течения несмешивающихся жидкостей добавлена модель переноса примеси, распространяющейся в одной из фаз. Модель включает конвективно-диффузионное уравнение переноса с постоянным коэффициентом эффективной диффузии. Присутствие примеси в объеме несущей фазы приводит к изменению свойств смеси (примесь и несущая фаза) и условий на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей. В текущей версии моделируются три свойства: вязкость несущей жидкости, коэффициент поверхностного натяжения и величина контактного угла.

Проведено систематическое тестирование разрабатываемого программного модуля SigmaFlow. Выполнено большое количество тестовых расчетов многофазных течений в трехмерных структурах с транспортом добавок ПАВ/полимеров/наносуспензий в рамках модели VOF. Тестирование выполнено на ряде модельных задач конвективно-диффузионного переноса, задачах несмешивающегося течения в микрофлюидных чи-

© Гузей Д. В., Минаков А. В., Гаврилов А. А., 2025

пах и задачах вытеснения нефти из цифровых моделей керна, полученных с помощью томографии. Помимо эксперимента, полученные результаты расчетов на разрабатываемом программном обеспечении сопоставлялись с результатами расчетов, проведенных нами на известном коммерческом программном продукте зарубежного производства Ansys Fluent 2021R2, а также с расчетами других авторов.

Проведено тестирование разрабатываемого программного обеспечения для задачи течения двух несмешивающихся жидкостей в Y-микроканале. Сопоставление результатов расчетов проведено с данными лабораторных экспериментов, полученных на микрофлюидном чипе [5], а также с результатами расчетов на Ansys Fluent 2021R2. Показано удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

Для дальнейшего тестирования разрабатываемой расчетной модели рассмотрена задача несмешивающегося течения жидкостей при вытеснении нефти в микрофлюидном чипе, имитирующем трещиноватую структуру. Для сравнения использованы данные собственных микрофлюидных экспериментов. Было показано, что максимальное отличие значения коэффициента вытеснения нефти от экспериментальных значений для различных расходов не превышает 3 %, при сопоставлении с результатами Ansys Fluent расхождение не превышает 4 %. Проведено сравнение скорости расчетов разрабатываемого программного обеспечения с Ansys Fluent. Показано, что разрабатываемый код в среднем в три раза быстрее.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-30022 (https://rscf.ru/project/23-79-30022).

Список источников

1. Fani M., Pourafshary P., Mostaghimi P., Mosavat N. Application of microfluidics in chemical enhanced oil recovery: A review // Fuel. 2022. Vol. 315. 123225.

2. Lazeev A. N., Timashev E. O., Vakhrusheva I. A., Serkin M. F. Digital Core technology development in Rosneft Oil Company // Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2018. Vol. 11. Pp. 18–22.

3. Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Минаков А. В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2010. Вып. 2 (4). С. 117–122.

4. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J Comput Phys. 1981. Vol. 39 (1). Pp. 201–225.

5. Pryazhnikov M., Minakov A., Guzei D., Pryazhnikov A., Yakimov A. Flow Regimes Characteristics of Water-crude Oil in a Rectangular Y-microchannel // J. Appl. Comput. Mech. 2022. Vol. 8 (2). Pp. 655–670.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕОЛОГИИ НЕФТЕВЫТЕСНЯЮЩИХ ФЛЮИДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ

С. Д. Казанина*, Е. Н. Волченко, М. И. Пряжников, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** kazanina2022@gmail.com*

Исследование посвящено повышению нефтеотдачи за счет изменения реологии полимерных растворов на основе полиакриламида путем их модификации наночастицами SiO_2. Было получено, что приготовленные растворы с наночастицами являются устойчивыми. Экспериментально показано, что концентрация и размер наночастиц влияют на поведение реологических параметров полимерных растворов.

В данной работе представлены результаты исследования, посвященного изучению устойчивости и реологии вытесняющих жидкостей для увеличения нефтеотдачи. Рассмотрены водные полимерные композиции на основе полиакриламиа с добавлением наночастиц SiO_2.

Целью данной работы – изучить влияние концентрации наночастиц диоксида кремния и их среднего размера на устойчивость и реологию полимерных растворов. В исследовании в качестве полимера применяли полиакриламид (ЗАО «Москва-Штокхаузен», Россия). Использовались наночастицы SiO_2 (ООО «Бардаханов», Россия) с характерным размером от 18 до 114 нм, а их массовая концентрация составляла 0,5 %.

Анализ коллоидной устойчивости полимерных растворов с наночастицами велся с использованием анализатора MultiScan MS 20. Исследование реологии было проведено с помощью ротационного вискозиметра DVNext.

Получено, что исследуемые полимерные растворы с добавлением наночастиц диоксида кремния разного размера имеют неньютоновскую реологию, с высокой точностью аппроксимируются степенной реологической моделью с индексом поведения течения ниже единицы ($\tau = K_V \dot{\gamma}^n$, где K_V – коэффициент консистенции жидкости; n – индекс поведения течения жидкости).

В результате исследования установлено, что коллоидная устойчивость полимерных растворов на основе полиакриламида зависит от концентрации наночастиц в растворе. Результаты показали высокую устойчивость всех образцов при введении наночастиц, а также выявили зависимость реологических параметров полимерных растворов от размера наночастиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022 (https://rscf.ru/project/23-79-30022).

© Казанина С. Д., Волченко Е. Н., Пряжников М. И., Минаков А. В., 2025

СОРБЕНТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Д. Н. Брицкая*, Е. В. Неупокоева, Г. А. Хименко

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 82
** diana.britskaya@mail.ru*

Применение в промышленной сфере тяжелых нефтепродуктов (в большей степени мазута) оказывает вредное влияние на биосферу, в т. ч. водные поверхности. Часто разливы происходят при транспортировке мазута, который создает пленку на поверхности воды, препятствуя доступу кислорода, света и питательных веществ для водных животных и растений по пути транспортировки. Мазут содержит токсичные вещества, такие как сера, азотистые соединения и тяжелые металлы. Наиболее распространенным методом сбора нефтепродуктов является применение сорбирующих материалов. На базе Института нефти и газа СФУ создан композит для очистки тяжелых нефтепродуктов с поверхности воды с улучшенными характеристиками. Приведены данные исследований композита, свидетельствующие об его эффективности и улучшенных свойств для очистки воды от мазута и тяжелой нефти в различных климатических условиях.

По данным Минприроды, в ближайшее время стоит задача разработать программу устранения последствий разлива мазута в Керченском проливе в связи с повышенной концентрацией нефтепродукта в воде. Мазут может оставаться в морской воде от месяца до нескольких лет, вызывая серьезные экологические последствия, влияющие на биосферу, морскую флору и фауну [1]. Пленки мазута, которые наносят вред окружающей среде, можно удалять различными способами. Наиболее распространенным является способ удаления пленки нефтепродуктов с помощью нефтяных сорбентов пористой структуры [2–3]. Процесс сбора тяжелых нефтепродуктов сорбентами осложняется, так как они имеют вязкую структуру и низкую температуру застывания. В связи с этим уделяется большое внимание изучению свойств сорбентов и улучшению их технических характеристик.

В Сибирском федеральном университете на базе Института нефти и газа был разработан композит (рис. 1) для ликвидации тяжелых нефтепродуктов в водных акваториях на основе карбамидной смолы и полимерных коагуляционных покрытий, сочетающий капиллярно-осмотические сорбционные механизмы и процессы набухания, что позволяет достичь наиболее эффективной очистки водной поверхностей от тяжелых нефтепродуктов, в т. ч. мазута. В качестве покрытий использовались 7–15%-ные растворы полимеров в органическом растворителе. Для обработки могут быть использованы отходы производства синтетического каучука: структурированный и высокопластичный полимер, коагулюм, образующийся при получении латексов и эмульсионных каучуков; крошка каучука [4].

© Брицкая Д. Н., Неупокоева Е. В., Хименко Г. А., 2025

Рис. 1. Действие полученного сорбента при очистке воды от мазута

В результате получены композиты с улучшенными характеристиками плавучести, десорбции, влагоемкости. Свойства полученного композита и сорбента, взятого за прототип, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика сорбентов

Показатель	Значения	
	Композит	Прототип
Сорбционная емкость, г мазута / г сорбента	40–45	40–45
Степень очистки поверхности от мазута при +15 °С, %	90–95	50–60
Степень очистки поверхности от мазута при 0 °С, %	90–95	30–40
Десорбция, г мазута / г сорбента	1–2	7–10
Влагоемкость через 24 ч, г воды / г сорбента	1–2	6–10
Плавучесть, сут.	более 10	5–7
Рабочая температура, °С	от 0 до + 50	от 0 до + 50
Способность к биоразложению сорбента	да	да

Исследования свойств полученных сорбирующих материалов показали, что в результате обработки сорбирующей основы полимерами степень очистки от мазута и тяжелых нефтепродуктов становится значительно выше и не изменяется при понижении температуры до 0 °С. Преимуществом полученных материалов также является размер образующихся гранул, за счет чего уменьшается летучесть полученного композита по сравнению с прототипом, что позволяет эффективно использовать сорбент при порывах ветра, не увеличивая расход сорбирующего материала. демонстрируют двойственное действие, основанное на процессах сорбции и коагуляции. Это делает их более эффективными для очистки водной поверхности от нефти в различных климатических условиях.

Полученный таким образом композит может более 10 дней находиться на воде, собирая тяжелые нефтепродукты, он является нетоксичным и непатогенным материалом, использующимся для ликвидации последствий розливов мазута и других тяжелых нефтепродуктов, тяжелой нефти, не вызывающим нарушения экологического равновесия в экосистемах и не оказывающим вредного воздействия на биотипы различного трофического уровня.

Его можно использовать при очистке как пресных водоемов, так водных объектов, содержащих значительное количество солей.

Сорбирующий материал с нефтепродуктом можно утилизировать, создавая твердое топливо, методом брикетирования, и в последующем использовать его в технике и быту.

Список источников

1. Consequences of the fuel oil spill in the Black Sea [Electronic resource]. Access mode: https://earthtouches.me/articles/2025/01/03/posledstvija-razliva-mazuta-v-chjornom-more.

2. Apulu O. G., Potravny I. M., Sukhorukova I. V. Methods for substantiating and selecting technologies for the reclamation of oil-contaminated lands // Ecology and Industry of Russia, 2021. Vol. 25. No. 6. P. 38–43.

3. Kovaleva M. A., Melkozerov V. M., Bezborodov Yu. N. et al. Cleaning of water surface from oil and oil products in Arctic conditions // Ecology and Industry of Russia. 2024. Vol. 28. No. 11. P. 10–14.

4. Patent 2626207. Composition for a polymer sorbent and a method for producing a sorbent from the composition. IPC B01J20/26, B01J20/30. / Melkozerov V.M.; patent holder Melkozerov V.M. (RF), applicant and VSAOU VO "Siberian Federal University" (RF), No. 2016120749, declared 26.05.2016: published 24.07.2017, Bulletin No. 21.

КАПИЛЛЯРНОЕ ВЫТЕСНЕНИЕ НЕФТИ НАНОЭМУЛЬСИЯМИ

В. А. Жигарев*, А. И. Пряжников,
М. И. Пряжников, А. Д. Скоробогатова, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** VZhigarev@sfu-kras.ru*

Представлены результаты по самопроизвольному вытеснению нефти из модели горной породы наноэмульсиями. Исследовано влияние концентрации эмульгатора на коэффициент вытеснения нефти из керна.

В работе использовались цилиндрические керны диаметром 25 мм, выбуренные из блоков песчаника Berea (Castle Gate, США). Выбуренные керны выдерживали в печи (100 °C) для их полной сушки. Затем проведено измерение геометрических размеров, массы керна, а также определение пористости и проницаемости. После этого керны насыщались сырой нефтью в сатураторе в течение нескольких дней. После насыщения керны повторно взвешивались для оценки порового объема. В экспериментах использовался керн с проницаемостью 440 мД, пористостью 21,3 %, насыщался образцом нефти I с вязкостью 67 мПа·с и плотностью 864 кг/м^3. В экспериментах по капиллярной пропитке использовались различные вытесняющие жидкости. Использовались эмульсии, приготовленные на основе воды с добавлением дизельного топлива с различным содержанием дизельного топлива и эмульгатора PC-501, а также рассматривалась эмульсия с добавлением нефти марки U.

Для исследования влияния капиллярных сил на процесс вытеснения нефти из порового пространства керна проведена серия экспериментов. Эксперимент заключался в следующем: предварительно насыщенный нефтью керн помещался в вытесняющую жидкость. Подробное описание экспериментов приведено в наших работах [1; 2] По прошествии некоторого времени за счет действия капиллярных сил происходит замещение нефти вытесняющих агентов. Проводилось фотографирование процесса спонтанного впитывания и оценка объема вытесненной нефти. Длительность эксперимента составляла 14 дней.

Получено: коэффициент вытеснения нефти водой в результате капиллярной пропитки составил 11 %. Наибольший коэффициент вытеснения нефти наблюдался в эмульсиях на основе дизельного топлива с эмульгатором (ЭМ). Так, коэффициент вытеснения для раствора эмульсии 0,5 % ДТ+ 0,4 ЭМ составил 33 %, а для эмульсии с концентрацией эмульгатора 0,2 % – 27 %.

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

Список источников

1. Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Minakov A. V., Nemtsev I. V. Spontaneous imbibition experiments for enhanced oil recovery with silica nanosols // Capillarity. 2024. Vol. 10 (3). P. 73–86.

2. Zhigarev V. A., Pryazhnikov M. I., Skorobogatova A. D., Pryazhnikov A. I., Minakov A. V., Zharkov S. M. Comparing the effect of nanofluids in capillary imbibition with traditional displacing fluids // Pet. Res., 2025.

© Жигарев В. А., Пряжников А. И., Пряжников М. И., Скоробогатова А. Д., Минаков А. В., 2025

Секция 6
Математическое моделирование в теплофизике и энергетике

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ

А. А. Гаврилов

Красноярский филиал Института теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630036, Российская Федерация, Красноярск, ул. ак. Киренского, д. 50/44
** gavand@yandex.ru*

Представлены результаты численного моделирования методом крупных вихрей турбулентного течения неньютоновской жидкости со степенным реологическим законом в кольцевом канале с вращением внутреннего цилиндра. Предложены аппроксимации, необходимые для построения статистической модели турбулентности с дифференциальными уравнениями переноса рейнольдсовых напряжений. Построенные замыкания сравниваются с данными, полученными в результате вихреразрешающего численного моделирования.

Важный класс неньютоновских жидкостей представляют так называемые степенные псевдопластические жидкости, эффективная вязкость которых снижается с ростом скорости деформации степенным образом: $\mu = k_v \dot{\gamma}^{n-1}$, где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, k_v – показатель консистентности, n – показатель степени жидкости. Турбулентные течения таких сред встречаются во многих приложениях. Наиболее экономичный и обладающий высокой точностью вариант моделирования сложных турбулентных течений – использование статистической модели турбулентности из класса моделей переноса рейнольдсовых напряжений [1]. При построении моделей турбулентности неньютоновских жидкостей для замыкания уравнений переноса необходимо сформулировать модель для осредненной эффективной вязкости и замыкания для корреляций эффективной вязкости и кинематических параметров течения [2].

Течение в кольцевом канале является отличным объектом для получения детальных данных о турбулентных характеристиках течения, а также для адаптации и тестирования статистических моделей турбулентности для неньютоновских жидкостей [3]. В настоящей работе с помощью метода крупных вихрей численно исследуется течение в кольцевом канале с вращением внутреннего цилиндра неньютоновской жидкости со степенным реологическим законом при аксиальном числе Re = 10 000. Вращение внутреннего цилиндра задается безразмерным кинематическим параметром N, равным отношению линейной скорости вращения на поверхности цилиндра к среднеобъемной аксиальной скорости. Для моделирования выбрано три жидкости с разными значениями показателя степени жидкости n = 1,0; 0,8 и 0,6. Для каждой жидкости рассмотрено четыре режима спирального течения N = 0; 0,2; 0,5 и 1,0.

Моделирование выполняется в рамках подхода модели крупных вихрей (LES). В качестве модели для замыкания подсеточных напряжений используется динамическая модель Германо – Лилли. Моделирование выполнено для участка канала в периодической вдоль течения постановке.

В результате сбора статистики получены радиальные распределения моментов скорости жидкости и корреляции флуктуирующей вязкости с кинематическими параметрами. Уравнение Рейнольдса для неньютоновской жидкости содержит дополнительное слагаемое – тензор неньютоновских турбулентных напряжений [2]:

$$\tau_N = 2\langle \mu' \mathbf{S}' \rangle,$$

© Гаврилов А. А., 2025

где $\boldsymbol{S}$ – тензор скоростей деформации, штрих обозначает пульсационную составляющую, треугольные скобки – операция осреднения по Рейнольдсу. В уравнении переноса рейнольдсовых напряжений появляются дополнительные члены, описывающие работу неньютоновских напряжений и турбулентную диффузию за счет пульсаций вязкости.

Предложены новые замыкания для осредненной эффективной вязкости, неньютоновского турбулентного тензора и неньютоновской турбулентной диффузии. Показано хорошее согласование аппроксимаций с результатами LES-моделирования (рис. 1).

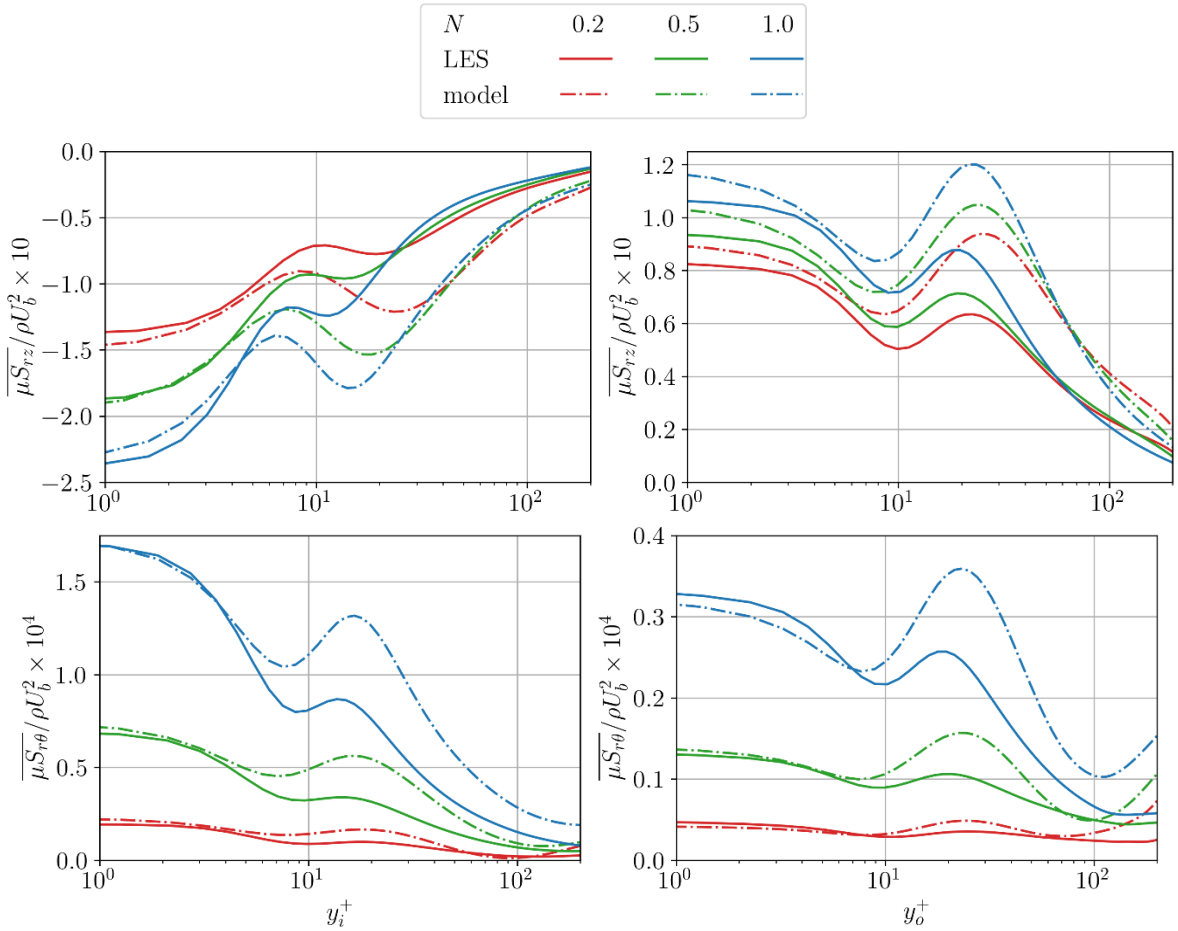


Рис. 1. Радиальные распределения нормированных компонент тензора неньютоновских турбулентных напряжений для жидкости с n = 0,6. Модельная аппроксимация – model, статистика результатов вихреразрешающего расчета – LES

Получена статистическая информация, необходимая для замыкания статистических моделей турбулентности для неньютоновских жидкостей. Построены новые замыкания для неньютоновских слагаемых в статистической модели Полученные аппроксимации будут использованы для построения модели турбулентности неньютоновских жидкостей с дифференциальными уравнениями переноса рейнольдсовых напряжений.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800215-4.

Список источников

1. Gavrilov A., Ignatenko Y. Numerical Simulation of Taylor – Couette – Poiseuille Flow at Re = 10,000. Fluids 2023. V. 8. 280 p.

2. Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids // J. Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2016. V. 227. P. 45–55

3. Ignatenko Ya., Gavrilov A., Bocharov O. B., Aragall R. Turbulent spiral flow of power-law fluid in annular channel // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2025. V. 109. P. 354–366.

ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА АЭРОДИНАМИКУ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

А. В. Сентябов[1*], А. А. Дектерев[1, 2], Ар. А. Дектерев[1], С. А. Филимонов[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** Sentyabov_a_v@mail.ru.ru*

В исследовании рассмотрено численное моделирование аэродинамики при работе циклического ротора в условиях бокового (вдоль оси ротора) набегающего потока. Модель основывалась на дискретизации уравнений Рейнольдса методом контрольного объема на неструктурированной сетке из гексаэдральных ячеек с применением метода скользящих сеток. Результаты расчетов показали, что по мере роста скорости набегающего потока и тяга, и потребляемая мощность циклического движителя падают.

Циклический ротор состоит из нескольких лопастей, которые совершают вращательное движение вокруг оси ротора и дополнительно колебательное движение вокруг своей оси, так что лопасти испытывают положительные углы атаки как в верхнем, так и нижнем положении цикла. Такой ротор может применяться в качестве как движителя для воздушных аппаратов и судов, так и вертикальной ветровой турбины [1]. Его преимущество в том, что изменение амплитуды и фазы циклического шага лопасти может использоваться для изменения величины и направления вектора тяги, создаваемого ротором. Поскольку вектор тяги циклоидального ротора может быть установлен практически мгновенно в любом направлении, перпендикулярном оси вращения, транспортные средства на основе циклоидального ротора могут демонстрировать лучшую маневренность. В частности, проблема маневрирования во время посадки является одной из ключевых в практическом применении дирижаблей. В этом и некоторых других случаях необходимо знать, как поменяются аэродинамические характеристики циклоидального ротора при боковом набегающем потоке (со стороны торцов ротора).

Данный вопрос ранее практически не исследовался, поэтому в настоящей работе было проведено численное моделирование аэродинамики циклоидального ротора при различных скоростях набегающего бокового потока. Ротор был помещен в центр расчетной области, которая представляла собой цилиндр размером 40 диаметров ротора и 7 длин лопастей. На торцевых границах расчетной области (торцы цилиндра) задавался постоянный вектор скорости бокового ветра. На боковой границе (перпендикулярной плоскости вращения) задавалось постоянное давление. Вращение движителя относительно остальной части расчетной области и лопастей относительно движителя реализовывалось с помощью подхода скользящих сеток. На границах вращающихся подобластей создавался сеточный интерфейс для обмена информацией с неподвижными частями расчетной области. Шаг по времени соответствовал повороту движителя примерно на 3°. Вращение лопастей осуществлялось с помощью функций UDF, которые реализовывали алгоритм кинематической схемы. Применялась неструктурированная расчетная сетка, которая состояла из 887 тыс. гексаэдральных ячеек и была сгущена к поверхностям лопастей и к торцевым дискам, так что на лопастях $0{,}5 < y_+ < 25$ в зависимости от фазы обтекания, а на торцевых дисках $10 < y_+ < 500$. Турбулентность моде-

© Сентябов А. В., Дектерев А. А., Дектерев Ар. А., Филимонов С. А., 2025

лировалась с помощью двухпараметрической модели k-ω SST. Дискретизация уравнений переноса по пространству осуществлялась методом конечных объемов.

Результаты расчетов параметров ротора в условиях бокового ветра приведены в табл. 1. Потребная мощность вычислялась приближенно, исходя из момента на роторе. Как показали расчеты, при умеренных скоростях бокового ветра вектор тяги не изменяет своего направления, однако при скорости ветра $V/(\omega R) = 0{,}96$ наблюдается уже значительное отклонение вектора тяги (около 30 %). По мере роста скорости бокового ветра параметры работы ротора ухудшаются. С ростом скорости набегающего потока тяга и потребляемая мощность падают. В качестве порогового значения скорости ветра можно принять значение $V/(\omega R) = 0{,}3$. Связано это, по-видимому, с образованием крупномасштабных вихрей в области ротора (рис. 1).

Таблица 1

Параметры ротора в зависимости от скорости бокового ветра

V/(ωR)	*Тяга, F/F_0*	*Мощность, P/P_0*	*V/(ωR)*	*Тяга, F/F0*	*Мощность, P/P0*
0	1,00	1,00	0,32	0,94	1,01
0,032	1,00	1,00	0,48	0,81	0,87
0,064	1,00	1,00	0,96	0,76	0,78
0,16	0,97	1,00			

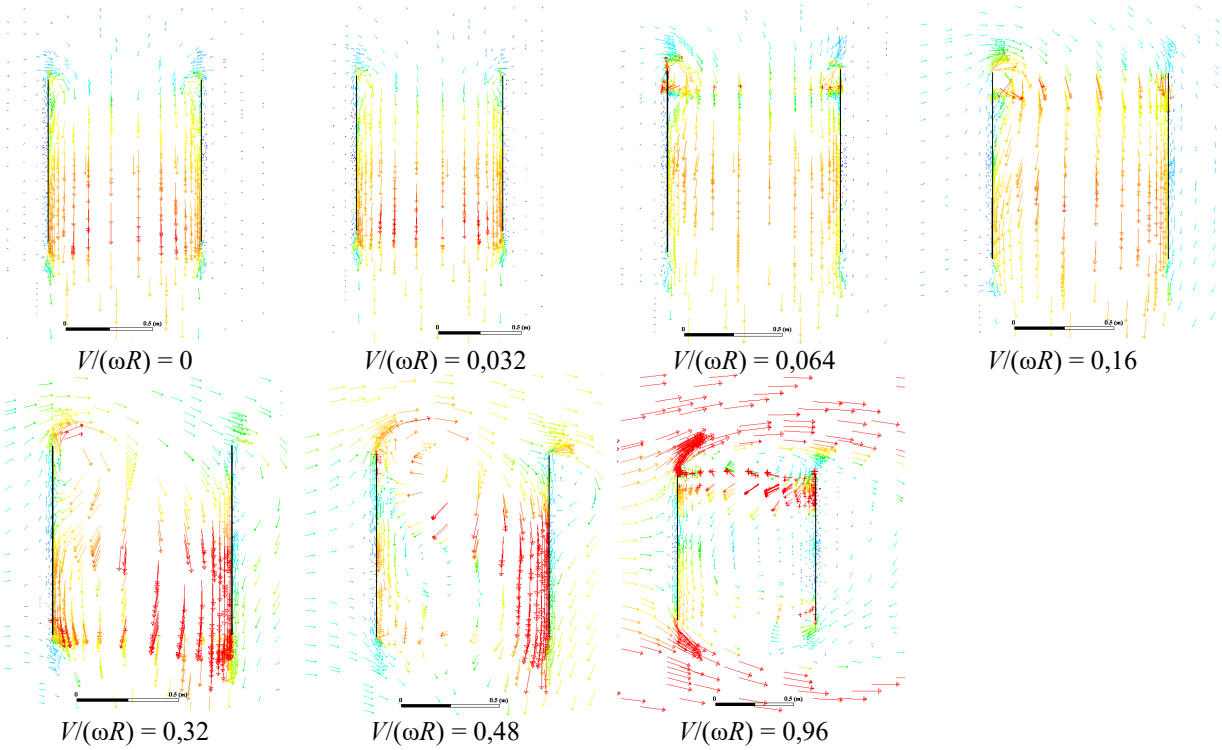


Рис. 1. Поле скорости в плоскости оси ротора

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 124062400029-2.

Список источников

1. Dekterev D. A., Dekterev A. A., Lobasov A. S., Platonov D. V., Sentyabov A. V. Simulation of orthogonal rotors with dynamic pitching blades // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1382. P. 012129. DOI 10.1088/1742-6596/1382/1/012129

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО В КОНВЕКТИВНЫЙ СЛОЙ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

С. А. Филимонов[1], А. А. Гаврилов[1], К. Ю. Литвинцев[1], П. Г. Фрик[2], А. Н. Сухановский[2], А. Ю. Васильев[2]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Институт механики сплошных сред УО РАН
614013, Российская Федерация, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
** bdk@inbox.ru*

В работе представлены результаты численного моделирования двухмерных горизонтальных блужданий диска, плавающего в заполненной водой кювете квадратного сечения на некотором расстоянии от дна. Дно кюветы имеет фиксированную температуру, выше температуры окружающей среды. В кювете возникают естественно-конвективные потоки, под действием которых диск совершает сложные движения в выделенном горизонтальном сечении. Сравнение траекторий диска и полей дивергенции/конвергенции в различных горизонтальных сечениях, полученных в результате численного и физического моделирования, показало хорошее совпадение. Расчеты позволили выявить влияние диска на характер конвективных движений и теплоперенос, сравнить интегральные характеристики системы со значениями, получаемыми при конвекции в отсутствие диска, т. е. в конвекции Релея – Бенара.

В работе представлены результаты численного моделирования двухмерных (в горизонтальной плоскости) блужданий диска, плавающего в заполненной водой кювете квадратного сечения на некотором расстоянии от дна. Геометрия задачи представлена на рис. 1, *а*.

В расчетах параметры задачи брались из эксперимента [1]: $L = 258$ мм, $H = 30$ мм, $D = 123$ мм, $\delta = 1$ мм, положение диска относительно дна задавалась равным $h = 3$ мм. Температура дна $T_b = 35$ °C, на верхней грани заданы граничные условия третьего рода: температура окружающей среды $T_\infty = 20$ °C и коэффициент теплоотдачи $\alpha = 50$ Вт/(м2К), начальное значение температуры верхней грани (и всей расчетной области) задано равным $T_H = T_0 = 34$ °C. Число Релея $\mathrm{Ra} = 1{,}1 \cdot 10^6$.

Считается, что теплофизические свойства воды не зависят от температуры. Теплофизические свойства диска приняты следующими: $\rho = 1300$ кг/м^3 и теплоемкость $\lambda = 0.38$ Дж/(м · К). В начальный момент времени пластина расположена в центре кюветы ($x_c = 0$ и $y_c = 0$).

Численное моделирование нестационарной естественной конвекции в полости со свободно плавающим телом внутри объема жидкости реализовано в программном комплексе SigmaFlow [2]. Система уравнений, описывает конвективное течение ньютоновской несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Для расчета использовалась неструктурированная шестиугольная сетка, разделенная на две области. В области движения диска (в 10 мм от нижней границы) шаг сетки составлял 0,5 мм, а в остальной части кюветы – 1 мм. В общей сложности размер сетки составил 6,6 млн ячеек. Шаг интегрирования по времени был постоянным равным 0,1 с. Время счета составляло не менее 18 000 с физического времени.

На рис. 1, *б*, *в*, представлены траектории движения центра диска, полученные в результате эксперимента и расчета соответственно. Маркеры выполнены прозрачными: чем дольше и чаще диск проходит через одну и ту же точку, тем темнее область

© Филимонов С. А., Гаврилов А. А., Литвинцев К. Ю., Фрик П. Г., Сухановский А. Н., Васильев А. Ю., 2025

маркеров. Как видно из рисунков, и в эксперименте, и в расчетах большую часть времени диск стоит в одном из углов кюветы, а перемещения происходят в основном вдоль стенки. Однако диск иногда срезает углы и двигается почти по диагонали кюветы. В расчете это происходит несколько чаще, чем в эксперименте.

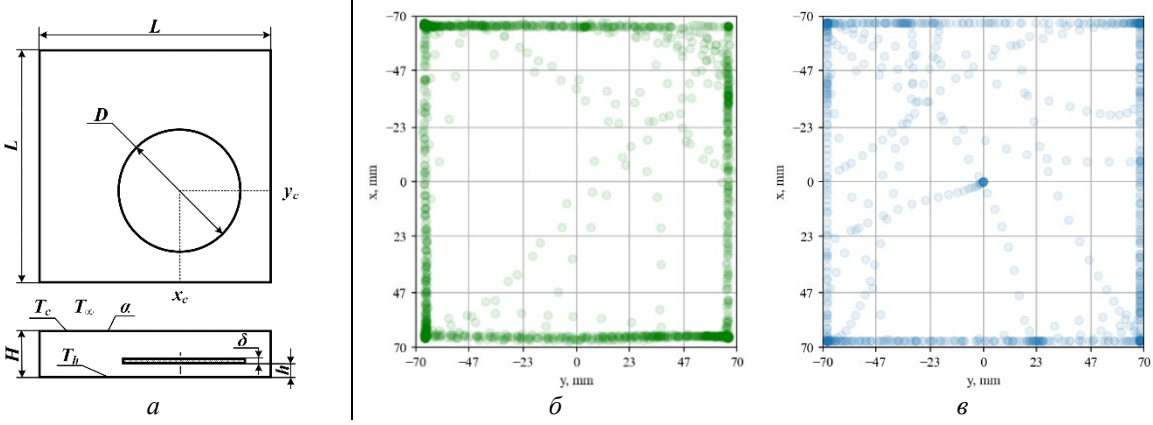


Рис. 1. Постановка задачи (*а*), траектория движения центра диска, полученная в физическом эксперименте (*б*) и численном моделировании (*в*)

На рис. 2 показано осредненное поле дивергенции/конвергенции в горизонтальном сечении $0{,}27H$, на небольшом расстоянии от поверхности диска. В эксперименте это поле было получено на основе измерений полей скорости методом PIV. Видно, что результат расчета (рис. 2, *б*) качественно совпадает с экспериментальными измерениями (рис. 2, *а*). Осредненный поток в сечении выстраивается в четкую «четырехлистную» структуру: поток расходится из центра к углам кюветы.

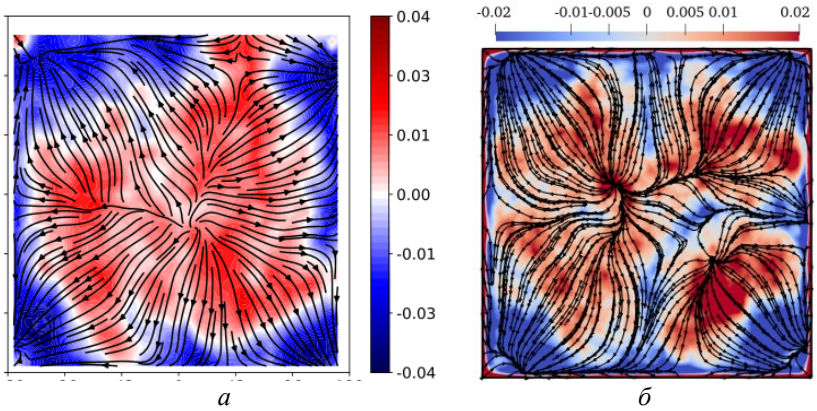


Рис. 2. Поле дивергенции/конвергенции в горизонтальном сечении 0,27H: *а* – эксперимент; *б* – расчет

В табл. 1 представлены значения плотности общего теплового потока в системе, вклады различных механизмов переноса тепла (средний конвективный поток – q_m, пульсационный конвективный поток – q_p и диффузионный перенос – q_d) и интегральные параметры системы для двух вариантов: без диска (конвекция Релея – Бенара, РБ) и с диском (Диск). Из таблицы видно, что при близких значениях общих интегральных параметров в случае с диском влияние пульсационного механизма переноса тепла возрастает.

Таблица 1

Интегральные параметры расчета для двух вариантов

Вариант	q, Вт/м^2	q_m%	q_p%	q_d%	Nu	Re
РБ	308.8	16.8	74.2	9	7.9	49.5
Диск	376.5	8.1	82.2	9.7	7.4	48.4

Результаты численного моделирования качественно и количественно совпадают с результатами физического эксперимента, что показывает адекватность разработанной математический модели. Численное исследование показало, что наличие диска повышает пульсационную составляющую переноса тепла и демпфирует средний конвективный тепловой поток.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098 (https://rscf.ru/project/22-61-00098).

Список источников

1. Frick P. et al. A random 2D walk of a submerged free-floating disc in a convective layer // Phys. D Nonlinear Phenom. 2023. Vol. 455. P. 133882.

2. Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Минаков А. В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии : сб. ст. 2010. Т. 4, № 2. С. 117–122.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА VOF ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ВИАЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ВСТРЯХИВАНИЯ

Ар. А. Дектерев*, А. А. Дектерев

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** dek_art@mail.ru*

В работе выполнено численное исследование перемешивания жидкостей в виалах. Рассматривались два типа воздействия на виалу – применение ротационного встряхивателя и ручное встряхивание. Расчеты проводились для двух вариантов допущения о начальном распределении вещества – в виде плоского слоя на поверхности воды и в виде сферической капли в центре объема воды. Получены картины распределения фаз, концентрации вещества, скорости и давления от времени процесса.

В фармацевтике – при исследованиях или производстве лекарственных средств – существует необходимость перемешивания различных компонентов в виалах, зачастую для этого используют ротационные встряхиватели. Ротационные встряхиватели широко применяют при производстве лекарств в соответствии с биофармацевтическими требованиями, которые могут варьироваться от простого смешивания различных компонентов [1; 2] и аэрации до обеспечения определенных уровней напряжений сдвига для ускорения деградации белка [3]. Кроме перемешивания на ротационном встряхивателе, могут применяться и другие способы воздействия, в т. ч. ручное встряхивание.

Исследование подобных процессов, наряду с экспериментальными методами, проводится с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD). В последние десятилетия эти методы зарекомендовали себя как надежный инструмент исследования широкого класса многофазных и многокомпонентных течений со сложной структурой потока. В сравнении с экспериментальными методами, CFD-моделирование при наименьших финансовых и временных ресурсах позволяет получить наиболее полную информацию об исследуемых процессах

В настоящем исследовании рассматривается процесс перемешивания 10 мл водного раствора в виале объемом 20 мл при использовании двух способов. Первый способ – применение ротационного встряхивателя IKA MS 3 basic в течение 10 с. Ротационный встряхиватель совершает колебательные движения стола по круговой орбите диаметром 4,5 мм, с частотой 3000 об/мин (рис. 1, *а*). В модели было сделано допущение, что виала плоско стоит на ротационном столе и совершает движение по орбите вместе со столом. Второй способ – ручное встряхивание в течение 5 с, за это время виала совершает 20 колебательных движений по дуге с высотой подъема 7,1 см (рис. 1, *б*).

Модель основана на численном решении уравнений Навье – Стокса. В качестве подхода к моделированию турбулентности выбран зарекомендовавший себя метод крупных вихрей (LES) с моделью подсеточной вязкости WALE. Для моделирования границы раздела фаз жидкость – воздух применяется метод Volume of Fluid (VOF). Для расчета распределения концентрации вещества в воде жидкая фаза рассматривается двухкомпонентной. Соответственно, решаются уравнения переноса компонентов. Для моделирования движения виалы используется метод подвижных сеток.

В ходе работы для обоих типов движения виалы, проведено моделирование процесса перемешивания для двух вариантов допущения о начальном распределении концентрации вещества – в виде плоского слоя в верхней части объема воды и в виде сфе-

© Дектерев Ар. А., Дектерев А. А., 2025

рической капли в центре объема воды. Получены картины распределения фаз, концентрации вещества, скорости и давления от времени процесса.

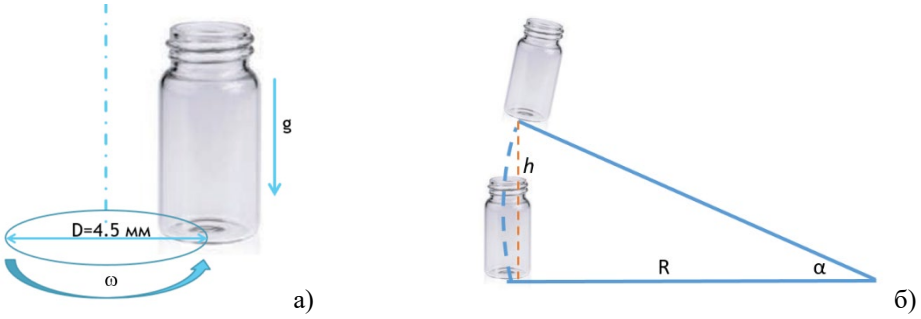


Рис. 1. Схемы движения виалы:
а – ротационный встряхиватель; *б* – ручное встряхивание

Результаты расчетов показали, что при перемешивании на ротационном встряхивателе на начальном этапе процесса происходит резкое перестроение структуры распределения фаз, формирование воздушного ядра в центре и кольцевого течения воды возле стенок по высоте всей виалы, далее подобное квазиустановившееся-периодическое течение сохраняется на всем протяжении процесса вплоть до остановки виалы (рис. 2). Анализ структуры течения показывает наличие вихрей в кольцевом зазоре воды, так как процесс колебательный, то локализация вихревых структур динамически изменяется.

При ручном встряхивании не формируется устойчивого течения, движение жидкости в виале носит хаотический характер. В момент смены направления движения поверхность раздела фаз существенно искажается, образуются отдельные капли, происходит интенсивное перемешивание (рис. 3).

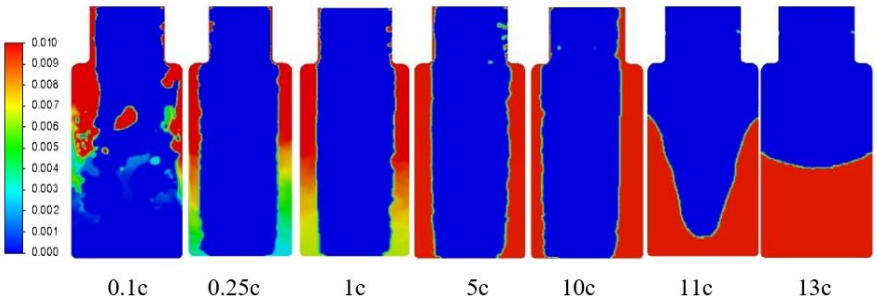


Рис. 2. Картины распределения концентрации вещества с течением времени при перемешивании на ротационном встряхивателе

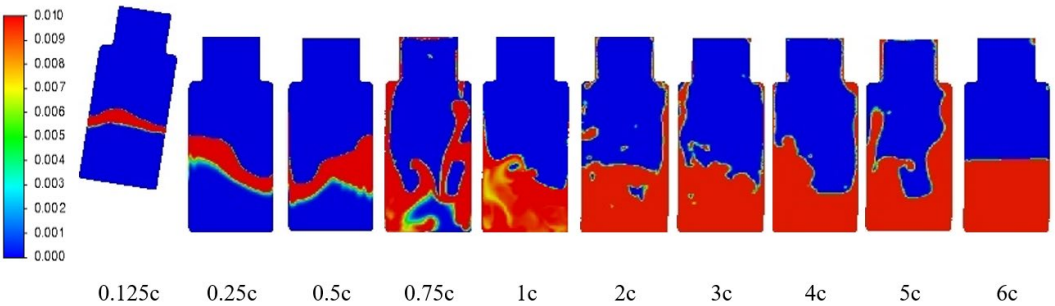


Рис. 3. Картины распределения концентрации вещества с течением времени при ручном встряхивании

Анализ диссипации энергии позволил выполнить оценку нагрева раствора за время процесса. Выполнено сравнение эффективности различных способов перемешивания. Разработанная методика может быть использована для оптимизации процесса перемешивания.

Список источников

1. Alpresa P., Sherwin S., Weinberg P., van Reeuwijka M. // Orbitally shaken shallow fluid layers. I. Regime classification. Physics of fluids. 2018. 30. 032107.

2. Tissot S., Farhat M., Hacker D. L., Anderlei T., K¨uhner M., Comninellis C., F. // Determination of a scale-up factor from mixing time studies in orbitally shaken bioreactors. Biochem. Eng. 2010. J. 52. P. 181–186.

3. Bai G., Bee J. S., Biddlecombe J. G., Chen Q., Leach W. T. // Computational fluid dynamics (CFD) insights into agitation stress methods in biopharmaceutical development. Int. J. Pharm. 2012. 423, 264–280.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНОГО МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ

Ар. А. Дектерев*, А. А. Дектерев

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** dek_art@mail.ru*

В ходе исследования разработана математическая модель для расчета метано-водородных пламен, включающая современные физико-химические подмодели пространственной аэродинамики, сложного теплообмена и турбулентного горения. При этом модели являются относительно экономичными к вычислительным ресурсам, что позволяет при использовании современных вычислительных систем за приемлемое время получать результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Горение водорода и метано-водородных смесей отличается высокой скоростью распространения пламени и более высоким тепловыделением относительно хорошо изученного горения метанового топлива. Использование водорода в топливе сопровождается рядом преимуществ. Добавление водорода в топливно-воздушную смесь позволяет увеличить границу устойчивой работы двигателя. Как известно, сжигание более «бедных» смесей приводит к уменьшению эмиссии вредных веществ. С другой стороны, для других режимов организации горения добавление водорода приводит к возрастанию температуры во фронте пламени и скорости его распространения, что приводит к повышенным выбросам оксидов азота NOx и может привести к прогару элементов двигателя.

Для расчета турбулентных углеводородных пламен требуется комплексная численная методика, аккуратно учитывающая турбулентность, сложный теплообмен, в т. ч. радиационный, включающая модель горения с детальными кинетическими механизмами и адекватным учетом взаимодействия термохимических процессов с турбулентностью.

В работе тестирование механизмов реагирования и моделей турбулентного горения выполнялось на задаче струйного диффузионного горения метано-водородной смеси. Использовались измерения, выполненные в DLR (немецкий центр аэрокосмических исследований и технологий) [1; 2]. Горелка состоит из прямой трубки из нержавеющей стали длиной 350 мм (внутренний диаметр 8 мм) с утонченным ободком на выходе. Трубка окружена контурным соплом (внутренний диаметр 140 мм), снабжающим нижнюю часть пламени сопутствующим сухим воздухом со скоростью 0,3 м/с. В качестве топлива использовалась смесь 33,2 % H2, 22,1 % CH4 и 44,7 % N2 (по объему). Скорость струи топлива составила 42,15 м/с, что соответствует числу Рейнольдса Re = 15 200.

В ходе расчетов были рассмотрены следующие кинетические механизмы: детальный механизм GRI 3.0; механизм RMech1, разработанный в Институте химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского [3]; скелетный механизм skeletal25, предложенный T. Peeters [4]. Моделирование выполнялось с применением моделей горения Eddy dissipation concept (EDC) и Flamelet generated manifolds (FGM). В качестве модели турбулентности использовалась двухпараметрическая модель *k-eps* с модифицированными коэффициентами.

Расчеты выполнялись в двухмерной осесимметричной постановке. Область для расчетов имела размеры 400 × 1000 мм. Структурированная расчетная состояла из 90

© Дектерев Ар. А., Дектерев А. А., 2025

разбиений по ширине расчетной области и 600 по длине, с локальным сгущением к области сопла. Профиль скорости и турбулентные характеристики для входа топлива задавались на основе предварительного расчета течения в трубке.

На рис. 1 представлено поле температуры, рассчитанное по модели FGM с механизмом реагирования RMech1.

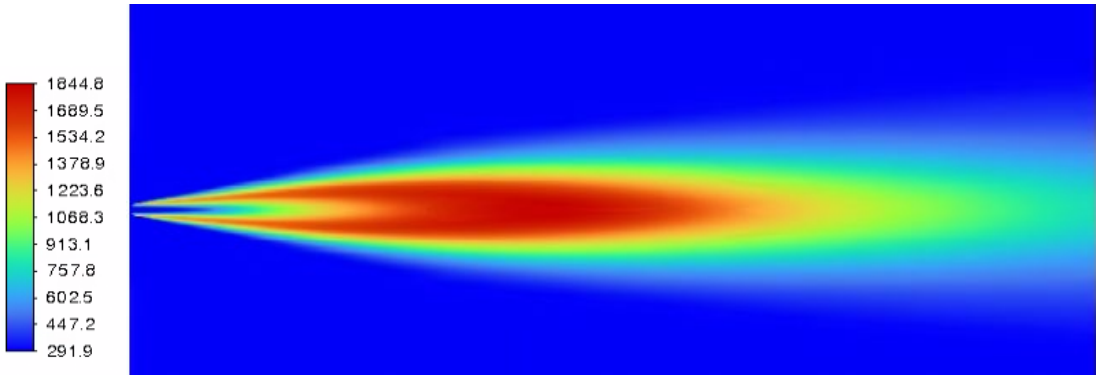


Рис. 1. Поле температуры (K), FGM+RMech1

Сравнение результатов расчетов (рис. 2) с экспериментальными данными показало, что качественно все модели реагирования и кинетические механизмы дают близкие значения. Однако модель EDC дает завышенную температуру, хуже согласуются концентрации O_2, CO_2, с другой стороны, чуть ближе к эксперименту значения H_2O и CO. Результаты FGM для различных механизмов близки как по температуре, так и по большинству компонент. Стоит отметить, что механизм RMech1 дает наилучшие значения по распределению CO_2 и в целом он ближе по результатам к детальному механизму GRI3, чем скелетный механизм skeletal25.

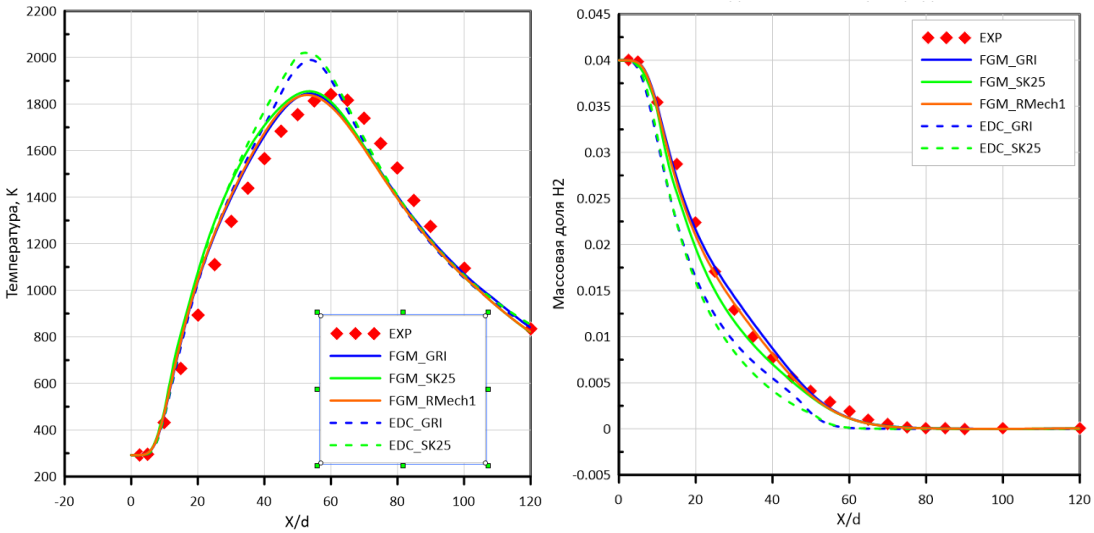


Рис. 2. Осевое распределение температуры (K) и массовой доли H_2

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

Список источников

1. Bergmann V., Meier W., Wolff D., Stricker W. Appl. Phys. B 66:489 (1998).

2. Meier W., Barlow R. S., Chen Y.-L., Chen J.-Y. Combust. Flame 123:326-343 (2000).

3. Gerasimov I. E., Bolshova T. A., Osipova K. N., Dmitriev A. M., Knyazkov D. A., Shmakov A. G. Flame Structure at Elevated Pressure Values and Reduced Reaction Mechanisms for the Combustion of CH4/H2 Mixtures // Energies. 2023. V. 16. P. 7489. URL: https://doi.org/10.3390/en16227489.

4. Peeters T. Numerical modeling of turbulent natural-gas diffusion flames // [Ph.D. thesis] TU Delft, Delft, The Netherlands (1995).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЕРДЫМИ НЕРАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Д. В. Антонов[1, 2*], П. А. Стрижак[1, 2], С. С. Сажин[1, 2, 3]

[1]Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Advanced Engineering Centre, School of Architecture, Technology and Engineering, University of Brighton, Brighton, BN2 4GJ, UK
** antonovdv132@gmail.com*

Представлены результаты разномасштабных теоретических исследований характеристик прогрева и испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями. Изучена эволюция радиусов капель и их температуры при испарении в разогретой газовой среде. Показано, что при увеличении относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей в составе капель воды скорость их испарения возрастает по степенному закону. Установлено, что при относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей до 8 % в составе капель воды, их радиусов от 10 до 100 мкм и температуры газовой среды от 500 до 1100 К время их выпаривания изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,36 с, что соответствует условиям распыления технологических и сточных вод в нагревательных камерах.

Современной проблемой мирового масштаба является недостаток чистой питьевой воды [1]. Очистка технологических и сточных вод, как правило, реализуется в несколько этапов: многоступенчатая фильтрация [2], химическая нейтрализация примесей [3], термическое (высокотемпературное) воздействие [4]. Термические методы очистки включают выпаривание (концентрирование примесей), сушку (распыление жидкости в среде горячего воздуха или дымовых газов), термическое окисление (выжигание горючих примесей). В настоящее время термическую очистку применяют для обезвреживания сточных вод с малыми относительными массовыми концентрациями твердых нерастворимых примесей (до 8 %) [5]. В рамках данной работы проанализированы характерные времена выпаривания примесей в условиях распыления технологических и сточных вод в нагревательных камерах.

С использованием верифицированной при сравнении с экспериментальными данными модели тепломассопереноса исследованы характеристики прогрева и испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями, физическая модель которых показана ни рис. 1.

В качестве твердых нерастворимых примесей рассмотрены: угольные частицы, диспергированная древесина, Fe, Al, Al_2O_3, глина, шлам, твердый остаток от сжигания натурального топлива, полиамид (типичный полимер). Твердые примеси, диспергированные в испаряющейся жидкости (воде), принимались во внимание как неиспаряющиеся составные части неоднородной капли. Эффекты седиментации и агломерации учитываются при решении уравнений переноса. Химические эффекты, связанные со взаимодействием активных металлов и воды, рассматриваются в соответствии с уравнениями химической кинетики. Предполагается, что капли имеют сферическую либо несферическую форму.

© Антонов Д. В., Стрижак П. А., Сажин С. С., 2025

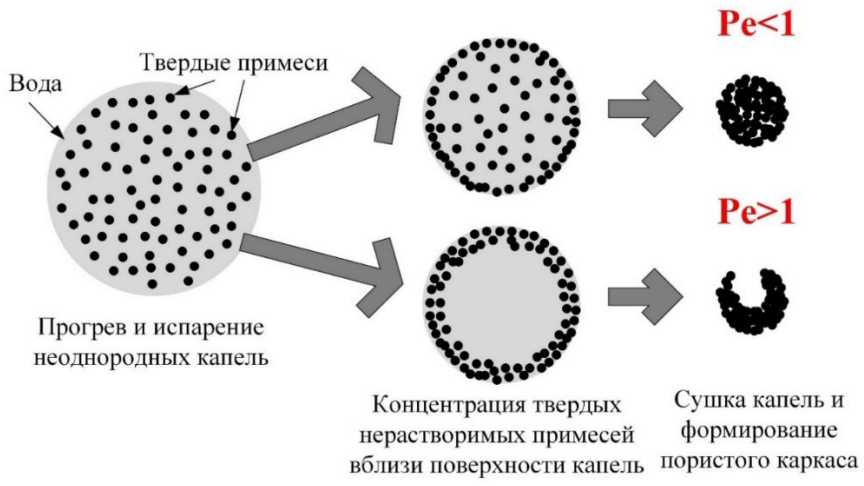


Рис. 1. Физические модели прогрева и испарения капель воды
с твердыми нерастворимыми примесями

На первом этапе капля монотонно прогревается и испаряется. При наличии в составе примесей активных металлов протекают химические реакции с образованием щелочей. Под действием преимущественно гравитации и внутренней конвекции происходит седиментация и агломерация частиц. На начальном этапе принималось гомогенное распределение частиц по объему. На втором этапе вблизи поверхности капель росла концентрация твердых нерастворимых примесей и снижалась доля воды, а также вследствие массопереноса большая доля твердых примесей оседала и концентрировалась в нижней части капли. На третьем этапе процесс прогрева неоднородной капли заканчивался сушкой капли и образованием пористого или сплошного каркаса. Далее в некоторых случаях в результате перегрева легкокипящей жидкости происходила фрагментация при достижении соответствующих критических условий. Характерные времена выпаривания неоднородных капель при относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей в них до 8 %, их радиусов от 10 до 100 мкм и температуры газовой среды от 500 до 1100 К составляли от 0,1 до 0,36 с, что соответствует условиям распыления технологических и сточных вод в нагревательных камерах.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2024-620.

Список источников

1. Химия воды и микробиология / Т. А. Карюхина, И. Н. Чурбанова. М. : Стройиздат, 1983. 123 с.

2. Кац Э. М., Никашина В. А., Бычкова Я. В. Сорбция тяжелых металлов ni, cd, cr, zn, cu из поверхностной воды на природном и модифицированном клиноптилолитах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. № 13 (6). С. 808–815.

3. Duaa G., Zahraa R., Emad Y. A Review of Organotin Compounds: Chemistry andApplications // Archives of Organic and Inorganic Chemical Sciences. 2018. N 3 (3). P. 344–352.

4. Kizgin A., Schmidt D., Joss A., Hollender J., Morgenroth E., Kienle C., Langer M. Application of biological early warning systems in wastewater treatment plants: Introducing a promising approach to monitor changing wastewater composition // J. Environ. Manage. 2023. N 347. P. 119001.

5. Balaram V., Copia L., Kumar U. S., Miller J., Chidambaram S. Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management – A comprehensive review // Geosystems Geoenvironment. 2023. N 2 (4). P. 100210.

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ RANS-МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МАСЛООХЛАДИТЕЛЯ

А. Р. Шигапова

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
426069, Российская Федерация, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7
** aigulka1806@mail.ru*

Рассматриваются вопросы математического моделирования аэродинамики единичной секции маслоохладителя. Проведен анализ влияния RANS-моделей турбулентности на структуру потока воздуха в каналах единичной секции и за секцией. Проведено сравнение численных и экспериментальных распределений избыточного давления на выходе из единичной секции, обеспечивающее качественное согласование между расчетными и экспериментальными данными.

Повышение требований к долговечности и безотказности промышленного оборудования приводит к необходимости увеличения мощности систем охлаждения рабочих сред, в т. ч. теплообменного оборудования. Одним из распространенных видов малого теплообменного оборудования, активно внедряемого в производственные цепи, является конвективный маслоохладитель [1–4]. Конструктивное исполнение маслоохладителей [1; 5] предполагает формирование набора секций оребренных пластин с внутренними каналами для подачи охлаждаемой жидкости. При этом одним из методов повышения эффективности маслоохладителей является применение аппарата математического моделирования для численной оптимизации рабочих процессов и конструктивного оформления [1]. Однако численное моделирование рабочих процессов в маслоохладителе сопряжено с необходимость разрешения турбулентных потоков. Существует достаточное количество различных моделей турбулентности, при этом выбор той или иной модели [6] оказывает существенное влияние как на получаемую структуру потока, так и на распределение теплофизических параметров. Данная работа направлена на валидацию RANS-моделей турбулентности для моделирования аэродинамики маслоохладителей.

Рассматривается промышленный маслоохладитель [7], представляющий собой сложный многосекционный коллектор, состоящий из набора плоских шестиканальных элементов с развитой внешней поверхностью (оребрением). Два плоских шестиканальных элемента с пространством воздуха между ними представляют единичную охлаждающую секцию. В работе [7] показано, что задача об аэродинамике маслоохладителя может быть сведена к рассмотрению единичной секции.

Охлаждение масла производится за счет принудительного обдува воздухом внешних алюминиевых поверхностей маслоохладителя. В качестве допущения закрутка потока на входе в расчетную область не учитывалась, процессы теплопереноса в данной работе не рассматриваются, материал корпуса считается изотропным, шероховатость стенок не учитывается. С учетом сделанных допущений, задача об аэродинамике маслоохладителя в общем случае может быть описана системой уравнений Навье – Стокса:

© Шигапова А. Р., 2025

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0, \\ \rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} = \rho \mathbf{F} - \nabla p + \nabla \cdot P, \\ \rho \frac{d}{dt}\left(c_v T + \frac{U^2}{2}\right) = \rho \mathbf{F}\mathbf{U} + \nabla \cdot (P\mathbf{U}) + \nabla \cdot \mathbf{q}, \\ p = \rho R T \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность газа; p – давление; U – вектор скорости; P – тензор напряжений; F – объемная сила; T – температура; q – вектор плотности теплового потока; R – удельная газовая постоянная.

Необходимо отметить, что в единичной секции маслоохладителя реализуется переходный режим течения [2; 4]. Система уравнений (1) осреднялась по Фавру и Рейнольдсу с дальнейшим замыканием уравнений в рамках наиболее распространенных RANS-моделей турбулентности, согласно моделям, рассмотренным в [7]. Геометрическая модель единичной секции маслоохладителя и расчетная область согласованы с экспериментальной моделью: область входа потока удалена от единичной секции на расстояние более двух эквивалентных диаметров секции, область выхода определена за секцией. Граничные условия определены следующим образом: на непроницаемых стенках использовалось условие прилипания и непротекания, на боковых границах (плоскостях симметрии) задавалось условие симметрии, на входной границе определялись скорость газа и температура, на выходной – неотражающие граничные условия. Начальная степень турбулентности определена как 1 %.

Приближенное решение полученной системы уравнений частных производных строится методом конечных объемов в рамках квазистационарного подхода. Для разрешения невязких потоков применяется противопоточная схема 2-го порядка точности, а для вязких потоков – центрированная схема 2-го порядка точности. Для ускорения сходимости используется метод сопряженных градиентов. Дискретизация расчетной области по пространству производилась с помощью шестигранных элементов, общее количество которых, составляющее более 15 млн, было определено по результатам исследования сеточной сходимости.

В результате численного моделирования получены структура потока воздуха в единичной секции маслоохладителя на входе в секцию и за секцией. Выявлены и описаны изменения давления и скорости воздуха в продольных и поперечных сечениях единичной секции. В выходном сечении единичной секции маслоохладителя построены экспериментальные и расчетные поля избыточных давлений, произведено их сопоставление. Оценены диапазоны применимости RANS-моделей турбулентности для разрешения переходного режима течения в единичной секции маслоохладителя, имеющей сложную геометрию. Проведена валидация наиболее распространенных моделей турбулентности для задач аэродинамики маслоохладителей с использованием экспериментальных данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00067 (https://rscf.ru/project/25-21-00067).

Список источников

1. Baymetova E. S., Chernova A. A., Koroleva M. R., Kelemen M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler // MM Science Journal. 2021. Vol. 2021. Pp. 4764–4768. URL: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.

2. Байметова Е. С. Определение оптимальных конструктивных параметров теплообменной секции путем численного моделирования // Diagnostics, Resource and

Mechanics of Materials and Structures. 2022. № 2. С. 45–54. URL: https://doi.org/10.17804/2410-9908.2022.2.045-054.

3. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В.Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. № 1. С. 7–31.

4. Армянин А. Ю., Байметова Е. С., Хвалько М. Е. Особенности теплового режима маслоохладителя с развитой внешней поверхностью // Химическая физика и мезоскопия. 2022. Т. 24, № 1. С. 93–103. URL: https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.8.

5. Surnin A. D. Inventor, Izhevsk radiator factory, assignee. Aluminum cellated profile. Russian Federation patent RU229205U1_20240926, 26.09.24. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU229205U1_20240926.

6. Chernova A. A. Validation of rans turbulence models for the conjugate heat exchange problem // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2022. Т. 18. № 1. С. 61–82.

7. Байметова Е. С., Чернова А. А., Шигапова А. Р. Аэродинамика плохообтекаемых тел на примере конвективного теплообменного аппарата // Химическая физика и мезоскопия. 2024. Т. 26. № 2. С. 143–154.

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ВЫСОКОЭНЕРГОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СРЕДЕ ANSYS MECHANICAL

С. С. Базюк*, Я. А. Титов, В. В. Кузнецов

АО «НИИ НПО «ЛУЧ»
142103, Российская Федерация, Подольск, ул. Железнодорожная, д. 24
** bazukss@sialuch.ru*

Рассматриваются вопросы верификации расчетов тепловых процессов с использованием метода конечных элементов в среде Ansys Mechanical APDL. Внимание уделено особенностям моделирования распределения температуры в телах с энерговыделением при теплообмене излучением и теплопроводности с применением твердотельных, оболочечных и поверхностных конечных элементов 1-го и 2-го порядков. Обсуждаются анализ корректности и сохранение «физичности» результатов численного решения.

В настоящее время разработка оборудования и элементов конструкций в значительной мере ведется с использованием методов компьютерного моделирования (КМ) физических процессов. Вклад вычислительных НИОКР в проектирование и разработку оборудования стремительно возрастает вследствие: 1) повышения производительности и воспроизводимости численного эксперимента; 2) возрастания длительности и стоимости прямых испытаний. В силу тенденции к переносу ответственности за результат НИОКР на численное моделирование повышаются требования к квалификации научных сотрудников-аналитиков и инженеров.

В работе выполнена верификация расчетов переноса тепла методом конечных элементов (КЭ) в среде Ansys Mechanical APDL. Полученные результаты справедливы для любых сред, так как являются особенностью формулировки КЭ примененных типов. Рассмотрены две постановки:

1) 3D-перенос тепла излучением в диффузном приближении в системе двух изотропно теплопроводных соосных параллелепипеда со сквозным отверстием и внутреннего цилиндра с однородным тепловыделением (рис. 1). Теплообмен с торцевых поверхностей тел и излучение во внутренней полости цилиндра отсутствуют;

2) 2D температурное поле в пластине, обладающей равномерно распределенным энерговыделением, изотропной теплопроводностью и объемным терморасширением (рис. 2).

Для 1-й постановки дискретизация КЭ-сетки в цилиндре выполнялась с использованием 20 и 8 узловых твердотельных и оболочечных КЭ SOLID90 и SHELL132 соответственно. Перенос радиационного потока смоделирован 8 узловыми КЭ SURF152. Во 2-й проблеме распределение температур в пластине уточнялось с применением КЭ со срединными узлами PLANE77 и PLANE183 (тепловые и механические КЭ соответственно).

Для верификационных расчетов разработаны коды на языке APDL, предусматривающие выдачу на экран полных результатов моделирования при взаимодействии с графическим интерфейсом Ansys Mechanical и в текстовый файл интегральных параметров – в пакетном режиме.

© Базюк С. С., Титов Я. А., Кузнецов В. В., 2025

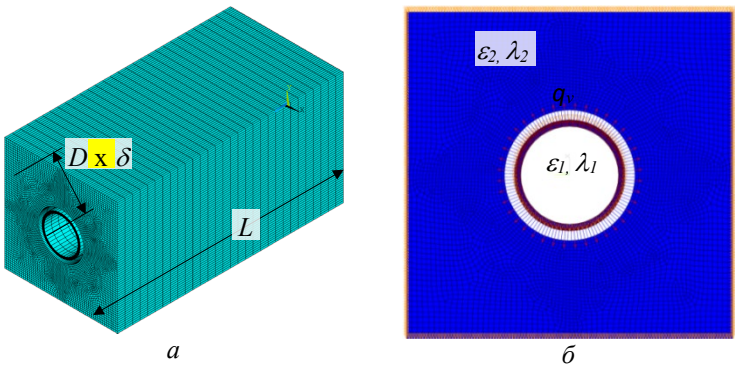


Рис. 1. Модель для 1-й постановки:
а – КЭ сетка, *б* – свойства материалов и используемые ГУ

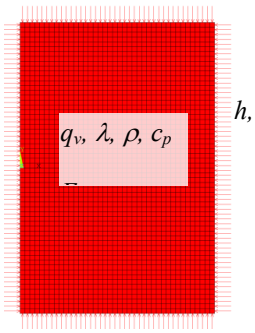


Рис. 2. Модель для 2-й постановки: КЭ сетка и используемые ГУ

Анализ численных результатов проводился с использованием относительных коэффициентов масштаба размера КЭ C_ϕ, C_z и C_r:

$$C_\phi = (\pi(D+2\delta)/n_\phi)/(\delta/n_r),\ \ C_z = (L/n_z)/(\delta/n_r),\ \ C_r = (D/\delta) \qquad (1)$$

где n_r, n_z, n_ϕ – число разбиений модели в радиальном, аксиальном и азимутальном направлениях соответственно. Точность численного анализа оценивалась по максимальному перепаду температуры в теле $\delta(\Delta T)$ в соответствии с соотношением (2):

$$\delta(\Delta T) = |\Delta T_{num} - \Delta T| / \Delta T, \qquad (2)$$

где ΔT_{num}, ΔT – максимальные перепады температуры, полученные в текущей реализации численного моделирования и согласно аналитическому решению постановки.

Из аналитического решения задачи о распределении температуры в полом тепловыделяющем цилиндре:

$$\Delta T = q_v (D-2\delta)^2 \big/ 16\lambda \cdot \left[\left[D/(D-2\delta) \right]^2 - 2\ln\left[D/(D-2\delta) \right] - 1 \right], \qquad (3)$$

где q_v – удельное объемное энерговыделение материала, λ – коэффициент теплопроводности.

Температурное поле двумерной пластины с тепловыделением описывается выражением:

$$\Delta T(x,y,\tau) = 16 q_v l_x^2 \big/ \pi^4 \lambda \sum_{q=0}^{+\infty} \sum_{p=0}^{+\infty} F_1(\xi,\eta) \cdot F_2(\tau), \quad F_1(\xi,\eta) = \frac{\sin[(2q-1)\pi\xi] \cdot \sin[(2p-1)\pi\eta]}{(2q-1)(2p-1)}$$
$$F_2(\tau) = \left[1 - \exp\left[-\left((2q-1)^2 + l_x^2 / l_y^2 \cdot (2p-1)^2 \right) \cdot (\pi / l_x)^2 \cdot a\tau \right] \right] \Big/ \left[(2q-1)^2 + l_x^2 / l_y^2 \cdot (2p-1)^2 \right], \qquad (4)$$

где $\xi = x/l_x$, $\eta = y/l_y$ – ее безразмерные координаты, $a = \lambda/\rho c_p$ – коэффициент температуропроводности материала, ρ – плотность, c_p – изобарная теплоемкость, l_x, l_y – ширина и высота пластины; τ – время нестационарного процесса.

Для 1-й постановки установлено, что точность прогноза перепада температуры немонотонно зависит от соотношений размеров КЭ. Для твердотельных SOLID90 ошибка прогнозирования минимальна при C_ϕ и C_z порядка $250 \div 850$, с дальнейшим их ростом погрешность вычислений возрастает до 4 раз и возникают нефизичные осцилляции температуры по длине цилиндра (рис. 3). В случае использования КЭ SHELL132 точность определения максимального перепада температуры увеличивается с повышением C_ϕ и C_z, однако независимо от C_r колебания температуры наблюдаются вдоль продольной оси цилиндра (рис. 4).

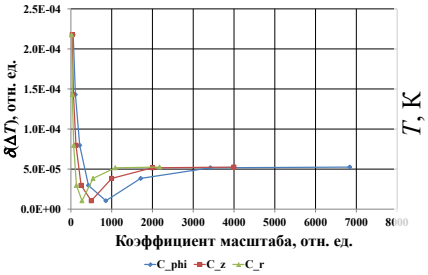


Рис. 3. Влияние соотношения размеров КЭ на точность прогнозирования ΔT в постановке 1

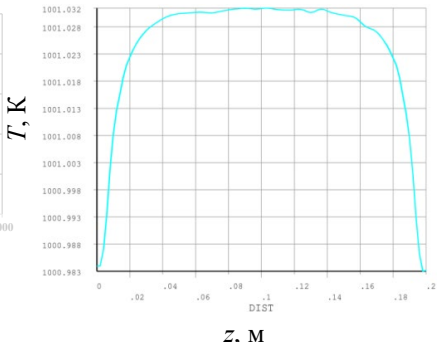


Рис. 4. Осцилляции температуры цилиндра по длине при моделировании КЭ SHELL132 ($C_z = 4{,}0 \cdot 10^3$, $C_\phi = 6{,}84 \cdot 10^3$)

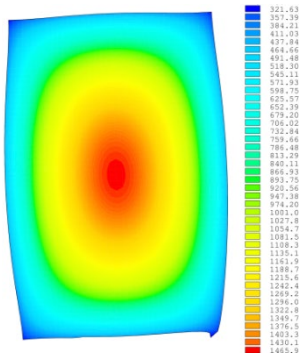


Рис. 5. Температурное поле в пластине с учетом терморасширения

В постановке 2 получено формоизменение пластины за счет терморасширения и уточненное температурное поле с поправками в задание удельного энерговыделения (рис. 5). Температурное поле стабилизируется после 20 итераций с максимальным значением, сходящимся к рассчитанному на 1-й итерации без учета терморасширения. Для рассмотренных исходных параметров поправка на формоизменение относительно точного аналитического решения без изменения геометрии дает $\delta(\Delta T) \sim +1{,}4$ %. На изменение температурного поля совместно действуют конкурирующие эффекты: снижение q_v при тепловом расширении и рост термосопротивления за счет неизотропного увеличения размеров пластины. Изменение температуры формоизмененной пластины (положительное или отрицательное) относительно номинального значения, полученного без учета терморасширений, определяет сочетание физико-механических свойств материала.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОГО ФРОНТА С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В ВЯЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

А. Л. Адрианов*, В. Сизаско

Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** aadrianov@sfu-kras.ru*

В докладе рассматривается распространение ударной волны после разрыва мембраны и ее нестационарное взаимодействие с различными неоднородностями в газовой смеси. Расчеты выполнены в невязкой и вязкой теплопроводной турбулентной постановке. Из серии расчетов выделяются такие решения, в которых сочетание начальной конфигурации газового пакета с диссипативным механизмом ударной волны приводят к заметному снижению ее интенсивности.

Изучение ударно-волновых процессов позволило разработать технологии, которые нашли свое применение не только при конструировании сверхзвуковых летательных аппаратов и их двигательных установок, но и в других инженерных и даже медицинских приложениях. Фронт *ударной волны* (УВ) или скачка уплотнения при больших числах Рейнольдса ($\mathrm{Re}_\infty \to \infty$) после корректной схематизации [1] можно представить математической поверхностью разрыва. Поток газа, прошедший сквозь такую поверхность, терпит разрыв газодинамических параметров. В случае использования модели невязкого нетеплопроводного газа, параметры, как и предельные значения частных производных от них, по обе стороны такого разрыва связываются точными соотношениями [1; 2], [3] (В.Н. Усков). В случае модели вязкого теплопроводного газа подобные соотношения носят лишь асимптотический характер при $\mathrm{Re}_\infty \to \infty$ и нелинейны относительно первых производных [1; 4; 5]. Эти соотношения применялись в рамках дискретно-аналитического подхода при моделировании и изучении проникновения скачка уплотнения в стратифицированный поток вязкого теплопроводного газа при $\mathrm{Re}_\infty \geq 10$^3 [1]. Сочетание определенным образом действий вязких сил, механизма теплопроводности, краевого эффекта и возмущений потока перед фронтом скачка позволило найти такие решения, при которых суммарное действие указанных факторов приводит к значительной деградации ударного фронта [6; 7].

Цель данного исследования – попытка получения подобных решений в плоской нестационарной постановке задачи. В отличие от приведенных выше исследований, выделение или схематизация УВ в виде математической поверхности не осуществлялась. В работе задействована гетерогенная смесь двух и более газов, начальная конфигурация которой (газовый пакет) задается таким образом, чтобы потом максимизировать действие вязких сил и механизма турбулентности в последующем ударном процессе. Для симуляции процесса возникновения и распространения УВ задаются первоначальные границы газов, представляющие собой разрушаемые мембраны, и сочетающие в себе области высокого и низкого давления. Перепад высокого (до основной мембраны) и низкого (после нее) давления задает начальную интенсивность УВ, после чего при ее движении и взаимодействии с контактными поверхностями газового пакета возникают множественные вторичные взаимодействия с активно работающим механизмом турбулентности.

В докладе рассматривается процесс генерации УВ с последующим ее нестационарным взаимодействием с изначально разделенным содержимым слоистого газового

© Адрианов А. Л., Сизаско В., 2025

пакета. Задача решалась в плоской постановке, на внешних боковых стенках канала были выставлены условия симметрии из соображений ограничения размера расчетной области. В качестве рабочих газов использовались: воздух, легкий молекулярный гелий и тяжелый Freon-12. Численный эксперимент проведен с использованием пакетов прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab и Ansys Fluent. Графическая обработка результатов вычислений выполнялась в Python с использованием библиотеки Matplotlib. Расчеты выполнялись в невязкой и вязкой постановке с использованием модели турбулентности Transition SST k-omega. Для оценки работы диссипативного механизма внутри рабочей зоны расчетной области на ее правой границе была задействована жесткая стенка, которая получала импульс от основной и вторичных УВ. Далее производилось сравнение конечных аддитивных приращений этого импульса в независимых вязкой и невязкой постановках задачи в одни и те же моменты времени. Это различие в независимых суммарных импульсах и послужило основной мерой оценки работы сил вязкого трения и механизма турбулентности в ударном процессе.

Список источников

1. Адрианов А. Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода : монография. Адрианов. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. 216 с.

2. Усков В. Н. Ударные волны и их взаимодействие. Л. : Ленингр. механ. ин-т, 1980. 88 с.

3. Адрианов А. Л., Старых А. Л., Усков В. Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск, 1995. 180 с.

4. Адрианов А. Л. Дифференциальные соотношения на скачке уплотнения в вязком газе при больших числах Рейнольдса // Тр. семинара «Матем. моделирование в механике» ВЦК СО РАН. Красноярск, 1996. 18 с. Деп. в ВИНИТИ 01.04.96, № 1052, В–96.

5. Адрианов А. Л. Обобщенные дифференциальные соотношения на скачке уплотнения // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физических процессов. 2009. Вып. 4. С. 22–30.

6. Адрианов А. Л., Сизаско В. О некорректном представлении ударного процесса на ударных полярах в вязком теплопроводном газе // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т.22, № 4. С. 558–567.

7. Adrianov A. L. Influence of the boundary effect, viscosity factor and heat conductivity mechanism on the shock front evolution // IOP Conf. Series: «Mater. Sci. Eng. 1230 012001». DOI 10.1088/1757-899X/1230/1/012001, 2022, P 9.1.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВИХРЕВОЙ ТРУБКЕ

М. М. Гафуров*, Т. А. Кулагина

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** gmara2021@mail.ru*

Проведено численное моделирование процесса распределения давления вихревой трубки. Для определения зависимости увеличения давления на распределения полей скорости. В качестве программного продукта применялась ANSYS FLUENT.

Введение: Вихревой эффект открыт в 1920 г. инженером Ж. Ранком, получившим патент на изобретение «вихревая трубка». Оставался незамеченным, пока другой известный ученый Р. Хилш не опубликовал работу, в которой давал рекомендации по конструкции вихревой трубки, впоследствии получившей название трубки Ранка – Хилша (рис. 1).

Вихревой эффект нашел широкое применение в различных отраслях химической, машиностроении, медицине авиационной, сельском хозяйстве и др. [1]. Большое количество научных работ связанно с этой темой. Существует несколько теорий, объясняющих энергоразделение в вихревой трубке. За последние 10–20 лет в подобных исследованиях нашли применение различные программы, одна из них ANSYS FLUENT, позволяющие решать задачи из области тепломассообмена, гидрогазодинамики и т. д. Для понимания процесса разделения газа на два потока ряд ученых произвели множество опытов, которые отразили в своих работах. Так, В. И. Кузнецов в своей работе описал гипотезу возникновения вихревого эффекта, для которого характерно энергоразделение. Существует ряд параметров, влияющих на производительность вихревой трубки [2–5]. Влияние одного из них рассмотрено в данной работе.

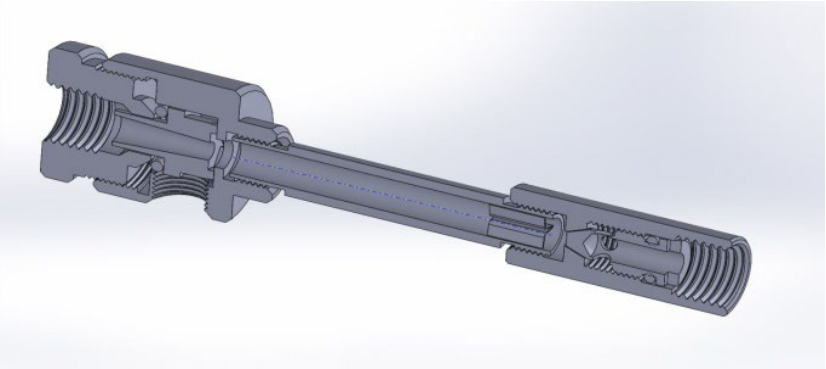


Рис. 1. Вихревая трубка Ранка – Хилша в разрезе

Метод исследования. Для выполнения работы построена численная модель вихревой трубки. При различных значениях P (бар) показатели температуры потоков на выходе $t_{хол}$, $t_{гор}$ (°C) имеют разные значения, вместе с этим скорость потоков также отличается [6]. При подаче сжатого газа через входное отверстие газ, проходя через форсунки, движется по периферии в противоположном направлении до выхода выпускного отверстия, через которое выходит часть газа, имеющая положительную температуру, а часть газа, двигаясь по оси трубки, начинает движение в сторону выходного

© Гафуров М. М., Кулагина Т. А., 2025

отверстия с отрицательной температурой потока. Для исследования начальное давление на входе в трубку выбрано P = 3 бар, а затем увеличивалось до 4; 4,5 и 5 бар.

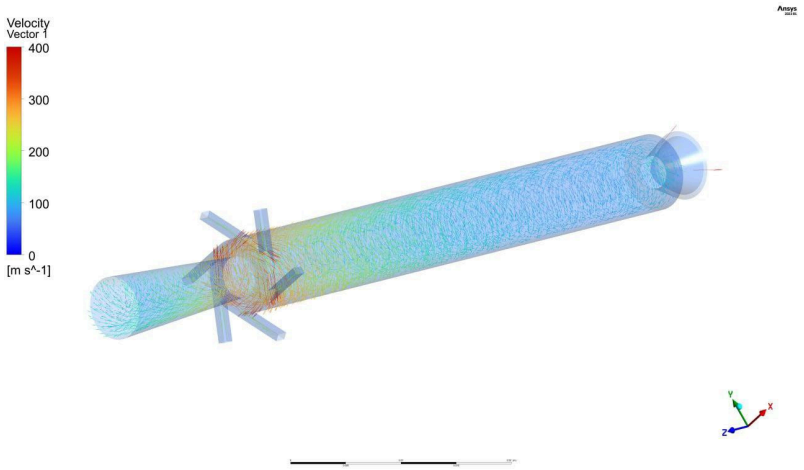


Рис. 2. Поле распределения скорости при P = 3 бар

Анализ результатов. Рассматривая поля распределения скоростей при различных значениях давления, стоит отметить, что осевой поток имеет не четкую структуру в разрезе. При P = 3 бар (рис. 2) и P = 4 бар поле распределения скорости имеют похожую картину практически по всей длине трубки. Однако на выходе поле скорости при P = 4 бар имеет большую площадь при незначительном увеличении скорости на выходе ms^{-1}. При увеличении показания давления до P = 4,5 бар скорость на выходе холодного потока увеличивается на 12 %, но при этом поле скорости уменьшается на треть относительно P = 4 бар, а скорость поля значительно уменьшилась. Увеличение давления до P = 5 бар меняет поле скорости, вблизи выхода горячего потока поле имеет нечеткие контуры при малых скоростях потока с нулевой точки до середины трубки. На выходе холодного потока поле скорости увеличивается, скорость потока в этой зоне к выходу не изменяется.

Заключение. Проведено численное моделирование вихревой трубки Ранка – Хилша с помощью ANSYS FLUENT. В результате моделирования определена зависимость распределения полей скорости при увеличении давления на входе, выявлено наличие неоднородности полей на границе соприкосновения вихрей при разных показателях давления.

Список источников

1. Енютина Т. А., Кулагина Л. В., Гафуров М. М. Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2023. № 11. С. 50–54. DOI: 10.14489/hb.2023.11

2. Бованд М., Валипур М. С., Эйамсаард С., Тамаёл А. Численный анализ для оптимизации криволинейных вихревых труб // Международные коммуникации в области тепло- и массообмена. 2014. № 50. С. 98–107.

3. Альювайхель Н. Ф., Неллис Г. Ф., Кляйн С. А. Параметрическое и внутреннее исследование вихревой трубки с использованием модели CFD // Международный журнал холода. 2005. № 28. С. 442–450.

4. Kaya F. Dept. of Mechanical Engineering, Nigde University, Nigde, 51240, Turkey Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 767-772, 2016. Available online at www.jafmonline.net, ISSN 1735-3572, EISSN 1735-3645. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.68.225.24392

5. Kiran D. Devade1 and Ashok Pise Parametric Review of Ranque-Hilsch Vortex Tube Columbia International Publishing American Journal of Heat and Mass Transfer (2017) Vol. 4 No. 3 pp. 115-145 doi:10.7726/ajhmt.2017.1012

6. Гафуров М. М. Обоснование экономической эффективности холодильно-нагревательных систем на базе вихревых трубок // Материалы юбилейной XX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2024. С. 181–183.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Д. О. Глазырина[1*], Е. Н. Алексин[1], А. А. Михеева[2], Д. М. Кучинский[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3
[2]ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191181, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А
** d_glazyrina@bk.ru*

В данной статье рассматривается уравнение состояния реального газа, полученное с помощью добавления коэффициентов пропорциональности в уравнение Ван-дер-Ваальса. Данная модель реального газа позволила получить вывод связи параметров во всех термодинамических процессах, благодаря чему появляется возможность проводить расчет действительных циклов тепловых двигателей на основе модели реального газа. Предложенная модель была проверена на спроектированных и изготовленных установках для исследования термодинамических процессов (адиабатного расширения, изохорного и изобарного) и показала удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных, в отличие от других моделей: идеального газа, идеального газа с коэффициентом сжимаемости и уравнения Ван-дер-Ваальса.

В настоящее время проектирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных установок (ГТУ) и судовых систем, в которых рабочим телом являются газообразные вещества, во многом опираются на модель идеального газа (ИГ). Это объясняется, в первую очередь ее математической простотой и доступностью. Расчеты с использованием модели ИГ относительно просты и позволяют быстро получить приблизительные результаты, что критически важно на ранних этапах проектирования. Давно сложилось так, что отсутствие удобных и широко распространенных альтернатив закрепило за моделью ИГ статус удобного рабочего инструмента.

Однако рабочие тела в ГТУ и ДВС (воздух, продукты сгорания) – это реальные газы (РГ), чье поведение значительно отличается от ИГ, особенно при высоких давлениях и температурах, типичных для современных высокоэффективных установок. Игнорирование этого различия приводит к значительным ошибкам в расчетах терплофизических параметров рабочего тела. Эти погрешности напрямую влияют на точность оценки эффективности и надежности энергетических установок.

Предложенная модель реального газа при расчете циклов энергетических установок (ЭУ) и по сравнению с моделью идеального газа, применяемой в настоящее время, позволит получить более точное значение параметров рабочего тела в циклах ГТУ, ДВС и паротурбинных установак (ПТУ), что поспособствует повышению эффективного КПД ЭУ. Также возможно применение предложенной модели во вспомогательных системах судна, например: система кондиционирования, отопления и пускового воздуха.

Поставленная задача заключалась в преобразовании уравнения ван дер Ваальса и получения на его основании уравнения состояния РГ, учитывающее сжимаемость газа и пригодное для вывода всех термодинамических процессов.

© Глазырина Д. О., Алексин Е. Н., Михеева А. А., Кучинский Д. М., 2025

Предлагаемое уравнение:

$$P(\upsilon, T) = \frac{RT}{(\upsilon - b)} - \frac{a}{\upsilon^2} + \mu^* \left(\frac{RT}{(\upsilon - b)}\right),$$

где поправки a и b определяются по формулам, представленным далее, через критические параметры рассматриваемого вещества:

$$a = 3 \cdot P_{\text{кр}} \cdot \upsilon_{\text{кр}}^2, \quad b = \frac{\upsilon_{\text{кр}}}{3}.$$

Коэффициент μ^* - это некоторый безразмерный коэффициент пропорциональности. Физический смысл в это слагаемое заложен, как взаимодействие молекул, предполагающее ассоциацию, трение и поляризацию молекул, которые не учитывает поправка a/υ^2. Численное значение μ^* определяется по независимой формуле:

$$\mu^* = \left(\frac{1}{3 \cdot J_{\text{кр}}}\right)^n \cdot \left[1 - \left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_i}\right)^{sign\Delta P}\right];$$

где $sign\Delta P$ означает, что в случае отрицательного значения ΔP в скобке $\left(1 - \frac{T_i}{T_{\text{кр}}}\right)$, положительного - $\left(1 - \frac{T_{\text{кр}}}{T_i}\right)$.

$$J_{\text{кр}} = \frac{R \cdot T_{\text{кр}}}{P_{\text{кр}} \cdot \upsilon_{\text{кр}}},$$

где $J_{\text{кр}} -$ безразмерный критический параметр (критический коэффициент).

Для того чтобы получить уравнение адиабатного процесса в форме приемлемой для практического применения в уравнении второе слагаемое a/υ^2 было решено представить в виде некоторой части от первого слагаемого, т.е.

Второй коэффициент выражается в виде:

$$\lambda^* = \frac{\frac{a}{\upsilon^2}}{\left(\frac{R \cdot T}{\upsilon - b}\right)};$$

где λ^* свой коэффициент пропорциональности.

Окончательное уравнение реального газа с двумя коэффициентами пропорциональности имеет вид:

$$P = \beta^* \left(\frac{RT}{(\upsilon - b)}\right) = \beta^* \frac{RT}{\upsilon'}, \tag{3}$$

где $\beta^* = (1 - \lambda^* + \mu^*), \upsilon' = (\upsilon - b)$.

С помощью уравнения состояния были получены уравнения всех термодинамических процессов: изохорного, изобарного, адиабатного, изотермического и политропного, благодаря чему появилась возможность рассчитать цикл теплового двигателя по модели РГ.

Адиабатный процесс:

$$P\upsilon'^{k_{\text{рг}}} = const.$$

Показатель адиабаты реального газа определяется по формуле:

$$k_{\text{рг}} = \frac{2 \cdot \lambda^* - 2 \cdot \mu^* + (1 - \lambda^* + \mu^*) \cdot k_{\text{иг}}}{1 + \lambda^* - \mu^*},$$

где $k_{\text{иг}}$ – показатель адиабаты, определяемый по молекулярно-кинетической теории.

Изотермический процесс: $\frac{Pv'}{\beta^*} = RT = const.$

Изохорный процесс: $\frac{P}{\beta^* T} = \frac{R}{\upsilon'} = const.$

Изобарный процесс: $\frac{\beta^* T}{\upsilon'} = \frac{P}{R} = const.$

Политропный процесс:

$$P\upsilon'^{n_{\text{рг}}} = const.$$

Показатель политропы реального газа:

$$n_{\text{рг}} = \frac{\left[c_{\text{п}} - \beta^* c_p - c_v 2(\lambda^* - \mu^*)\right]}{(c_{\text{п}} - \varepsilon^* c_v)}.$$

В заключение можно сказать, что данное исследование направлено на дальнейшее развитием теории реального газа, благодаря учету характеристик которого, возможно повышение эффективности энергетических установок на стадии проектирования их главных и вспомогательных систем.

Список источников

Глазырина Д. О. Исследование модели реального газа для совершенствования характеристик энергетического оборудования: дис. канд. тех. наук: 2.5.20 / СПб. Гос. морской технический ин-т. М., 2025. 147 с.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. В. Кузенов, С. В. Рыжков*

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Российская Федерация, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5/1
** svryzhkov@bmstu.ru*

Представляемая работа посвящена компьютерному моделированию радиационно-магнито-газодинамических процессов и вычислению основных характеристик при взаимодействии мощных лазеров, пучков и плазменных потоков с высокотемпературным веществом без внешнего магнитного поля и при наложении магнитного поля [1–10].

Отдельно обсуждаются перспективы исследования и применения современных лазерных установок для генерации пучков адронов высоких энергий [11–17]. Что в свою очередь направлено на проведение цикла физических и медико-биологических исследований, которые позволят установить возможности лазерной техники в отношении генерации потоков ионов с необходимыми для медицинских приложений свойствами. Ускорение ионов интенсивными лазерными импульсами можно использовать для создания новых типов приборов с широким спектром применения, включая раковую терапию, подготовку изотопов для медицинских целей, протонную радиографию. Развитие лазерных систем с ультракороткими импульсами и высокой пиковой мощностью позволяет получать и исследовать вещество в экстремальных состояниях используя сравнительно компактные лабораторные установки. Ионы с кинетической энергией в несколько миллионов электронвольт (МэВ) генерируются в сверхплотной плазме в лазерных мишенях из тонкой фольги. Источники ионов можно также получать с помощью мишеней, представляющих собой газовые потоки с кластерами конденсированного вещества. Во всех экспериментах такого рода большой проблемой является значительный разброс ионов по энергиям, в то время как для медицинских целей требуются моноэнергетические пучки. Решение этой проблемы возможно на пути использования микроструктурированных мишеней, что было подтверждено экспериментально. Расходимость и энергетический разброс ионов можно контролировать с помощью сверхпроводящих магнитов, или плазменного микролинзирования. Эти достижения создают основу для реализации различных приложений систем лазерной генерации ионных пучков. Однако необходимо значительное увеличение энергии ионов для применения в терапии онкологических заболеваний, потому что для этого требуется энергии протонов ~ 200 МэВ.

Протонные пучки с необходимыми параметрами получают в настоящее время на классических ускорителях заряженных частиц (синхротронах, циклотронах, линейных ускорителях). Широкое применение адронной терапии затруднено тем, что необходимые для нее установки ускорения ионов (циклотроны или синхротроны достаточно большого размера) и системы транспортировки ионных пучков и управления ими являются технически сложными и требуют вложения от 100 до 200 млн евро в случае терапевтического центра с четырьмя процедурными комнатами, что в свою очередь определяет высокую стоимость медицинских услуг. В мире работают лишь немногим более 40 центров адронной терапии, хотя в таком лечении нуждается до 30 % онкологических больных.

В настоящее время проводятся работы в нескольких направлениях по созданию более компактных и менее затратных технологий. Несколько компаний разрабатывает

© Кузенов В. В., Рыжков С. В., 2025

предназначенные для медицинских целей компактные ускорители ионов, в которых используются известные в области стандартных ускорителей заряженных частиц технологии, такие как применение сверхпроводящих циклотронов или компактных циклотронов для одной или нескольких лучевых установок. Принципиально отличный от указанных подход основан на идее лазерного ускорителя ионов. Использование лазерного ускорителя относительно небольших размеров в центрах адронной терапии может произвести революцию в адронной терапии, сделав намного более доступными для пациентов пучки протонов и ионов высоких энергий.

У лучевой терапии, применяемой при лечении рака, имеются свои недостатки. Поэтому в последнее время пристальное внимание уделяется адронной (протонной и ионной) терапии. Одно из главных преимуществ лазерных методов ускорения ионов перед применяемыми в настоящее время схемами состоит в том, что использование лазеров позволит упростить и уменьшить линии транспортировки ионов в процедурные кабинеты, а также установки для ротации ионного пучка (гантри). Вместо приборов, включающих в себя большие и тяжелые магниты для отклонения ионного пучка, пучки лазерного излучения для обеспечения их взаимодействия с мишенью в процессе, приводящем к генерации быстрых ионов непосредственно в процедурном помещении.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0705-2024-0011.

Список источников

1. Гаранин С. Г., Ивановский А. В., Куликов С. М., Мамышев В. И., Певный С. Н., Рогачев В. Г. Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131–140.

2. Yager-Elorriaga D. A. et al. An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 042015.

3. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target // Fusion Science and Technology. 2023. V. 79. P. 399–406.

4. Рыжков С. В., Чирков А. Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М. : Физматлит, 2017. 200 с.

5. Клименко Г. К., Кузенов В. В., Ляпин А. А., Рыжков С. В. Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 264 с.

6. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica Scripta. 2021. V. 96. P. 125613.

7. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of Plasmas. 2019. V. 26. P. 092704.

8. Кузенов В. В., Рыжков С. В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.

9. Murakami M., Honrubia J. J., Weichman K., Arefiev A. V., Bulanov S. V. Generation of megatesla magnetic fields by intense‐laser‐driven microtube implosions // Scientific Reports. 2020. V. 10. P. 16653.

10. Moody J. D., Pollock B. B. et al. The Magnetized Indirect Drive Project on the National Ignition Facility // Journal of Fusion Energy. 2022. V. 41. P. 7.

11. Фортов В. Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе // УФН. 2009. Т. 179. С. 653–687.

12. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (A Review) // Aerospace. 2023. V. 10. P. 662.

13. Буланов С. В., Вилкенс Я. Я., Есиркепов Т. Ж., Корн Г., Крафт Г., Крафт С. Д., Моллс М., Хорошков В. С. Лазерное ускорение ионов для адронной терапии // УФН. 2014. Т. 184. С. 1261–1298.

14. Клёнов Г. И., Хорошков В. С. Адронная лучевая терапия: история, статус, перспективы // УФН. 2016. Т. 186, № 8. С. 891–911.

15. Шарков Б. Ю., Мешков И. Н. Развитие физики ускорителей заряженных частиц для фундаментальной науки, высоких технологий и медицины // Вестник РАН. 2022. Т. 92. С. 213–219.

16. Ryzhkov S. V. Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review) // Applied Sciences. 2023. V. 13 (21). P. 6658.

17. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С. и др. Распределенный центр ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт»: история, современное состояние и перспективы развития // Кристаллография. 2022. Т. 67. С. 801–817.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РИМАНА В ОБЛАСТИ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

М. Р. Королева

Удмуртский федеральный исследовательский центр УО РАН
426067, Российская Федерация, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34
koroleva@udman.ru

Работа посвящена построению точного решения задачи Римана в области неклассической газодинамики для уравнений состояния Ван-дер-Ваальса и Соаве – Редлиха – Квонга. Решение может содержать неклассические сложные составные волновые структуры, основанные на ударных волнах, волнах разрежения, плавных волнах сжатия и резких ударных волнах разрежения. Точное решение задачи Римана строится на основе геометрической интерпретации решения на изоэнтропах уравнения состояния.

Область неклассической газодинамики на термодинамической плоскости представляет собой небольшую область вблизи критической точки на диаграмме состояния вещества, характеризующуюся отрицательными значениями полной производной [1]. Здесь возможно появление таких неклассических волновых структур как ударные волны разрежения и плавные волны сжатия. Такие эффекты были предсказаны Зельдовичем [2] и обнаружены экспериментально [3–4]. Аномальное поведение веществ возможно лишь при определенных условиях: состояние газа должно быть близким к критическому, но при этом находится вне зоны двухфазности. Математически получить такие волновые структуры возможно лишь на основе использования сложных уравнений состояния газа, например, уравнения Ван-дер-Ваальса или уравнения Соаве – Редлиха – Квонга. В этом случае изоэнтропы в неклассической области меняют свою кривизну, что позволяет заложить в решение задачи Римана сложные аномальные структуры.

Алгоритм построения точного решения задачи Римана с учетом неклассического поведения газа подробно описан в работе [5] на модельных функциях, изотермическом газе и Ван-дер-Ваальсовом газе. На основе геометрической интерпретации решения составлены функции определения давления и скорости движения газа на аномальных волнах. В настоящей работе данный алгоритм модифицирован для уравнения состояния Соаве – Редлиха – Квонга.

Решение строится на основе системы уравнений невязкого нетеплопроводного газа в одномерном случае

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \mathrm{A}(\mathrm{W})\frac{\partial W}{\partial x} = 0, \tag{1}$$

где вектор неизвестных $W = (\upsilon, u, s)^T$ формируется на основе удельного веса υ, удельной энтропии s и скорости газа u, $\mathrm{A}(\mathrm{W})$ – матрица Якоби, определяемая следующим образом

$$A(W) = \begin{pmatrix} u & -\upsilon & 0 \\ \upsilon\left(\frac{\partial p}{\partial \upsilon}\right)_s & u & \upsilon\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_\upsilon \\ 0 & 0 & u \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где давление p определяется уравнением состояния.

© Королева М. Р., 2025

Начальные данные для системы (1)-(2) определяют задачу о распаде разрыва:

$$W = \begin{cases} W_l, x < 0, \\ W_r, x > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где вектора $W_l = (v_l, u_l, s_l)^T$ и $W_r = (v_r, u_r, s_r)^T$ описывают начальные значения газодинамических величин слева и справа от границы разрыва, расположенной в точке $x = 0$. Динамика течения от начальных данных (3) по времени определяется характеристиками уравнений газовой динамики [6].

На рис. 1 приведена схема решения тестовой задачи и распределение давления, полученное в результате решения задачи Римана. Точное решение в данном случае содержит слева комбинированную волновую структуру «волна разрежения» – «ударная волна разрежения» – «волна разрежения», а справа структуру «ударная волна разрежения» – «волна разрежения».

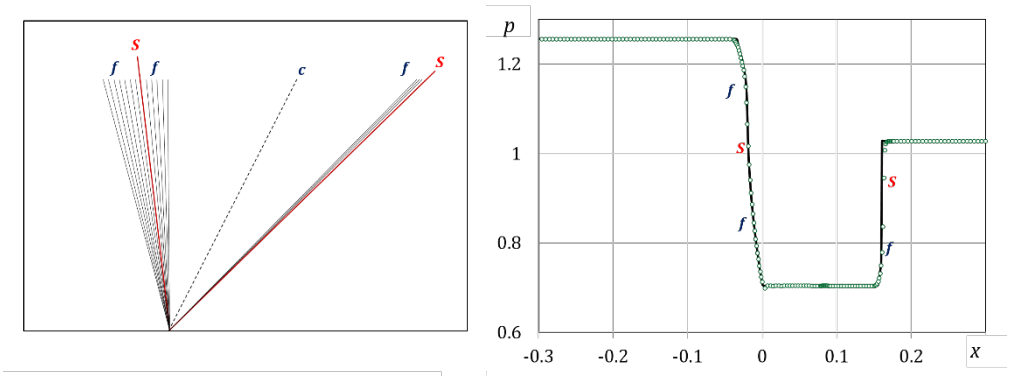


Рис. 1. Схема решения в области неклассической газовой динамики. Слева – структура решения в плоскости $x - t$, справа – точное решение задачи Римана для плотности

Схема решения основана на геометрическом методе, использующем изоентропы фазовой диаграммы вещества (рис. 2).

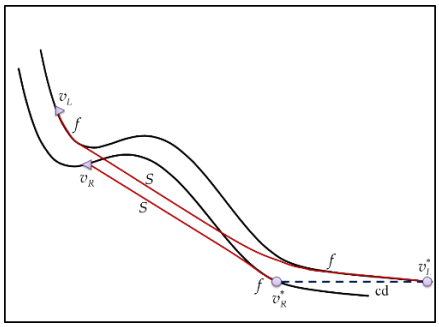


Рис. 2. Формирование решения задачи Римана на изэнтропах в неклассической области

Участки решения, совпадающие с изоентропами формируют волны разрежения. Если эти участки соответствуют вогнутой части кривой, то волны разрежения будут классическими (на рис. 2 обозначены символом f). Прямыми линиями на рис. 2 показаны ударные волны (обозначены символом S). Так как они выходят из точек, лежащих на выпуклой части изоэнтроп, то они представляют собой неклассические ударные волны разрежения. Данный подход к нахождению точного решения задачи Римана может быть распространен на многомерные задачи и использован при описании сложных

газодинамических процессов вблизи критической точки на фазовой диаграмме вещества.

Список источников

1. Thompson P. A. A Fundamental Derivative in Gasdynamics // Phys. Fluids. 1971. Vol. 14 (9). Pp. 1843–1849.

2. Зельдович Я. Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М., Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2019. 187 с.

3. Borisov A. A., Borisov Al. A., Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E. Rarefaction shock wave near the critical liquid–vapour point // J. of Fluid Mech. 1983. Vol. 126. Pp. 59–67.

4. Chandrasekaran N., Michelis T., Mercier B., Falsetti C., Colonna P. Nonclassical wave propagation measurements in the high temperature vapor of $D6D_6$ with the asymmetric shock tube for experiments in rarefaction waves (ASTER) // Experiments in Fluids. 2024. Vol. 65. Pp. 1–16.

5. Quartapelle L., Castelletti L., Guardone A., Quaranta G. Solution of the Riemann problem of classical gasdynamics // Journal of Computational Physics. 2003. Vol. 190. Pp. 118–140.

6. Тененев В. А., Королева М. Р. Постановка задачи Римана для политропных газов, описываемых сложными уравнениями состояния // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25, № 4. С. 507–514.

МЕТОД КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНТАКТНЫХ УГЛОВ В МЕТОДЕ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

А. Л. Куперштох*, Д. А. Медведев, А. В. Альянов

Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 15
** sknew@mail.ru*

Рассмотрены варианты использования метода касательных сил (TFM) для моделирования смачивания твердой поверхности в методе решеточных уравнений Больцмана (LBE). Получены картины течения жидкости внутри капли, находящейся на горячей подложке, возникающие при одновременном действии тепловой конвекции в поле тяжести и эффекта Марангони, а также из-за неравномерного испарения на поверхности капли. Показано влияние формы капли, которая зависит от угла смачивания, на возможность вихревых течений внутри нее.

Во многих задачах, рассматривающих капли или пленки на твердой поверхности, важную роль играет смачиваемость поверхностей и, соответственно, значения контактных углов. Смачиваемость зависит как от свойств жидкости, так и от свойств поверхности. Кроме того, контактные углы изменяются при влиянии на вещество электрических полей и потоков тепла за счет возникновения течений.

Для моделирования смачиваемости в методе LBE общепринятыми являются подходы, в которых вводятся силы взаимодействия между узлом жидкости или пара, примыкающим к твердой поверхности, и ближайшими узлами твердой поверхности [1]

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = B\Phi(\mathbf{x})\sum_{j=1}^{k} w(\mathbf{e}_j)\Phi_{\text{solid}}(\mathbf{x}+\mathbf{e}_j)\cdot\mathbf{e}_j\ . \tag{1}$$

Здесь функция $\Phi(\mathbf{x})$ выражается через псевдопотенциал U для флюида $\Phi(\mathbf{x}) = \sqrt{-U}$, то есть через уравнение состояния флюида

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sqrt{\rho\theta - P(\rho,T)}\ .$$

Значения Φ_{solid} в узлах границы задается равным значениям $\Phi(\mathbf{x})$ в ближайших жидких узлах. Параметр B (параметр адгезии) определяет смачиваемость поверхности ($B = 1$ соответствует нейтральному смачиванию). Однако при этом оказывается, что при изменении параметра адгезии изменяется плотность жидкости в тонком слое вблизи поверхности. Это препятствует корректным расчетам тепловых потоков.

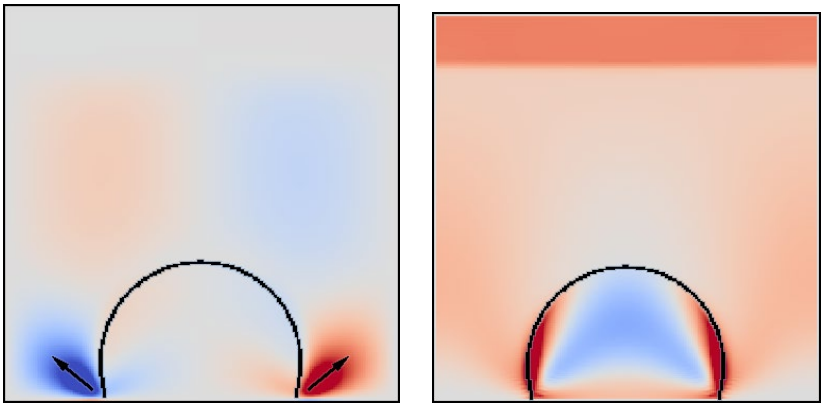
В работах [2–4] был предложен новый класс подходов, более приемлемых для реализации в методе решеточных уравнений Больцмана при наличии тепловых потоков. Идея состоит в том, что в дополнение к нейтральному смачиванию (1) при $B = 1$ еще вводятся тангенциальные составляющие сил, действующих на вещество в узлах жидкой фазы со стороны соседних узлов на подложке (метод касательных сил, TFM). В частности, для двумерной задачи с горизонтальной поверхностью имеем

$$F_x(\mathbf{x}) = -\beta\Phi(\mathbf{x})\sum_{j=1}^{2}\Phi_{\text{solid}}(\mathbf{x}+\mathbf{e}_j)\cdot e_{jx}\ .$$

© Куперштох А. Л., Медведев Д. А., Альянов А. В., 2025

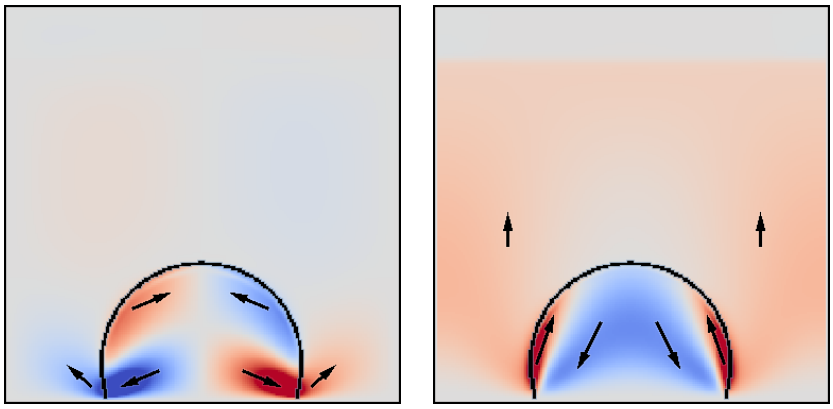
Параметр взаимодействия $\beta = 0$ соответствует нейтральному смачиванию, $\beta > 0$ соответствует гидрофильным поверхностям, а $\beta < 0$ – гидрофобным. При таком подходе плотность жидкости в слое, прилегающем к твердой поверхности, не изменяется. Исследовано влияние области действия тангенциальных сил на потоки испарения жидкости в окрестности контактной линии. В случае использования метода TFM только для узлов переходного слоя жидкость-пар (в окрестности контактной линии) эти горизонтальные силы имеют известный смысл поверхностного натяжения в вершине краевого угла смачивания в классическом законе Юнга.

На рис. 1 показаны распределения скорости флюида при 2D-моделировании испарения капли на горизонтальной поверхности в поле тяжести. Наблюдается интенсивное испарение жидкости вблизи контактной линии (рис. 1, *а*). На более холодной верхней границе происходит конденсация паров.



а *б*

Рис. 1. Распределения горизонтальной скорости флюида (а) и вертикального потока энергии (б) для испаряющейся капли. Расчетная область 200 × 200. t = 25 000



а *б*

Рис. 2. Распределения горизонтального (а) и вертикального(б) потоков массы флюида. Расчетная область 200×200. t = 25000

Получены картины течения жидкости внутри капли, находящейся на горячей подложке, возникающие при одновременном действии тепловой конвекции в поле тяжести и эффекта Марангони, а также из-за неравномерного испарения на поверхности капли. Наблюдаются вихревые течения внутри капли (рис. 2). Показано влияние формы капли, которая зависит от угла смачивания, на возможность вихревых течений внутри нее.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00310 (https://rscf.ru/project/25-29-00310).

Список источников

1. Benzi R., Biferale L., Sbragaglia M., Succi S., Toschi F. Mesoscopic modeling of a two-phase flow in the presence of boundaries: The contact angle // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74(1). P. 021509.

2. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A., Alyanov A. V. Simulation of substrate cooling during evaporation of pure vapor from the surface of a thin liquid film and droplets // J. Appl. Ind. Math. 2023. Vol. 17 (3). Pp. 582–591.

3. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A., Alyanov A. V. Heat flux from the surface in the process of the rupture of a thin liquid film by an electric field // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35 (10). P. 102006.

4. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A. On contact wetting angles in the lattice Boltzmann method and their measurement // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications/ 2024. Vol. 12 (4). Pp. 84–91.

МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КРУГЛЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

А. Е. Коренченко*, А. С. Лебедев

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Российская Федерация, Москва, Проспект Вернадского, д. 78
** korenchenko@mirea.ru*

Проведен численный анализ интенсивности теплопередачи для труб круглых и прямоугольных сечений. В случаях, когда поперечные сечения труб в теплообменнике являются вытянутыми вдоль некоторого направления, исследовано влияние расположения труб по отношению к набегающему потоку: длинной стороной вдоль потока или поперек его. Исследовано влияние на теплообмен выступов на поверхности труб. Проведен анализ обтекания труб с различными формами поперечных сечений. Выявлены особенности обтекания, найдены поля скоростей и температуры в объеме теплообменника. Найдены значения безразмерного теплового потока (числа Нуссельта) для каждого случая.

В современном техническом обществе потребность в теплообменных аппаратах крайне велика. Основную массу теплообменного оборудования составляют водоводяные и паро-водяные трубчатые теплообменники. Такой теплообменник состоит из блока трубок, погруженных в поток жидкости. По трубкам пропускают жидкость или газ, причем среды, находящиеся в трубках и в потоке имеют различные начальные температуры, за счет чего происходит нагрев жидкости в потоке. Разработаны способы интенсификации теплоотдачи: за счет усложнения формы труб теплообменников оребрением поверхности [1; 2], путем установки турбулизаторов [3], за счет вращения теплообменных труб [3]. В [4] проведено численное моделирование теплообменника, имеющего трубы круглого, прямоугольного или эллиптического сечения. Результаты этого исследования показывают, что наибольшая интенсивность теплопереноса достигается при использовании теплообменника с трубами прямоугольного сечения, а использование труб кругового сечения дает самую низкую интенсивность теплопередачи. Однако из анализа литературы можно заключить, что возможность увеличения теплоотдачи за счет изменения формы поперечного сечения труб с теплоносителем рассмотрена недостаточно и должна быть исследована дополнительно.

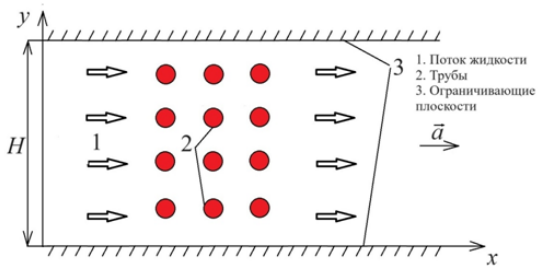


Рис. 1. Схема численного эксперимента

Схематичное изображение теплообменника с поперечным потоком показано на рис. 1. Жидкость втекает в теплообменник слева направо под действием силового поля и встречает пучок труб, расположенных под прямым углом к потоку (на рисунке показаны поперечные сечения). Расстояние между центрами труб составляет 4 см как в вертикальных, так и в горизонтальных рядах. Численные расчеты проведены для H= 0.2 м,

© Коренченко А. Е., Лебедев А. С., 2025

длина теплообменника составляет L_H = 1 м. Напряженность силового поля выбрана равной $a = 10^{-3}$ м/с^2. Это дает значение максимальной скорости, оцененное «сверху», $V_{x\max} \approx 2$ м/с, и позволяет утверждать, что протекание будет происходить в ламинарном режиме ($Re < 2000$). Рассмотрены трубы с различными поперечными сечениями: круглые, прямоугольные с вертикальным расположением длинной стороны (поперек потока), прямоугольные с расположением длинной стороны вдоль потока, модель оребренной поверхности, когда вдоль поверхности трубы расположены прямоугольные выступы, размеры выступов 1 мм × 2 мм. На начало расчета жидкость заполняет теплообменник и находится в покое при температуре T_0 = 283 K, в момент t = 0 включается силовое поле напряженностью $\vec{a}$. Температура труб составляет T_H = 363 K и не изменяется в процессе теплообмена. Задача решена в двумерной постановке, смысл меры площади источника тепла S_H в этом случае несет периметр сечения трубы.

На рис. 2 показаны зависимости безразмерного теплового потока – числа Нуссельта – от периметра сечения для труб различной формы. Изменения периметра труб кругового сечения происходило за счет изменения радиуса. Для труб прямоугольного сечения длина короткой стороны была фиксирована и составляла 0.5 см. Изменение периметра происходило за счет изменения длины другой стороны или за счет оребрения трубы.

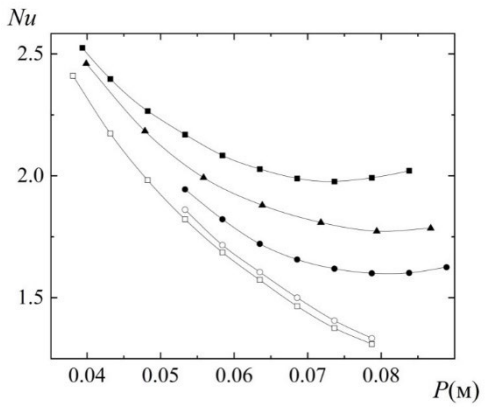


Рис. 2. Зависимость безразмерного теплового потока от периметра сечения для труб с различными формами поперечного сечения: ▲ – круговое сечение; ■ – вертикальный прямоугольник без выступов; ● – вертикальный прямоугольник с 4 выступами 1 мм × 2 мм; □ – горизонтальный прямоугольник без выступов; ○ – горизонтальный прямоугольник с 4 выступами 1 мм × 2 мм

Графики на рис. 2 позволяют выявить следующие закономерности. Зависимости теплового потока от периметра труб сближаются при уменьшении периметра, это связано с тем, что при уменьшении размеров труб форма их сечения становится несущественным фактором. При увеличении площади поверхности труб число Нуссельта уменьшается. Исключение составляет поток, рассчитанный для круглых труб и труб с сечением в виде вертикального прямоугольника, как видно из рисунка, в этих случаях при некотором значении периметра поток начинает увеличиваться при увеличении периметра. Оребрение труб в рассмотренных условиях не приводит к интенсификации теплообмена. Наибольшее значение числа Нуссельта наблюдалось для труб с сечением в виде вертикального прямоугольника, причем различие теплового потока со значениями, полученными для труб кругового сечения, составило ~15 %.

Список источников

1. Артемьев Д. В., Зайцев А. В., Санавбаров Р. И. Моделирование процесса теплопередачи в кожухотрубном теплообменном аппарате // Вестник МАХ. 2021. № 3. С. 5–14.

2. Романова Е. В., Колиух А. Н., Лебедев Е. А. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребреного рекуператора // Вестник ТГТУ. 2017. № 3. С. 420–427.

3. Кустов Б. О., Бальчугов А. В., Баденников А. В., Герасимчук М. В., Захаров К. Д. Экспериментальные исследования перспективных способов интенсификации теплопередачи в трубчатом теплообменнике // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2020. № 331. С. 174–183.

4. Sachin Rana, Mohammad Zunaid, Rajesh Kumar CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM. *Mater. Today Proc.* 2022; V 56. N 2. P. 637–644.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ СТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ГАЗА В ПРОФИЛИРОВАННЫХ ТРУБАХ

Л. Е. Осипов, Л. В. Плотников*,
К. О. Десятов, О. А. Плотников

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
** leonplot@mail.ru*

В данном исследовании рассматривается влияние геометрических (форма и площадь поперечного сечения) и режимных (скорость и масштаб турбулентности потока) факторов на коэффициент теплоотдачи при течении воздуха в прямолинейных трубах. Результаты исследования получены с помощью численного моделирования стационарных потоков газа в программной системе CFD (Computational Fluid Dynamics). Выявлено, что при увеличении скорости потока газа наблюдается рост (более чем в 2 раза) коэффициента теплоотдачи в исследуемых трубах. Показано, что масштаб турбулентности потока оказывает влияния на характер теплообмена в пределах ± 3,5 %. Установлено, что круглый канал в среднем на 5 % имеет выше коэффициент теплоотдачи в сравнении с профилированными трубами с одинаковым эквивалентным (гидравлическим) диаметром. Продемонстрировано значительное подавление интенсивности теплоотдачи вплоть до 50 % в треугольных и квадратных трубах, имеющих площадь поперечного сечения, равную круглому каналу. Полученные данные могут быть полезными при проектировании газовоздушных систем энергетических установок.

Трубопроводные системы с каналами различных поперечных сечений активно применяются в различных промышленных устройствах (энергетические машины, криогенная техника, нефтехимические установки и т.д.). Известно, что форма поперечного сечения канала оказывает существенное влияние на газодинамику и теплообмен потоков газа, что важно учитывать, в частности, при проектировании тепловых двигателей [1-3]. Поэтому получение новых данных о влиянии геометрических и режимных факторов на интенсивность теплоотдачи стационарных потоков воздуха в прямолинейных трубах посредством численного моделирования остается актуальной и важной задачей для развития науки и технологий.

В данной работе было исследовано 5 труб с разными геометрическими размерами. Базовый трубопровод имел круглое поперечное сечение с диаметром 42 мм (1). Также изучались квадратный и треугольный каналы с геометрией, выбранной исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра (квадрат – 42 мм (2) и треугольник – 72,75 мм (3)) и площади поперечного сечения (квадрат – 37,22 мм (4) и треугольник – 56,56 мм (5)). Длина всех труб составляла 1 м.

Рабочая среда математической модели – реальный газ. Физические свойства рабочей среды в каналах принимались для воздуха при 40 ºС. Стенки каналов были приняты непроницаемыми с постоянной температурой 120 ºС. Количество расчетных ячеек после построения объемной тетраэдрической сетки составляло более 2,5 млн. В математической модели использовалась LowRe k–ε модель турбулентности. При моделировании граничных условий на входе рабочей среды в каналы были заданы начальные параметры турбулентных вихрей (масштаб турбулентности *lm* от 10 до 30 %) и средняя скорость потока газа *w* от 10 до 100 м/с ($24\,000 < Re < 250\,000$).

Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2. Установлено, что в профилированных трубах при скоростях потока до 30 м/с наблюдается снижение

© Осипов Л. Е., Плотников Л. В., Десятов К. О., Плотников О. А., 2025

коэффициента теплоотдачи до 5 % в сравнении с базовым вариантом. Подобная закономерность имеет место для $w > 80$ м/с. В диапазоне скорости от 30 до 80 м/с повышение коэффициента теплоотдачи достигает 8 % в треугольной трубе (рис 1б). Это можно объяснить формированием вихревых структур и вторичных течений в углах каналов сложного поперечного сечения [4]. Выявлено существенное снижение коэффициента теплоотдачи (до 40 %) в профилированных трубах, имеющих равные площади поперечного сечения, по сравнению с базовым каналом. Определено закономерность изменения α вдоль длины трубопровода для разных условий (рис. 2).

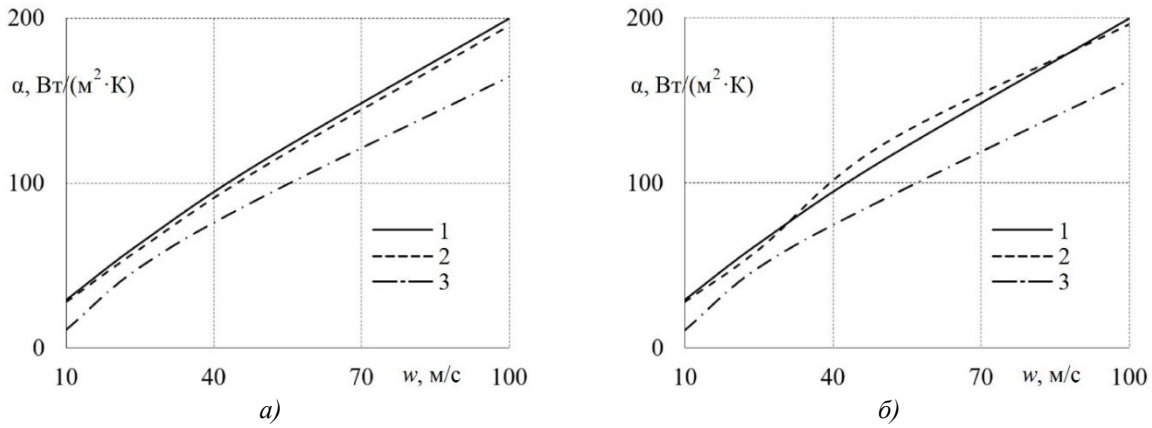


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока газа *w* при масштабе турбулентности *lm* = 30 % в квадратной (а) и треугольной (б) трубах для разных геометрических условий: 1 – базовый круглый канал; 2 – трубы с равными гидравлическими (эквивалентными) диаметрами; 3 – трубы с равными площадями поперечного сечения

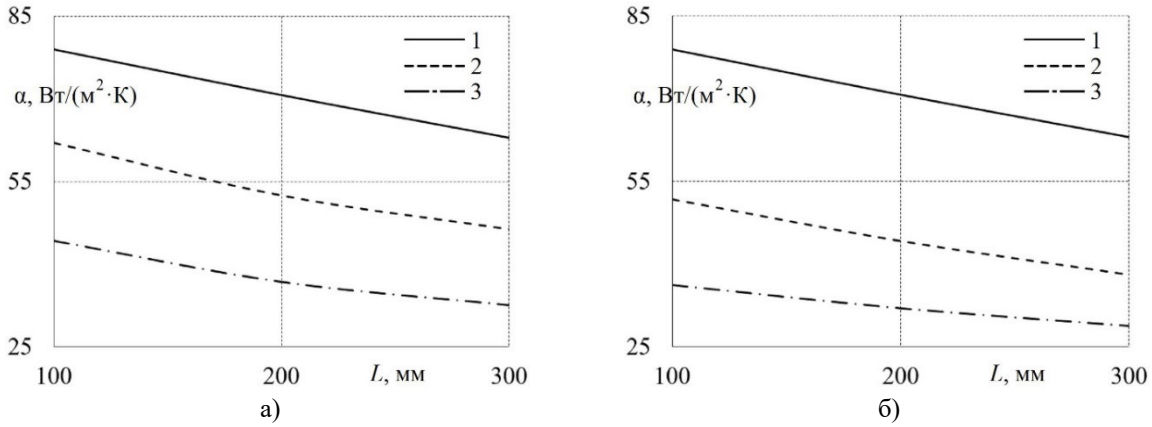


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от длины канала *L* для скорости потока 25 м/с при масштабе турбулентности *lm* = 10 % в квадратной (а) и треугольной (б) трубах для разных геометрических условий: 1 – базовый круглый канал; 2 – равные гидравлические (эквивалентные) диаметры; 3 – равные площади поперечного сечения

Основные выводы данного исследования состоят в следующем:

1. Влияние масштаба турбулентности на изменение коэффициента теплоотдачи в исследуемых каналах является незначительным (изменение α в пределах ± 3,5 %);

2. Выявлено, что значения α в круглом канале в среднем на 5 % выше в сравнении с профилированными каналами при условии равенства гидравлического диаметра;

3. Продемонстрировано значительное подавление коэффициента теплоотдачи (в среднем на 30 %) в треугольном и квадратном каналах, построенных при условии сохранения равенства площади поперечного сечения с базовой трубой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 25-19-00001.

Список источников

1. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.

2. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М. : МГТУ им. Баумана, 2016. 515 с.

3. Плотников Л. В., Жилкин Б. П., Бродов Ю. М. Экспериментальное исследование и совершенствование процессов газообмена поршневых и комбинированных ДВС в условиях газодинамической нестационарности // Известия вузов. Машиностроение. 2015. № 12 (669). С. 35–44.

4. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ

А. Б. Петух*, С. Ю. Шимченко

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. Петруся Бровки, д. 15
** alya.petukh.01@mail.ru*

В работе представлены результаты численного моделирования тепловых режимов высокотемпературной печи при функционировании горелочного устройства, в пламени которого происходит образование нано- и микрочастиц диоксида кремния при сжигании кремнийорганического вещества.

Возрастающие требования к увеличению производительности микросхем вызывают необходимость ухода рабочей длины волны излучения для формирования изображения в современных фотолитографах в глубокий ультрафиолет. Однако работа в этой области спектра накладывает весьма жесткие ограничения на качество стекла, из которого изготавливаются линзовые системы формирования изображения фотошаблона в фотолитографах. Применяемое оптическое стекло должно быть максимально однородным по составу и свойствам, иметь высокое пропускание и малое рассеяние в ультрафиолетовой области спектра, обладать низким коэффициентом температурного расширения, устойчивостью к механическим и кратковременным тепловым нагрузкам, лазерному излучению. Одним из наиболее эффективных методов получения высокочистого кварцевого стекла является высокотемпературное газопламенное осаждение [1]: внутри печи в пламени горелочного устройства происходит гидролиз кремнийорганического вещества с образованием диоксида кремния, молекулы которого конденсируются в нано- и микрокапли и затем осаждаются на поверхность. Если температура поверхности для осаждения частиц SiO_2 будет меньше температуры размягчения стекла 1850 К, то в результате будет образовываться не стекловидная масса, а белая сажа. Таким образом, цель данной работы заключается в определении температурного режима и возможности реализации процесса внутри макета печи. Численное моделирование тепловых и газодинамических процессов выполнено в программном пакете ANSYS Fluent с учетом реальных теплофизических и термодинамических свойств материалов и газов.

Трехмерная сеточная модель печи состоит из ячеек преимущественно тетрагональной и гексагональной форм. Общее количество ячеек составляет 7 200 000, минимальный размер – 0,2 мм и максимальный размер – 25 мм. Физико-математическая модель реализуется путем решения дискретных аналогов системы уравнений газовой динамики и теплопереноса, включающая в себя уравнения неразрывности, количества движения и энергии. Схема химической кинетики кремнийорганического вещества и метана содержит 5 химических реакций и 12 компонент.

При расчетах были смоделированы четыре сценария граничных условий, включая сток тепла через щели в теплоизоляции и нагрев внешней атмосферы:

а) температура окружающей атмосферы равномерно распределена и составляет 300 К;

б) условия, описанные в пункте «а», но с добавлением вертикальных щелей шириной 1,5 мм в местах стыков деталей. Это позволяет учесть неполное примыкание материала теплоизоляции друг к другу. Общая площадь щелей составляет 12 см^2;

© Петух А. Б., Шимченко С. Ю., 2025

в) условия, описанные в пункте «б» с учетом нагрева окружающей атмосферы вблизи дна печи до 950 К, что позволяет учесть ее нагрев за счет уноса горячих продуктов сгорания;

г) условия, описанные в пункте «в», с перепадом давления 5 Па на выходе из системы каналов (рис. 1, *4*) для реализации принудительного уноса продуктов сгорания системой вентиляции.

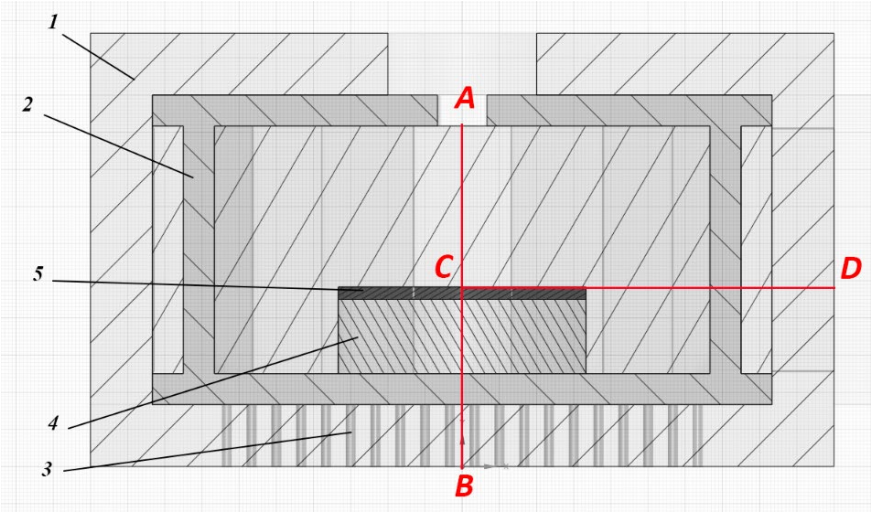
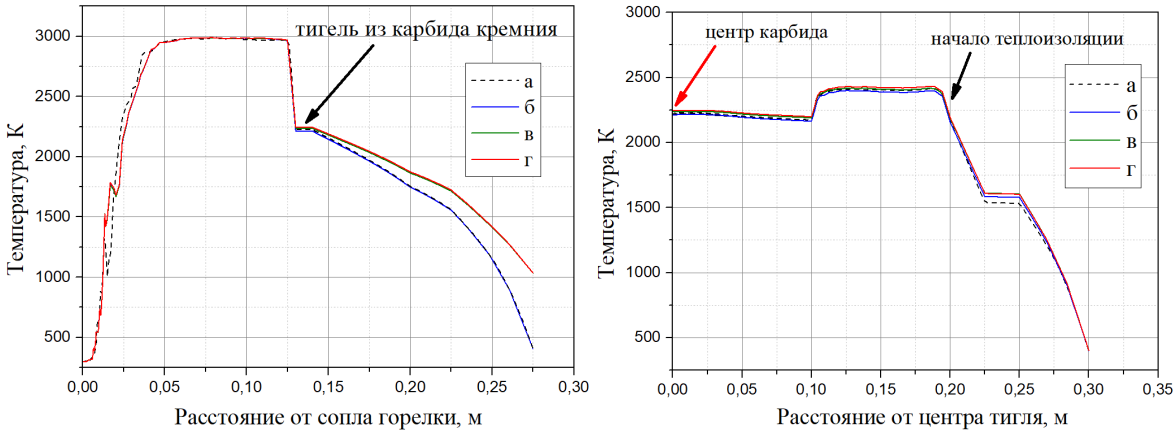


Рис. 1. Структура макета высокотемпературной печи: 1 и 2 – внешний и внутренний слои теплоизоляционного материала; 3 – система каналов для удаления продуктов сгорания; 4 – подставка для пластины, на которую осаждаются частицы диоксида кремния; 5 – пластина из карбида кремния

В результате численного эксперимента получены стационарные тепловая и газодинамическая картины режима работы печи при функционировании горелочного устройства. На рис. 2 представлены распределения температуры вдоль вертикальной (AB на рис. 1) и горизонтальной (CD на рис. 1) линий для различных вариантов постановки граничных условий. Видно, что температура в пламени метана и кремнийорганического вещества достигает 3000 К, на поверхности пластины из карбида кремния – 2250 К, температура внутри объема печи – 2400 К.



а *б*

Рис. 2. Распределение температуры вдоль линии: *а* – AB, *б* – CD

Результаты численного эксперимента демонстрируют, что принципиальная структура и выбранные материалы макета высокотемпературной печи, а также расходы реагирующих газов, поступающих в горелочное устройство, позволяют реализовать необходимые температурные условия для получения высокочистого кварцевого стекла методом газопламенного осаждения частиц на поверхность ванны расплава.

Список источников

1. Method of making fused silica by decomposing siloxanes: pat US RE39,535 E / Dobbins M. S., McLay R. E., Corning Incorporated. Publ. date 03.04.2007.

ОСНОВЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПОРОГОВЫХ СОСТОЯНИЙ БЕЗОПАСНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Н. Рогалев[1*], Р. В. Вензелев[2]

[1]Институт вычислительного моделирования
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
[2]АО «Красэко»
660049, Российская Федерация, Красноярск, пр. Мира, д. 10
** rogalyov@icm.krasn.ru*

В электроэнергетике возникли трудности: для выполнения расчетов, для исследований и даже для управления режимами энергосистем использовались иностранные программно-аппаратные комплексы, которые затем стали недоступны – прекратились продажи, остановилась поддержка. Появилась необходимость создавать цифровые двойники электроэнергетических систем. В докладе строятся принципы и алгоритмы создания цифрового двойника пороговых состояний безопасных энергетических систем. Особенно важны такие исследования для электроэнергетики Сибирского федерального округа.

На современном этапе развития человеческого общества топливно-энергетический комплекс и его электроэнергетика являются важными элементами промышленной инфраструктуры страны и обеспечивают цивилизованную жизнь всех граждан. Стремительное развитие технологий в XXI в. и быстрый рост энергопотребления в быту и промышленности сформировал новые глобальные вызовы для человечества, в которые входят вопросы безопасности электроэнергетики. Как отмечено в документах [1–3], следует уделить внимание следующим нерешенным вопросам: недостаточность инвестиций и, как следствие, высокий износ основных фондов (в среднем более 60 %), отсутствие производственных и сетевых мощностей во многих регионах страны; многолетнее техническое отставание в создании и развитии современных электросетевых технологий; нехватка квалифицированного персонала и снижение ответственности компании за обслуживание оборудования и надежность систем электроснабжения; слабая защищенность инфраструктуры страны, в т. ч. производства электроэнергии, от террористических атак.

Основываясь на коллективной монографии [4] общий подход к проблеме энергобезопасности, характеризующейся надежным, бесперебойным и эффективным распределением электроэнергии в любых условиях, основывается на оценивании предельных и допустимых состояниях энергосистемы, то есть множества электростанций, электрических и тепловых сетей, объединенных для производства, преобразования и передачи электроэнергии.

Принципиальным выводом из этих результатов является необходимость оценивать границы областей всех допустимых состояний технических систем, к которым принадлежат энергосистемы, что развивается в работах авторов доклада [5; 6].

Основную часть электрической и тепловой энергии в России производят тепловые станции (ТЭС) – около 68 %, атомные станции (АЭС) – 24 %, гидроэлектростанции – около 8 %. Такое неравенство в соотношениях выработки объясняется тем, что ТЭС отличие от ГЭС и АЭС не требует специальных условий. Особенностью энергосистемы Красноярского края является доминирование энергии гидроэлектростанций, на которую приходится 60 % выработки электроэнергии. На конец 2020 г. на территории Красноярского края (без учета зоны децентрализованного энергоснабжения) эксплуатировались 18 тепловых электростанций общей мощностью 8061,6 МВт и пять гидро-

© Рогалев А. Н., Вензелев Р. В., 2025

электростанций общей мощностью 10 083,2 МВт. В зоне децентрализованного энергоснабжения, охватывающей, полностью или частично, 11 муниципальных районов, эксплуатируется ряд дизельных электростанций.

Моделирование цифрового двойника пороговых состояний безопасных энергосистем, отражающее динамическое поведение различных компонентов, взаимодействующих в электрической сети, полезно для понимания некоторых наблюдаемых явлений, которые нелегко воспроизвести путем простых экспериментов. Важно отследить возможное появление некоторых очень низкочастотных колебаний (VFLO), которые не были объяснены или воспроизведены; например, VLFO в энергосистеме страны Колумбии были обнаружены в диапазоне 0,05 Гц, и причины их происхождения не выяснены [7].

Низкочастотные колебания ставят под угрозу безопасность работы электроэнергетической системы, ограничивая использование гидроэнергетических и тепловых энергетических станций. Одно из возможных объяснений состоит в неоднородности структуры электроэнергетической системы, нарушение когерентности движения генераторов в электромеханическом переходном процессе и статистическая неустойчивость под влиянием возмущающих воздействий.

Создание цифровых двойников пороговых состояний безопасных энергетических систем позволит воспроизвести колебательные наблюдения путем моделирования, оценить демпфирование колебательных режимов, учитывать влияние динамического поведения связанных систем и нелинейностей в их управлении. Представлена вычислительная методика для проведения оценок динамики частот многозональной энергосистемы с использованием теории анализа множеств достижимости.

С этой целью применяются различные модели энергосистем уменьшенного порядка для улучшения характеристики частот асинхронно связанных регионов и передачи энергии в синхронно связанных областях.

Для моделирования возмущения и параметры рассматриваются как принадлежащие неизвестным, но ограниченным множествам. Вычисляются границы, которые гарантированно содержат траектории включая непериодические траектории, переходящие в хаотические колебания. Хаос колебаний в электросети проявляется в случайном характере колебаний. Они имеют широкий непрерывный спектр вместо дискретного, как в периодическом случае. Кроме того, поведение системы становится столь чувствительным к начальным условиям, что долговременное прогнозирование точного решения становится невозможным.

Список источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р.

2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 31.12.2015 № 683.

3. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642.

4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ и обеспечение защищенности от чрезвычайных ситуаций : коллективная монография. М. : МГОФ Знание, 2021.

5. Rogalev A. N. Set of solutions of ordinary differential equations in stability problems // Continuum Mechanics, Applied Mathematics and Scientific Computing: Godunov's Legacy: A Liber Amicorum to Professor Godunov. 2020. Springer International Publishing. С. 307–312. eLIBRARY ID:47068620. EDN:LZYUWQ DOI: 10.1007/978-3-030-38870-6_40

6. Вензелев Р. В., Баранова М. П., Рогалев А. Н. Применение нейронных сетей и методологии поверхностей отклика для прогноза показателей плоскостного электрического контакта шин // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 23–29.

7. Villegas H. N. Pico and D. C. Aliprantis, “Reachability analysis of linear dynamic systems with constant, arbitrary, and Lipschitz continuous inputs,” Automatica. Sep. 2018. Vol. 95. Pp. 293–305.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА КОТЛА БКЗ-210-140 ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВОРОТНЫХ ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛОК

И. А. Рыжий

АО «Всероссийский теплотехнический институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корп. 1
ryzhy1987@mail.ru

Расчетные исследования на примере котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 показали, что при существующих колебаниях характеристик углей, сжигаемых на ТЭС, температура газов на выходе из топки котла может изменяться в широком диапазоне (более 100 °С). Использование поворотных горелок с возможностью регулирования вектора начального участка факела на ±15° позволяет в значительной степени решить данную проблему. Для полноценной оценки особенностей топочного процесса с применением поворотных горелок было выполнено моделирование работы котла в программе Ansys Fluent. Результаты моделирования показывают, что изменение вектора начального участка факела на ±15° позволяет обеспечить диапазон регулирования температуры газов на выходе из топки на уровне 100–120 °С.

Современная угольная ТЭС сталкивается с большим количеством проблем, одна из которых – значительный диапазон колебания характеристик поставляемого топлива. Это оказывает существенное влияние на топочный процесс: имеет место изменение температуры газов на выходе из топки в широком диапазоне, трудности с поддержанием стабильного значения температуры перегретого пара, шлакование поверхностей нагрева, ухудшение эффективности сжигания [1].

Анализ результатов расчета котла БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2 в программе Boiler Designer показал, что температура газов на выходе из топки при существенном изменении характеристик угля колеблется в диапазоне более 100 °С. Одним из способов нивелирования данного эффекта является реализация системы сжигания с применением поворотных горелок. По расчетам в Boiler Designer возможность регулирования вектора направления факела по высоте на ±15° позволит изменять значение температуры газов на выходе из топки в пределах 90–100 °С [2].

Для углубленной оценки особенностей топочного процесса с использованием поворотных горелок было проведено моделирование работы котла в программе Ansys Fluent. Для этого в программе Solid Works была разработана 3D-модель топки с горелочными устройствами и выполнено построение расчетной сетки модели. В дальнейшем в области расположения корня факела было выполнено сгущение сетки методом Sphere of Influence. Граничные условия задавались через локальные цилиндрические координаты и векторами. Для того чтобы корректно смоделировать горение топлива, было применен подход Multiple-Surface-Reaction с заданием кинетики горения углерода.

Горение углерода моделировалось с помощью следующих химических реакций:

$$C<S>+0.5O_2 = CO, \quad (1)$$

$$C<S>+CO_2 = 2CO, \quad (2)$$

$$C<S>+H_2O = CO + H_2, \quad (3)$$

где $C < S >$ – Содержание твердого углерода (carbon solid).

© Рыжий И. А., 2025

Также при моделировании задавались реакции горения водорода, монооксида углерода и летучих:

$$H_2+0.5O_2 = H_2O, \quad (4)$$

$$CO + 0.5\ O_2 = CO, \quad (5)$$

$$vol + a\ O_2 = b\ CO + c\ H_2O + d\ N_2 + e\ SO_2, \quad (6)$$

где vol – Летучие компоненты топлива (volatiles), a, b, c, d, e – Стехиометрические коэффициенты.

Кроме того, в программу вводились основные параметры указанных реакций: энергия активации и предэкспоненциальный множитель (табл. 1).

Таблица 1

Параметры реакций (4)-(6)

Номер реакции	Параметр реакции	
	Энергия активации (E_a), Дж/кмоль	Предэкспоненциальный множитель (k)
4	$3{,}1 \times 10^7$	$9{,}87 \times 10^8$
5	$1{,}7 \times 10^8$	$2{,}239 \times 10^{12}$
6	$2{,}027 \times 10^8$	$2{,}119 \times 10^{11}$

Для моделирования радиационного теплообмена использовалась модель Discrete Ordinates, которая является наиболее точной и подходит для всех условий и толщины излучающего слоя. Выход летучих моделировался по закону Аррениуса со стандартными настройками по энергии активации и предэкспоненциальному множителю. Скорости, гидравлические диаметры и прочие параметры рассчитывались исходя из фактических данных по горелкам и котельной установке.

Анализ результатов моделирования показывает, что использование новых горелок на котле приводит к повышению эффективности сжигания за счет улучшения аэродинамической картины в топке и снижения потерь с недожогом. Изменение вектора начального участка факела на ±15° позволяет обеспечить диапазон регулирования температуры газов на выходе из топки на уровне 100–120 °С (рис. 1).

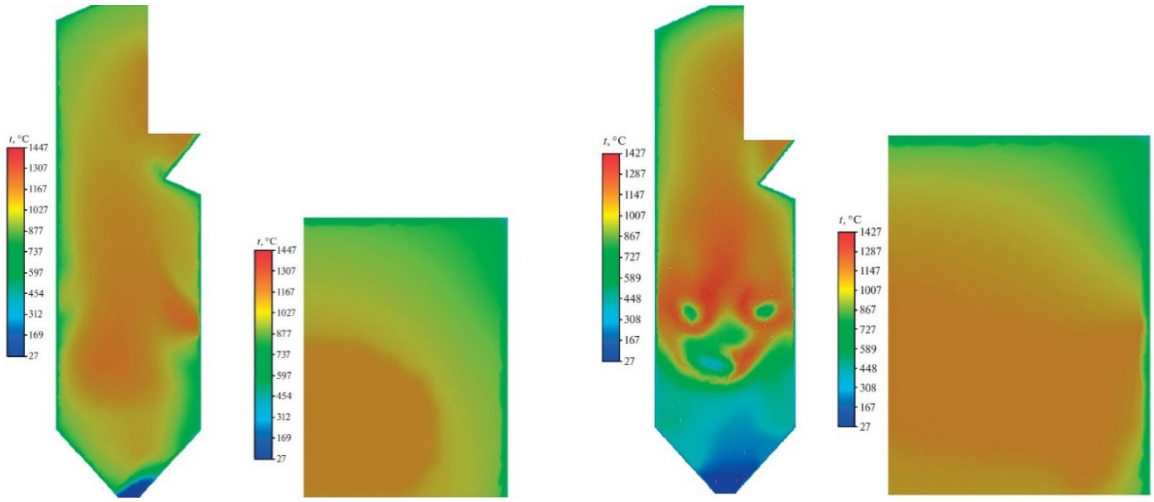


Рис. 1. Поля температур газов в поперечном сечении и в выходном окне топки (слева – при угле поворота горелки 0°, справа – при угле поворота горелки +15°)

Головной образец поворотной горелки был изготовлен ОАО «ВТИ» и установлен на котле БКЗ-210-140 Томской ГРЭС-2. Предварительные испытания котла, выполненные в 2024 г, показали, что применение даже одной поворотной горелки (всего на котле 6 горелок) позволяет существенно влиять на уровень температур газов.

Список источников

1. Рыжий И. А., Штегман А. В., Сосин Д. В., Натальин А. С. Исследование влияния положения факела в топке на режим работы пылеугольного котла // Теплоэнергетика. 2024. № 4. С. 52–61.

2. Рыжий И. А., Штегман А. В., Сосин Д. В., Натальин А. С. Описание конструкции и моделирование работы вихревой поворотной горелки при сжигании угля и природного газа // Теплоэнергетика. 2024. № 8. С. 82–94.

ВЛИЯНИЕ ВХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА АВТОКОЛЕБАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОТКРЫТОЙ ПОЛОСТИ

Н. Г. Иванов*, М. А. Засимова, В. В. Рис

Санкт Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
** ivanov_ng@spbstu.ru*

На основе 3D URANS подхода численно исследуется распространение одиночной плоской турбулентной струи в ограниченном вентилируемом пространстве для условий, в которых могут развиваться ее крупномасштабные автоколебания. Для базовой геометрической конфигурации при значении числа Рейнольдса 4×10^3, что соответствует условиям эксперимента Матауи с соавторами (2001), получены согласующиеся с экспериментальными данными значения частоты автоколебаний струи. Выполнено параметрическое исследование условий подачи струи на частоту автоколебаний: число Рейнольдса варьируется в диапазоне $(0.5\ldots12)\times10^3$ за счет изменения высоты приточного щелевого отверстия и скорости подачи струи. Показано, что при фиксированном размере входного отверстия изменение скорости подачи струи практически не влияет на безразмерную частоту автоколебаний. Число Струхаля, однако, существенно изменяется с ростом высоты щели при фиксированном значении числа Рейнольдса.

В докладе представляются результаты трехмерного моделирования распространения турбулентной струи, вытекающей из щелевого отверстия в прямоугольную полость с открытой границей. Воздух поступает в полость из центрированного по высоте выдвинутого внутрь полости подводящего устройства, оканчивающегося плоской щелью высотой h, протяженность щели совпадает с шириной полости. В эксперименте [1] высота щели составляла $h_0 = 0.01$ м, размеры полости $H\times W\times L = 20h_0\times20h_0\times50h_0$. В настоящем исследовании высота щели варьировалась в диапазоне $(0.5\ldots3)\times h_0$, см. рис. 1, б. Полость сообщается с окружающим пространством через протяженные открытые участки (прямоугольные окна), расположенные выше и ниже подводящего устройства (рис. 1, а). Для обеспечения свободного истечения воздуха из полости ее открытые границы сообщаются с окружающим пространством, которое имитирует протяженная область с поставленным на внешней границе мягким граничным условием (заданным постоянным давлением). На срезе приточного щелевого отверстия задавалась постоянная скорость V (в эксперименте [1] значение скорости составляло 6 м/с, что соответствует $Re_h = 4\times10^3$).

Численное моделирование движения вязкой несжимаемой среды (воздуха) с постоянными физическими свойствами выполнялось в вычислительном пакете ANSYS Fluent. Трехмерное турбулентное течение описывалось нестационарными осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса (URANS подход), замкнутыми полуэмпирической моделью турбулентности k-ω SST. Применялись схемы дискретизации второго порядка по пространству и времени. Размерность расчетных сеток составляла более 3 млн ячеек. Результаты получены с использованием вычислительных ресурсов СКЦ «Политехнический».

Для базовой геометрической конфигурации полости по результатам расчетов в согласии с экспериментальными данными [1] получены режимы течения с автоколебаниями струи. Струя как единое целое поочередно отклоняется к верхней и нижней стенкам, при этом в осредненном по времени поле скорости струя направлена по нормали к приточному отверстию (рис. 1, а), за период колебаний T при этом принимается промежуток времени между следующими друг за другом положениями струи у одной

© Иванов Н. Г., Засимова М. А., Рис В. В., 2025

и той же стенки. Полученные в 3D URANS расчетах амплитуда и период колебаний удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

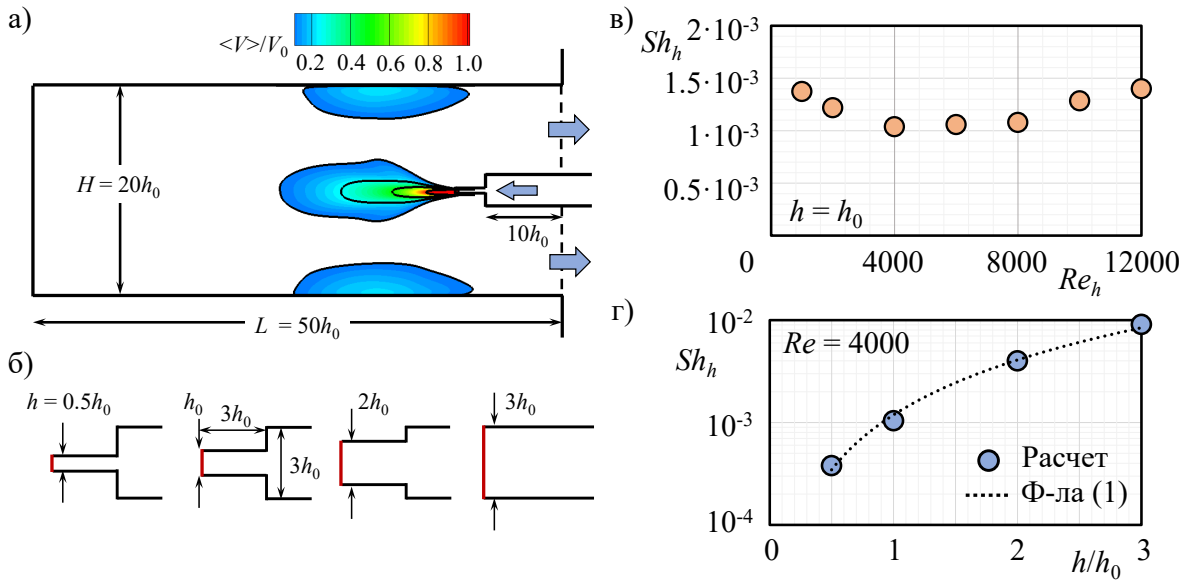


Рис. 1. Осредненное поле скорости, полученное для исходной конфигурации полости (а), расчетные конфигурации с разной высотой щели (б), зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса при фиксированной высоте щели (в), зависимость числа Струхаля от высоты щели при фиксированном значении числа Рейнольдса (г)

Количественно автоколебания можно охарактеризовать значением числа Струхаля, для которого в настоящем исследовании в качестве линейного масштаба была принята высота щели, $Sh_h = f \cdot h/V$, где $f = 1/T$– частота автоколебаний. Результаты параметрических расчетов для базовой геометрической конфигурации, в которых значения числа Рейнольдса варьировались в диапазоне $(1\ldots12)\times10^3$, представлены на рис. 1, в. Видно, что при фиксированном размере входного отверстия изменение скорости подачи воздушной струи в рассмотренном диапазоне оказывает слабое влияние на число Струхаля. Такая же тенденция наблюдалась и для других значений высоты входной щели.

Как видно из рис. 1, г, в случае увеличения высоты приточного отверстия при фиксированном значении числа Рейнольдса (то есть при фиксированном расходе приточного воздуха) число Струхаля заметно растет. Изменение числа Струхаля при этом можно описать следующей формулой:

$$Sh_h = 0.0012\,(h/h_0)^{1.78}, \qquad (1)$$

которая справедлива и для других значений Re_h из рассмотренного диапазона.

При переходе к размерным значениям частоты автоколебаний, которые важны при анализе параметров комфорта, находящихся в вентилируемом помещении людей, наблюдаются противоположные тенденции. Для рассмотренных геометрических конфигураций при фиксированном размере входного отверстия с изменением расхода значения f меняются более, чем на порядок. Напротив, при фиксированном расходе приточного воздуха размерная частота автоколебаний с изменением высоты входного отверстия практически не меняется.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00437.

Список источников

1. Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling // Flow, Turbulence and Combustion, 2001, vol. 67, pp. 267–304.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА ПРИ ФТОРИРОВАНИИ ЭТИЛЕНА И ФТОРЭТАНОВ ТРИФТОРИДОМ КОБАЛЬТА

Е. В. Садикова[1, 2*], Д. С. Пашкевич[1, 2], В. В. Капустин[1, 2, 3], Т. А. Федорова[1, 2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
[2]ООО «Аврора Кемикалс»
636000, Российская Федерация, Северск, Автодорога, д. 14/19, стр. 73, 12
[3]Акционерное общество «Российский научный центр „Прикладная химия (ГИПХ)“»
193232, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Крыленко, д. 26а
** sadikova_ev@mail.ru*

Для высокоэкзотермического процесса получения гексафторэтана, вещества термодинамически не равновесного в условиях его синтеза фторированием этилена трифторидом кобальта, расчетами на основании теории теплового взрыва Д. А. Франк-Каменецкого определены области изменения параметров (характерный размер переноса энергии, давление, теплопроводность, коэффициент теплоотдачи, температура стенки), при которых реализуется стационарный тепловой режим фторирования. Для проведения этих расчетов на основе экспериментальных литературных данных были построены кинетические модели процессов фторирования этилена и фторэтанов CoF_3.

Гексафторэтан CF_3-CF_3 (далее ГФЭ) находит широкое применение при производстве микроэлектронных компонентов в качестве летучего нетоксичного носителя фтора для «сухого» травления кремния и его соединений при создании рельефа (рисунка) микросхемы.

Одним из способов получения ГФЭ является фторирование этилена трифторидом кобальта:

$$H_2C{=}CH_{2\,газ} + 10CoF_{3\,тв} \rightarrow F_3C\text{-}CF_{3\,газ} + 4HF_{газ} + 10CoF_{2\,тв} - 1.19\ МДж. \qquad (1)$$

Этот процесс характеризуется высоким тепловыделением – адиабатическая температура продуктов достигает 1035 К при начальной температуре 200 ºС, которую рекомендуют задавать на стенке реакционного сосуда для достижения технологически приемлемой скорости фторирования [1].

Расчетами показано, что в системе элементов Co-F-C-H во всем реальном диапазоне изменения температуры в термодинамически равновесной смеси, когда количество атомов фтора больше количества атомов водорода, присутствует единственный фторуглерод – CF_4, а C_2F_6 в этой смеси отсутствует. Т.е. ГФЭ в условиях его синтеза методом (1) термодинамически не стабилен. Из литературных данных известно, что при температуре выше 400-500 ºС существенно увеличивается скорость фторирования трифторидом кобальта углеродной связи в молекулах фторэтанов с образованием фторметанов.

Поэтому зону реакции (1) нужно охлаждать, стараясь не допустить в ней развития теплового взрыва (режима горения), т.е. проводя фторирование в стационарном тепловом режиме, или снижая максимальную температуру во фронте фильтрационного горения и сокращая время пребывания фторируемого вещества в высокотемпературной зоне.

© Садикова Е. В., Пашкевич Д. С., Капустин В. В., Федорова Т. А., 2025

Также расчетами было показано, что в термодинамически равновесной смеси веществ в системе элементов Co-3F при температуре ниже 800 К (при которой обычно проводят фторирование углеводородов трифторидом кобальта) концентрации газообразного CoF_3, молекулярного и атомарного фтора пренебрежимо малы и, следовательно, фторирование газообразных веществ CoF_3 является топохимическим процессом.

Для определения условий, при которых в процессе (1) в цилиндрическом реакторе реализуются стационарный и нестационарный тепловые режимы фторирования целесообразно использовать теорию теплового взрыва Д. А. Франк-Каменецкого [2].

Использование этой теории предполагает знание кинетических закономерностей исследуемых экзотермических реакций. Поэтому на основе экспериментальных литературных данных [3-4] по скорости фторирования этилена и фторэтанов CoF_3 в изотермических условиях были построены кинетические модели этих процессов.

Было показано, что при проведении (1) имеют место два принципиально различных химических превращения – эндотермическое присоединение фторида водорода к этилену с образованием монофторэтана

$$H_2C{=}CH_{2\,газ} + HF_{газ} \rightarrow H_3C\text{-}CFH_{3\,газ} - 0.05\ МДж \qquad (2)$$

энергия активации которого составляет величину около 100 кДж/моль; и высокоэкзотермическое водородзаместительное фторирование фторэтанов, лимитирующей стадией в котором является перенос атома фтора через слой дифторида кобальта к границе раздела фаз, энергия активации которого меняется от 18 до 42 кДж/моль.

Для построенных кинетических моделей водородзаместительного фторирования фторэтанов были рассчитаны критические диаметры цилиндра, в котором фторирование протекает в стационарном тепловом режиме, и времена индукции адиабатического теплового взрыва для реакции фторирования монофторэтана трифторидом кобальта с получением ГФЭ

$$H_3C\text{-}CFH_{2\,газ} + 10CoF_{3\,тв} \rightarrow F_3C\text{-}CF_{3\,газ} + 5HF_{газ} + 10CoF_{2\,тв} - 1.24\ МДж \qquad (3)$$

для различных теплофизических и технологических параметров, а также различных кинетических моделей.

Было показано, что при давлении монофторэтана порядка 38 атм, при котором реализуется стехиометрия процесса (3), при теплопроводности порошка CoF_3 0.081 Вт/(м·К) и температуре стенки цилиндра 150–250 °С его критический диаметр составляет величину порядка 10^{-3} м. Таким образом, в реакторе опытно-промышленного масштаба (диаметр порядка 10^{-1} м и выше) процесс (3) будет протекать в нестационарном тепловом режиме (режиме теплового взрыва), в котором максимальная температура будет близка к адиабатической и вероятность деструктивного фторирования фторэтанов высока.

Для реализации (3) в стационарном тепловом режиме, режиме близком к изотермическому, при диаметре цилиндра порядка 10^{-1} м и выше указанной температуре стенки процесс нужно проводить при давлении фторируемых фторэтанов порядка 1 атм и теплопроводности реагирующей смеси порядка 10 Вт/(м·К). Такая теплопроводность может быть достигнута путем формирования в порошке CoF_3 высокотеплопроводной газопроницаемой структуры, например, из алюминия.

Достичь высокого значения теплового потока из зоны реакции в фазовой системе газ-твердое можно также перемешивая порошок. В цилиндре диаметром порядка 10^{-1} м стационарный тепловой режим проведения (3) при $T_{ст}$ = 150–250 °С реализуется при давлении порядка 1 атм и значении коэффициента теплоотдачи на поверхности ци-

линдр порядка 100 Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$. Такие значения α, согласно литературным данным, могут быть достигнуты в динамических слоях порошка фторидов кобальта.

Для (3) при температуре стенки 50–500 ºС значения времени индукции адиабатического теплового взрыва составили 10^4–10^{-1} с соответственно. Эти значения времени по порядку величины совпадают с характерными временами фторирования этилена трифторидом кобальта в изотермических условиях с получением ГФЭ.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 24-91-18003.

Список источников

1. Асович В. С., Корнилов В. В., Максимов Б. Н. Фторирование этилена высшими фторидами кобальта. марганца. церия. ЖПХ. 1994. Т. 67. № 1. С. 107–110.

2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987.

3. Пашкевич Д. С., Костяев Р. А. Десорбция продуктов реакции в процессе фторирования этилена трифторидом кобальта. ЖПХ. 1994. Т. 67. № 10. С. 1624–1629.

4. Костяев Р. А., Пашкевич Д. С. Роль фтороводорода и дифторида кобальта в процессах фторирования углеводородов трифторидом кобальта. ЖПХ. 1994. Т. 67. № 12. С. 2012–2016.

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЦИФРОВОГО ПРОДУКТА РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ

А. М. Хизбуллин, А. В. Будников,
Д. Н. Свешников, С. Е. Фильченков, Д. П. Богатырев

АО «ОКБМ Африкантов»
Российская Федерация, Нижний Новгород

В докладе приведен опыт внедрения отечественной программы FRONT2, разработки ОКБМ, для решения связанной задачи расчетного обоснования ресурса оборудования РУ.

В ОКБМ для расчетов гидродинамики и теплопроводности стенки применяется код FRONT2 и программы трехмерного теплогидравлического расчета (CFD): Ansys CFX, Star CCM+. Программа FRONT2 является основным расчетным кодом при расчетном обосновании трубопроводного оборудования проектов корабельных и судовых РУ.

В отличие от CFD программы FRONT2 использует двумерные расчетные сетки для описания теплопроводности стенки и одномерные для описания гидродинамики потока, что позволяет затрачивать значительно меньше времени по сравнению с CFD-расчетом.

Делается акцент на том, что при использовании кода важно, чтоб он был встроен в сквозную технологию расчета теплогидравлики – НДС – накопление повреждений. Для этого необходимо, чтобы:

– результаты расчета по коду не противоречили результатам CFD расчетов;
– имелся интерфейс с CAD программой;
– имелся интерфейс с программой расчета НДС в 2D постановке;
– имелся интерфейс с программой расчета НДС 1D постановке.

Для подтверждения этого в докладе приводятся примеры работы с CAD системой, программой расчета НДС и приводится сравнение результатов, полученных по FRONT2 и CFD программе при расчете реальной конструкции фрагмента трубопровода системы компенсации давления судовой установки. Это позволяет широко использовать код для обоснования модернизированных плавучих энергоблоков (МПЭБ) с РУ РИТМ-200С, атомной станции малой мощности (АСММ) с РУ РИТМ-200Н, ледокола ЛИДЕР с РУ РИТМ-400.

© Хизбуллин А. М., Будников А. В., Свешников Д. Н., Фильченков С. Е., Богатырев Д. П., 2025

СЕТОЧНАЯ СХОДИМОСТЬ В РАСЧЕТАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ПОДЪЕМА

М. Н. Сыралёва, Д. В. Багаев*

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44
**d_bagaev@ksrc.ru*

Настоящая работа посвящена исследованиям распространения выхлопных газов в части корректности предсказания размера и формы теплового пятна и распределения концентрации выхлопных газов в струе.

Исследования проводились на схематизированной постановке с учетом реального перепада температур и геометрии выхлопной трубы судна классической формы без учета надстроек и геометрии самого судна. Исследованы влияния граничных условий на распространение дыма на различном удалении от выхлопной трубы. Произведены поисковые исследования минимально необходимого сеточного сгущения в зоне распространения выхлопных газов. Пример сеточной сходимости по концентрации газовой взвеси в 10 контрольных точках показан на рисунке 1. Контрольные точки выбраны таким образом, чтобы они не попадали в зону максимальной концентрации выхлопного газа, а располагались на расстоянии 10 метров вдоль струи с максимальной концентрацией по горизонтали и от уровня земли до высоты 10 метров с шагом 1 метр, так как определение размера санитарно-защитной зоны производится по минимальным концентрациям выхлопных газов. Исследования производились в коммерческом пакете численного моделирования как с использованием к-ω SST-модели турбулентности, так и с применением вихреразрешающих методов. Произведено сравнение результатов, полученных этими методами, и выбран оптимальный подход к решению описанной задачи. Распределение концентрации газа в воздухе показано на рисунке 2.

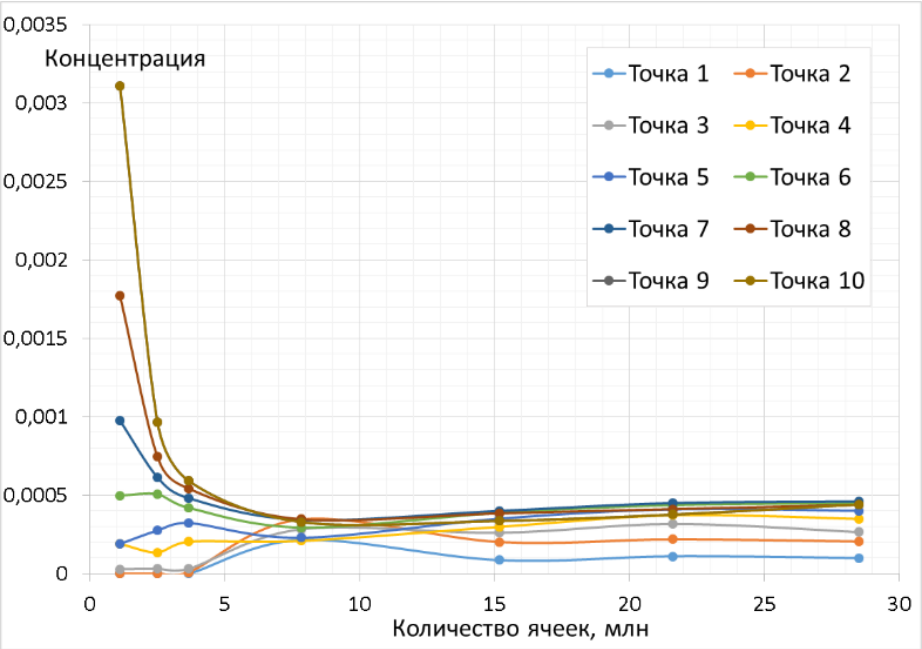


Рис. 1. Сеточная сходимость в контрольных точках

© Сыралёва М. Н., Багаев Д. В., 2025

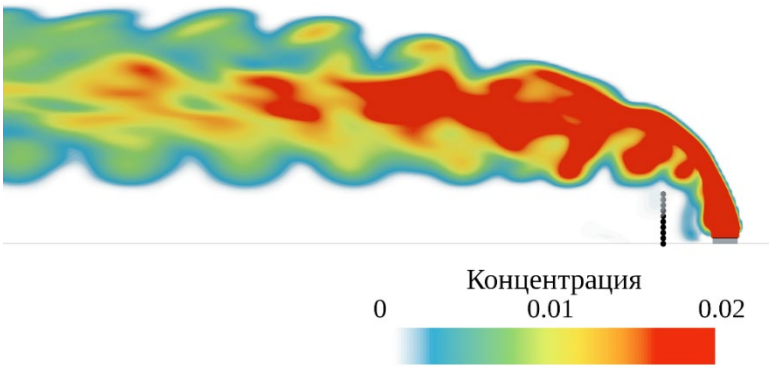


Рис. 2. Распределение концентрации газа

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Н. Ф. Кашапов[1], А. Д. Хафизова[2], В. Ю. Чебакова[2,3*], Е. В. Чебакова[2]

[1] ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31
[2]Казанский федеральный университет
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
[3] Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Баумана, д. 20
** vchebakova@mail.ru*

Целью работы является исследование приэлектродных процессов в щелочных электролитах, построение численного алгоритма для нахождения констант скоростей стадийных приэлектродных реакций и их интеграция в математическую модель, описывающую пространственные распределения внутренних характеристик гетерогенных систем в межэлектродном пространстве.

Электрохимия растворов, несмотря на большую историю применения электролизеров, активно затрагивает новые области развития технологий. Новую жизнь технологиям получения водорода дал курс на переход к альтернативной энергетике и, в частности, к водородной. Развитие ветровых и солнечных электростанций обозначило проблему выпрямления подачи электроэнергии, одним из способов ее решения являются проточные редокс-накопители, основанные на принципе электрохимического взаимодействия редокс-пар (проточные редокс-батареи, проточные гибридные накопители, нейтрализационные проточные накопители и т. д.). Гибридная проточная батарея использует один и более электропроводящих компонентов, оседающих как твердый слой. В этом случае гальванический элемент содержит один электрод батареи и один электрод топливного элемента. Этот тип ограничен в производстве энергии из-за площади поверхности электрода, кроме того, ему свойственен и ряд технологических проблем (например, для цинковых батарей – неравномерное осаждение цинка, выделение водорода, пассивация поверхности). Однако из-за распространенности использующихся элементов данной гетерогенной системы (электролитов, электродов) этот тип приобретает популярность для разработки технологий. Так разрабатываются гибридные накопители на основе цинка.

Цинковые батареи различают по следующим типам: органические, гелевые электролиты и водные, которые, в зависимости от pH, в свою очередь делят на щелочные, нейтральные и кислые. В работе [1] приведено более 30 вариантов состава катода с использованием мягких водных электролитов для цинкового анода и кислого электролита, приведены общие реакции для марганцевых и кобальтовых батарей. В работе [2] дан обзор щелочных цинковых батарей, отмечено, что они обладают высокой энергетической плотность, показаны сравнительные характеристики Zn-воздушных, Zn-серебряных, Zn-марганцевых, Zn-никелевых, Zn- кобальтовых батарей, приведены комплексные реакции. В качестве электролита в представленных батареях взят гидроксид калия.

В работе [3] рассмотрена возможность создания топливных элементов на основе образования водорода в результате реакции между алюминием и водой, в частности активирование алюминия добавлением щелочных растворов, оценено влияние присадок на характеристики генерации водорода. Обсуждаются водородные генераторы, ос-

© Кашапов Н. Ф., Хафизова А. Д., Чебакова В. Ю., Чебакова Е. В., 2025

нованные на реакции между алюминием и водой, а также предлагаются некоторые рекомендации по развитию данных технологий. В работе [4] рассмотрены алюминиево-воздушные аккумуляторы, где составной частью является наличие электролита. Среди водных электролитов чаще всего рассматриваются щелочные растворы из-за более высокого теоретического потенциала ячейки и более высокой достижимой мощности, чем нейтральные или кислотные растворы.

В данном исследовании проведено моделирование электролиза раствора КОН с учетом электрохимических реакций. Разработан численный алгоритм решения одномерной задачи, который содержит в себе возможность решения кинетической задачи на поверхности раздела металлический электрод – жидкий электролит. Данный алгоритм состоит из двух блоков. Первый блок является самостоятельной задачей по поиску констант скоростей процессов и представляет решение «0» мерной задачи. Результаты расчетов первого блока дают скорости констант стадийных реакций путем решения обратной кинетической задачи модифицированным методом прямого поиска решения оптимизационной задачи. Далее эти данные можно использовать либо для решения задачи прогнозирования выхода путем прямого решения системы кинетических уравнений, либо для расчета пространственных характеристик во втором блоке алгоритма. Кинетические задачи позволяют оценить вклады приэлектродных процессов и построить первоначальный прогноз выделения газа. Метод, применяемый в первом блоке, описан и верифицирован в работах [5–7]. Второй блок представляет собой решение начально-краевых и краевых задач в «одномерном» приближении. Разностные схемы решения данных задач строились интегро-интерполяционным способом для равномерной сетки. Расчеты, проводимые для верифицирования алгоритма, по количеству выделенного газа показали хорошее схождение как на катоде, так и на аноде. Расчет пространственных характеристик показал характерные градиенты, т. е. хорошее качественное схождение.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Список источников

1. Zeng X., Hao J., Wang Z., Mao J., Guo Z. Recent progress and perspectives on aqueous Zn-based rechargeable batteries with mild aqueous electrolytes// Energy Storage Materials. 2019. Vol. 20. Pp. 410–437.

2. Qiu D., Li B., Zhao Ch., Dang J., Chen G., Qiu H., Miao H. A review on zinc electrodes in alkaline electrolyte: Current challenges and optimization strategies// Energy Storage Materials. 2023. Vol. 61. Art. 102903.

3. Buckingham R., Asset T., Atanassov P. Aluminum-air batteries: A review of alloys, electrolytes and design // Journal of Power Sources. 2021. Vol. 498. Art. 229762

4. Ruth St., Chan Y. P., Pragati A. Sh., Ebrahim Al., Nilesh R. Ch., Tae J. P. Aqueous aluminum ion system: A future of sustainable energy storage device // Energy Storage Materials. 2024. Vol. 68. Art. 103336.

5. Kashapov L. N., Kashapov N. F., Chebakova V. Yu., Chebakova E. V. Mathematical modeling of cathodic zinc electroextraction processes // Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2023. Vol. 16. N 5. Pp. 572–582.

6. Кашапов Р. Н., Кашапов Л. Н., Кашапов Н. Ф., Чебакова В. Ю. Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 6. С. 869–876.

7. Кашапов Л. Н., Кашапов Н. Ф., Чебакова В. Ю., Чебакова Е. В. Математическое моделирование катодных процессов электроэкстрации цинка // Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием / отв. за выпуск Д. В. Платонов. Красноярск, 2023. С. 413–415.

Секция 7
Задачи теплообмена в радиоэлектронике и космических аппаратах

ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. Г. Бобылев*, А. В. Павлов,
С. В. Андрейко, В. Ю. Митяков, С. З. Сапожников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б
** pavel_b.g.97@mail.ru*

В работе приведены результаты исследования теплообмена при кипении насыщенной воды на оребренной поверхности в большом объеме. На поверхности ребра одновременно могут существовать различные режимы кипения. Сложность исследований заключается в отсутствии первичных преобразователей, которые позволяют измерять в нестационарном решении местную плотность теплового потока. В работе гетерогенные градиентные датчики теплового потока установлены под поверхностью теплообмена. Это позволило измерить плотность теплового потока как при кипении на свободной оребренной поверхности, так и на оребренной поверхности с ограничителем потока, который позволил интенсивнее отводить пароводяную смесь от поверхности нагрева, увеличив отводимый тепловой поток на 35 %.

Развитие технологий микроэлектроники и силовой электроники требует модернизации систем охлаждения для обеспечения оптимальных температурных режимов [1]. При разработке современных систем охлаждения применяют различные способы управления тепловым потоком, в т. ч. искусственное создание дополнительной циркуляции охлаждающей жидкости [2]. При этом без определения плотности теплового потока (ПТП) при кипении оценить эффективность того или иного способа интенсификации невозможно.

Основным методом исследования в данной работе является градиентная теплометрия. Методика основана на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоЭДС [3]. В анизотропной среде, через которую проходит тепловой поток, возникает поперечная термоЭДС, связанная с проходящей через датчик ПТП соотношением:

$$q = \frac{E}{S_0 \cdot A}, \text{ Вт/м}^2, \tag{1}$$

где q – ПТП, Вт/м^2; E – термоЭДС, мВ; A – площадь ГДТП в плане, м^2; S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт.

Экспериментальная установка моделирует систему пассивного охлаждения «силового модуля». Стенд состоит из емкости объемом 5 л, модели исследуемой поверхности, основного и охранного нагревателей. В основании емкости выполнено квадратное отверстие 30 × 30 мм для ввода модели. К исследуемой поверхности снизу закреплен основной нагреватель, на верхнем торце которого в выборке 5 × 5 × 0,4 мм установлен ГГДТП размером 3 × 3 × 0,3 мм. Вблизи ГГДТП заделан спай термопары хромель-копель (ТХК). В качестве исследуемого образца использован диск из дюралюминия с пятью ребрами высотой 20 мм, толщиной 1,5 мм и межреберным зазором 5 мм.

На исследуемый образец установлен ограничитель потока из листовой нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, с варьируемой высотой нижнего зазора h = 2,5–6 мм. ГГДТП фиксирует ПТП, проходящую от нагревателя к поверхности теплообмена, а термопара – температуру «силового модуля». Еще одна термопара ТХК измеряет

© Бобылев П. Г., Павлов А. В., Андрейко С. В., Митяков В. Ю., Сапожников С. З., 2025

температуру воды. Данные с ГГДТП и термопар записываются с помощью ИВК NIPXI-1050 с частотой записи 5000 изм/с.

На рис. 1 представлена схема экспериментального участка с установленными ГГДТП и термопарами.

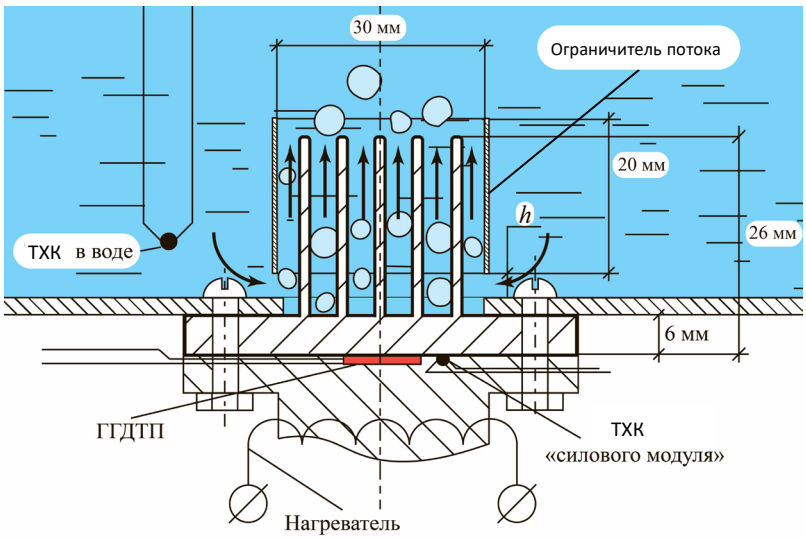


Рис. 1. Схема экспериментального участка

Результаты эксперимента для свободной оребренной поверхности и оребренной поверхности с ограничителем потока сравнивались с результатом на горизонтальной пластине (рис. 2).

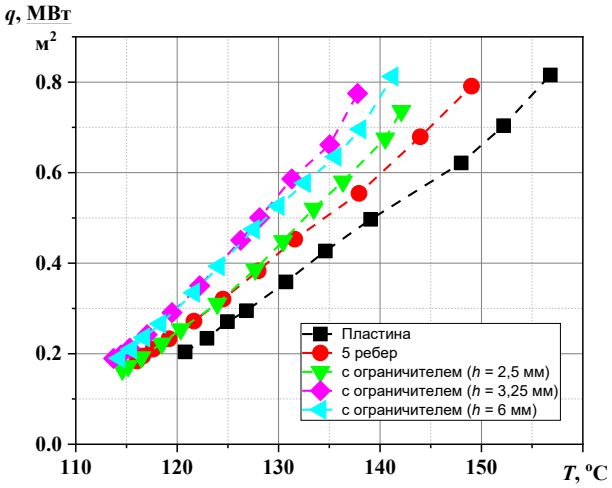


Рис. 2. Связь эффекта охлаждения с отводимым тепловым потоком

Обнаружен зазор h = 3,25 мм, который максимально снижает температуру моделируемого «силового модуля» по сравнению с гладкой поверхностью (с 156 до 137 °С) при отводимой ПТП 0,8 МВт/м^2.

Использование ограничителя потока позволяет регулировать естественную циркуляцию жидкости и управлять как отводимым тепловым потоком, так и температурой

силового модуля. Полученный результат дает основания проводить дальнейшие исследования в данном направлении.

Список источников

1. Simiao Fan, Fei Duan. A review of two-phase submerged boiling in thermal management of electronic cooling / Int. J. Heat Mass Transf., № 150 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119324

2. L. Yuan, F. Hong, P. Cheng. Pool boiling enhancement through a guidance structure mounted above heating surface/ Int. J. Heat Mass Transf., № 139, pp. 751-763, 2019.

3. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V. Heatmetry: The science and practice of heat flux measurement. / St.-Petersburg: Springer, 2020.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МИКРОТЕПЛООБМЕННИКОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОТОКА ХЛАДАГЕНТА В НИХ НА ПРИМЕРЕ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ

К. А. Галиева*, И. Ш. Гарифуллин, О. А. Солнышкина

Уфимский университет науки и технологии
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32
** espscnart@gmail.com*

Микрофлюидные платформы находят широкое применение в биохимии, медицине, нефтегазовой промышленности, также одной из современных и актуальных задач является конструирование микротеплообменников. В рамках данной работы проведены лабораторные эксперименты на нескольких конфигурациях микрофлюидных чипов с применением методов оптической микроскопии и трассерной визуализации потоков. Изучено влияние структурных параметров микромоделей на распределение потока между областями с различными гидравлическими диаметрами каналов, установлена зависимость между перепадом давления и объемным расходом флюида. Получены двумерные поля скоростей потоков.

Недавний прогресс в миниатюризации, усложнение дизайна и новейшие разработки в сфере электронных устройств, вследствие неравномерного распределения тепловой энергии внутри девайсов, приводят к их преждевременной поломке. Традиционные методы охлаждения оказываются неприменимыми, так как не обеспечивают достаточно интенсивный теплообмен или приводят к излишнему переохлаждению некоторых участков устройств. Решением данной проблемы являются микроканальные теплообменники, активно применяемые в таких сферах, как силовая электроника, электроэнергетика, микроэлектроника. Их главными преимуществами являются эффективность, компактность, долговечность и возможность экспериментов с дизайном. Структура микроканалов теплообменника имеет решающее значение, так как она одновременно должна обеспечивать максимально возможную поверхность теплопередачи и приемлемые гидродинамические потери на прокачку хладагента.

Основная задача текущего исследования заключается в подборе геометрии внутренней структуры микроканалов, которая обеспечивает наименьший расход хладагента, эффективный теплообмен, а также оптимальные гидродинамические характеристики. В ходе работы проведена серия экспериментов, для которых с помощью методов мягкой литографии были изготовлены микрофлюидные чипы из сшитого полимера полидиметилсилоксана (ПДМС) с различной геометрией каналов. Экспериментальная установка включала в себя контроллер давления Parker, резервуар с флюидом, датчик объемного расхода Sensirion, ПДМС-чип, слив, оптический микроскоп Olympus IX-71 с камерой Lumenera Infinity 2, компьютер. Схематичное изображение установки представлено на рис. 1.

Все изготовленные чипы имеют высоту порядка 30 мкм. Геометрия чипов 1 и 2 представляет собой однородную структуру цилиндрических микростолбов диаметрами 100 мкм. Геометрия структур 3 и 4 включает в себя вторые масштабы пористости. Структура 5 представляет собой несколько чередующихся полос из микростолбов, расположенных в полосах с различным шагом. Параметры геометрии чипов и фотографии фрагментов структуры в изготовленных чипах представлены в табл. 1 и на рис. 2.

© Галиева К. А., Гарифуллин И. Ш., Солнышкина О. А., 2025

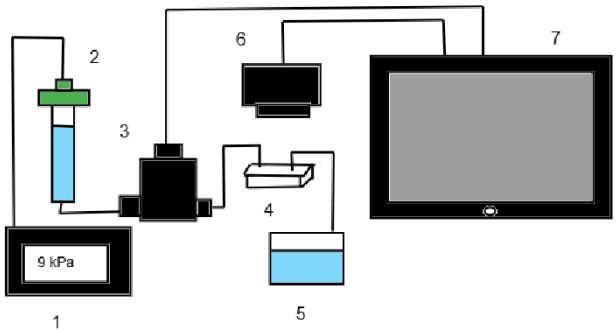
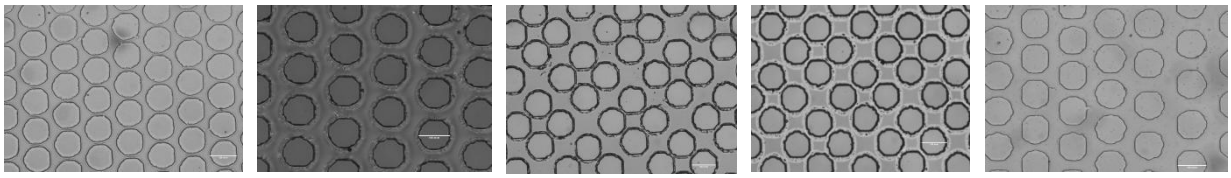


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – контроллер давления; *2* – резервуар с флюидом; *3* – датчик объемного расхода; *4* – ПДМС-чип; *5* – слив; *6* – оптический микроскоп с камерой; *7* – компьютер

Таблица 1

Параметры структуры внутреннего пространства

Параметр	Структура 1	Структура 2	Структура 3	Структура 4	Структура 5
Шаг, μм	20	70	40/70	50/70	50/70



Структура 1 Структура 2 Структура 3 Структура 4 Структура 5

Рис. 2. Геометрия полученных чипов

Проведенная серия экспериментов включала в себя исследование зависимости объемного расхода флюида Q от перепада давления, требуемого на прокачку, при варьировании расстояний между пинами в однородных структурах и структурах со вторыми масштабами распределения элементов. В ходе эксперимента Q варьировался от 7,5 до 20 мкл/мин с шагом 2,5. График зависимости Q для всех конфигураций микрофлюидных чипов, полученный в ходе эксперимента, представлен на рис. 3.

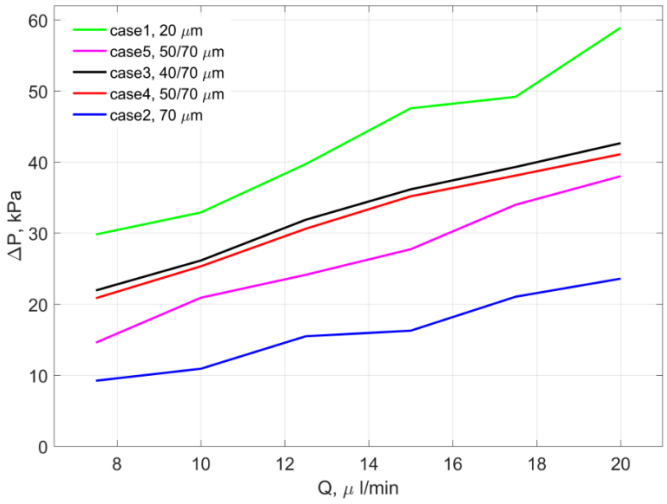


Рис. 3. Зависимости перепада давления от объемного расхода флюида для всех конфигураций чипов

Кроме того, для рассмотренных структур проведена визуализация полей скоростей с помощью трассерной визуализации потоков и исследованы структуры гидродинамических потоков. Было показано, что введение второго масштаба упаковки элементов внутренней структуры микроканала существенно влияет на перераспределение скорости потока жидкости, а также на пропускную способность чипа в целом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00697 (https://rscf.ru/project/24-19-00697).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПРИБОРОВ

В. В. Деревянко*, Д. А. Нестеров

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** ws@icm.krasn.ru*

Разработана математическая модель высокоточной системы термостабилизации приборов на борту космического аппарата, использующая методы теории автоматического управления. Проведено численное исследование устойчивости системы в зависимости от значений коэффициентов ПИ-регулятора.

При разработке космических аппаратов актуальной задачей является создание высокоточной системы термостабилизации [1]. Для моделирования подобных систем создаются сложные математические модели, которые способны обеспечить высокую точность моделирования, но при этом сложны в настройке и медлительны в работе, что затрудняет их использование в исследованиях, требующих многочисленных вычислительных экспериментов.

В данной работе исследована возможность стабилизации температуры в основании прибора с точностью до 0,01 °C с помощью пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятор) [2]. Для этого была разработана математическая модель системы термостабилизации, созданная с применением методов теории автоматического управления (ТАУ). При работе системы возникают небольшие отклонения температуры от целевого значения, поэтому поведение управляемого объекта моделируется линейной динамической системой. Изменение температуры объекта описывается переходной функцией, представляющей собой отклик на ступенчатое воздействие.

Для расчета переходных процессов использовалась непараметрическая модель управления, описанная в [3]. Если переходная функция известна, то выходное значение $y(t)$, сгенерированное произвольным входным значением u(t), может быть вычислено из ступенчатого отклика с помощью интеграла Дюамеля:

$$y(t) = \int_0^t u(\tau)\frac{dh(t-\tau)}{dt}\,d\tau = \int_0^t u(\tau)g(t-\tau)\,d\tau,$$

где $h(t)$ – отклик на ступенчатое изменение, $g(t)$ – производная $h(t)$.

Используемая модель не требует дополнительных упрощающих предположений, а ее точность ограничивается только погрешностью измерений.

Переходные функции для ТАУ-модели были получены с помощью теплофизической 3D-модели. ТАУ-модель была реализована в виде приложения на языке Python. В модели были учтены особенности реального ПИ-регулятора: ограничение на мощности нагревателей, дискретность регулятора, ограничения на точность значений мощности и температуры, вытекающие из характеристик используемого оборудования.

На рис. 1 показана реакция системы на ступенчатое воздействие, полученная с помощью ТАУ-модели и теплофизической модели. Результаты совпадают с хорошей точностью. На левом графике, в точке регулирования, возмущение по температуре не превышает 0,01 °C. На правом графике, в отдаленной точке, наблюдается скачок температуры. Скачок связан с тем, что используемая конструкция не обеспечивает выравнивание температуры по всей площади прибора.

© Деревянко В. В., Нестеров Д. А., 2025

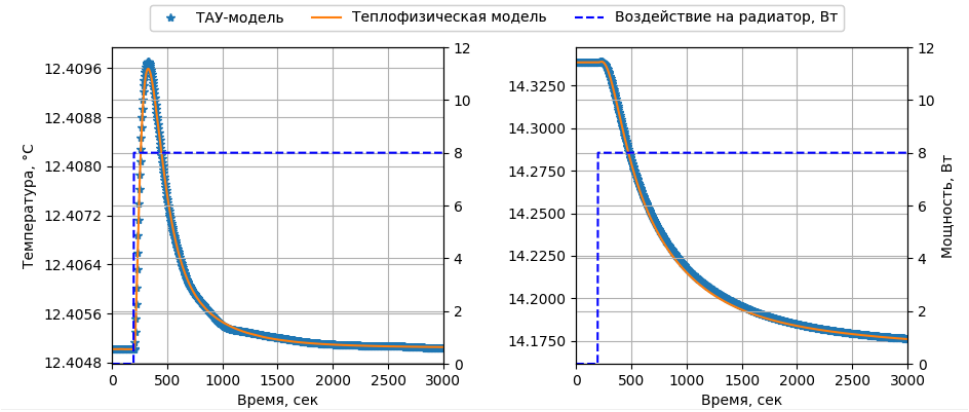


Рис. 1. Реакция системы термостабилизации на ступенчатое воздействие: слева – в точке регулирования (в месте установки датчика), справа – в отдаленной точке. Значения коэффициентов ПИ-регулятора: интегральный – 3,6; пропорциональный – 225

Высокая скорость работы ТАУ-модели делает ее удобной для численного исследования диапазонов устойчивости системы и выбора оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора. С помощью ТАУ-модели была исследована устойчивость ПИ-регулятора для нескольких вариантов конструкции системы термостабилизации в зависимости от значений интегрального и пропорционального коэффициентов. Был выявлен рабочий диапазон значений коэффициентов, в котором одновременно и система ведет себя устойчиво, и соблюдаются требования к точности терморегулирования. На рис. 2 приведены результаты такого анализа для модельной задачи, в которой прибор устанавливается на алюминиевое термостабилизирующее основание.

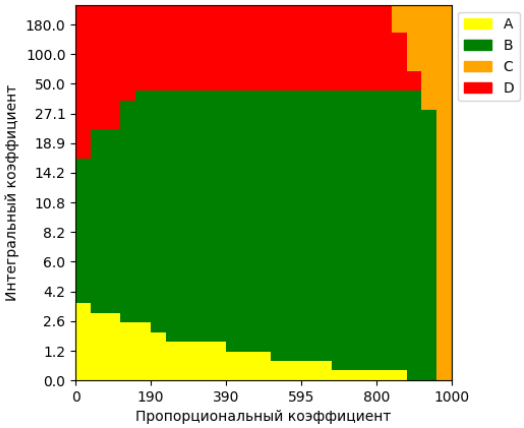


Рис. 2. Карта областей неустойчивости для модельной задачи: A – точность регулирования ниже 0,01°C , B – рабочий диапазон; C, D – области неустойчивой работы ПИ-регулятора

Важной особенностью построенной ТАУ-модели является то, что для ее работы требуется только переходная функция. При проведении физического эксперимента достаточно экспериментально определить переходную функцию, после чего можно моделировать работу системы. Необходимости подбирать значения многочисленных параметров сложной теплофизической модели нет.

К недостаткам ТАУ-модели можно отнести тот факт, что один цикл расчетов позволяет определить температуру лишь в одной точке системы. Если требуется определять температуру в нескольких точках, то количество расчетов увеличивается кратно, что замедляет процесс моделирования.

Следующим этапом работы запланировано проведение физических экспериментов, которые позволяют проверить точность полученной ТАУ-модели и отработать методику выбора оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора на практике.

Список источников

1. Gilmore D., Spacecraft thermal control handbook. 1: Fundamental technologies, 2nded., Aerospace Press [u.a.], El Segundo,Calif, 2002, 836 p.

2. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.

3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М. : Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО ОСНОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

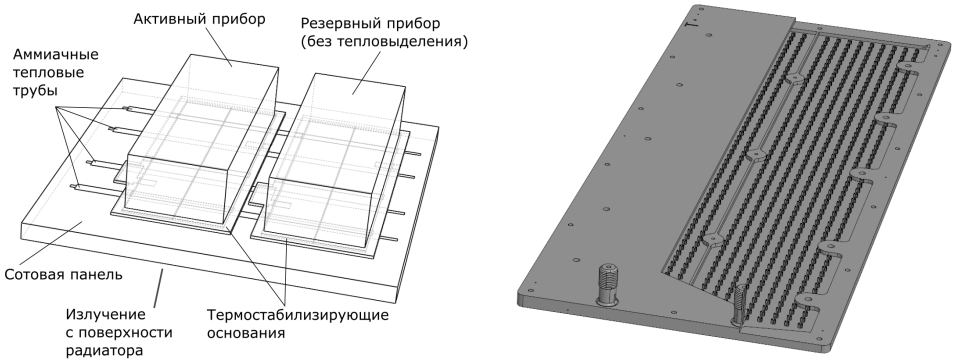
А. Н. Романов*, Д. А. Нестеров

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, д. 50/44
** ran@icm.krasn.ru*

Предлагается решение задачи термостабилизации приборов космического аппарата на примере создания высокотеплопроводящего основания методом селективного лазерного сплавления. Основание представляет собой плиту из алюминиевого сплава, с двумя встроенными плоскими тепловыми трубами. В ходе исследования подобрана оптимальная капиллярная структура для встроенных тепловых труб и экспериментально определены их теплофизические характеристики на тепловых макетах. На основе измеренных характеристик выполнено математическое моделирование предлагаемой системы термостабилизации.

Охлаждение и термостабилизация электронных приборов являются очень важными задачами, которые необходимо решить при проектировании космического аппарата (КА). Для этих целей широко используются тепловые трубы – двухфазные теплопередающие устройства, представляющие собой изделие с внутренней полостью, покрытой капиллярной структурой и заправленной теплоносителем [1]. Они обладают очень высоким эффективным коэффициентом теплопроводности и не имеют в своей конструкции подвижных частей. С развитием аддитивных технологий появилась возможность встраивать тепловые трубы непосредственно в элементы конструкции приборов и самого космического аппарата [2].

В данной работе показано применение этого подхода на примере решения задачи термостабилизации стандарта частоты навигационного спутника (рис. 1, *а*). Необходимо обеспечить для каждой точки дна прибора стабильность температуры по времени на уровне сотых долей градуса. В исходном варианте конструкции термостабилизация обеспечивается цельнометаллической алюминиевой плитой с углублениями, в которой расположены электронагреватели и датчик температуры. Система управления регулирует мощность на нагревателях по датчику, обеспечивая стабильность температуры в основании прибора в рамках 1 °С.



а *б*

Рис. 1. Термостабилизирующее основание: *а* – расположение на панели КА;
б – внешний вид предлагаемого решения (вырезом показана внутренняя структура)

© Романов А. Н., Нестеров Д. А., 2025

Предлагается заменить цельнометаллическую плиту более тонким высокотеплопроводящим основанием со встроенными внутрь него двумя тепловыми трубами (рис. 1, *б*), которое изготавливается методом селективного лазерного сплавления. Это позволит снизить массу и тепловую инерцию основания, увеличить его теплопроводность и качество термостабилизации.

На первом этапе исследования были изготовлены образцы с разными вариантами капиллярных структур. Для них оценены пористость и геометрические размеры элементов капиллярной структуры. Методом ride of rise [3] произведена оценка проницаемости и эффективного радиуса пор.

Затем было изготовлено несколько тепловых труб размером 200 × 20 × 5 мм с отобранными на предыдущем этапе капиллярными структурами в качестве фитиля. Был определен оптимальный уровень заправки, проведены измерения теплофизических характеристик. По полученным результатам выбран вариант капиллярной структуры для изготовления теплового макета основания – тепловой трубы размером 505 × 44 × 6 мм с расположенными на нем вспомогательными элементами для осуществления заправки теплоносителем и проведения измерений (рис. 2).

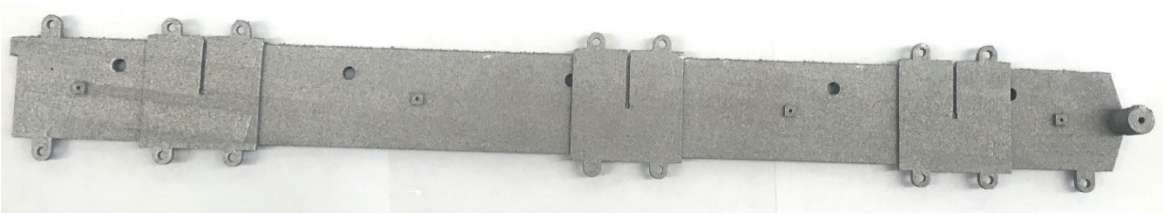


Рис. 2. Внешний вид теплового макета термостабилизирующего основания

Были проведены две серии измерений: с конвекционным охлаждением и теплоизоляцией одной стороны теплового макета и с охлаждением одной из площадок холодильником и полной теплоизоляцией. В ходе экспериментов фиксировалось распределение температур по тепловому макету в зависимости от приложенной мощности, определялась мощность, при которой начинается процесс осушения (капиллярное ограничение).

Эксперимент с конвекционным охлаждением имитировал условия радиационного сброса тепла. Была подтверждена работоспособность тепловой трубы такой длины при мощностях нагрева, соответствующих условиям поставленной задачи. Работоспособность сохранялась при 17 Вт. При масштабировании этой величины на всю ширину основания получается четырехкратный запас по мощности осушения.

Эксперимент с полной теплоизоляцией позволил определить капиллярные и теплофизические характеристики теплового макета, по которым было проведено моделирование с использованием двухмерной математической модели. Расчеты показали ожидаемый максимум капиллярной нагрузки в 25 % от предельной, что соответствует результатам эксперимента с конвекционным охлаждением. Оценка пространственной неоднородности по температуре демонстрирует максимум в 1,3 °С против 2,4 °С для цельнометаллического основания. Наконец, по результатам расчета максимальная температурная нестабильность предлагаемого варианта более чем на порядок ниже ранее используемой конструкции. Требуемая стабильность на уровне сотых градуса может быть достигнута.

Таким образом, применение аддитивных технологий при решении задач термостабилизации позволяет снизить массу, упростить конструкцию и технологию изготовления элементов спутника и повысить эффективность приборов.

Список источников

1. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / пер. с англ. В. Я. Сидорова. М. : Машиностроение, 1981. 207 с.

2. Douglas R. Adkins, Ronald C. Dykhuizen. Procedure for Measuring the Properties of Heat-Pipe Wick Materials. Отчет лаборатории «Sandia National Laboratories», Albuquerque, USA, 1993.

3. McDonough J. R. A perspective on the current and future roles of additive manufacturing in process engineering, with an emphasis on heat transfer. Thermal Science and Engineering Progress. V.19 1 October 2020.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В МИКРОКАНАЛАХ С ОДНИМ И ДВУМЯ МАСШТАБАМИ УПАКОВКИ СТОЛБИКОВ

О. А. Солнышкина*, Н. Б. Бикинина, А. З. Булатова

Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32
** olgasolnyshkina@gmail.com*

Важным аспектом в конструировании эффективных микротеплообменных устройств является подбор оптимальной геометрии внутренней структуры микроканалов. Данная работа посвящена численному исследованию влияния изменения внутренней конфигурации микроканалов на гидродинамические особенности. Используемый численный подход для решения уравнений Стокса основывается на ускоренном методе граничных элементов для трехмерных задач. Проведена серия расчетов по исследованию изменения пропускной способности элементов микроканала с распределенными поперек потока столбиками.

Электронная промышленность в последние годы характеризуется активным развитием производства трехмерных чипов, где несколько подложек с электронными компонентами устанавливаются параллельно на расстоянии 50–100 μm. Трехмерная структура устройств усложняет процесс отвода тепла. Это приводит к повышенному интересу инженеров к разработке жидкостных микромасштабных охлаждающих систем. Для создания таких систем необходимо детальное понимание гидродинамических процессов в микроканалах. Важным аспектом в конструировании эффективных микротеплообменных устройств является подбор оптимальной геометрии внутренней структуры микроканалов. На практике часто применяются микроразмерные столбы различных форм, как цилиндрические, так и многогранные, например, с треугольным, прямоугольным, шестиугольным поперечным сечением [1]. Однако исследования показали, что наиболее эффективными считаются столбики с круглым и квадратным поперечным сечением [2]. Размеры таких столбиков варьируются в зависимости от назначения микрочипа. Кроме того, высота столбов также может варьироваться от 50 до 100 % от высоты всего микроканала. Показано, что скорость теплопередачи в таких системах на 5–10 % выше, чем у их закрытых аналогов [3]. Существуют исследования, посвященные дизайну микрофлюидных теплообменников, однако в основном рассматриваются конфигурации с равномерно распределенными столбиками (пинами) или ребрами. В то время как в данной работе рассматривается несколько масштабов упаковки пинов, варьируется расстояние между ними, а также их высота. Кроме того, в данной работе используется численный подход для трехмерного моделирования процессов, в то время как в литературе чаще встречаются двумерные численные эксперименты.

В рамках данной работы проведены расчеты течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском микроканале высотой h = 50 мкм с распределенными столбиками диаметром d = 50 мкм. Используемый в работе численный подход для решения уравнений Стокса основывается на ускоренном методе граничных элементов (МГЭ) для трехмерных задач (более подробное описание реализации и особенностей метода приведено в предыдущих работах авторов [4; 5]). Проведена валидация программных модулей путем сравнения с аналитическим решением для течения вязкой жидкости в плоском канале, относительная погрешность не превышала 2 %, что вполне допустимо для МГЭ.

Для проведения численного анализа влияния параметров пространственного распределения столбиков разработана качественная триангуляция всех микроканалов.

© Солнышкина О. А., Бикинина Н. Б., Булатова А. З., 2025

Варианты расположения пинов – равномерное и с двумя масштабами упорядочивания (выделялись группы по 4 элемента, образующие узкие каналы между пинами и широкие каналы между группами пинов (рис. 1)). Варьировались расстояния между столбиками (Δel) и между группами столбиков (Δgr). Для исследования влияния введения второго масштаба упаковки рассмотрены четыре комбинации: Δel = 20 мкм, Δgr = 25 мкм; Δel = 25 мкм, Δgr = 30 мкм; Δel = 20 мкм, Δgr =35 мкм; Δel =25 мкм, Δgr = 35 мкм. Пустотности полученных структур варьировались от 65,11 до 69,25 %. Рассчитаны картины течений во всех конфигурациях (рис. 1).

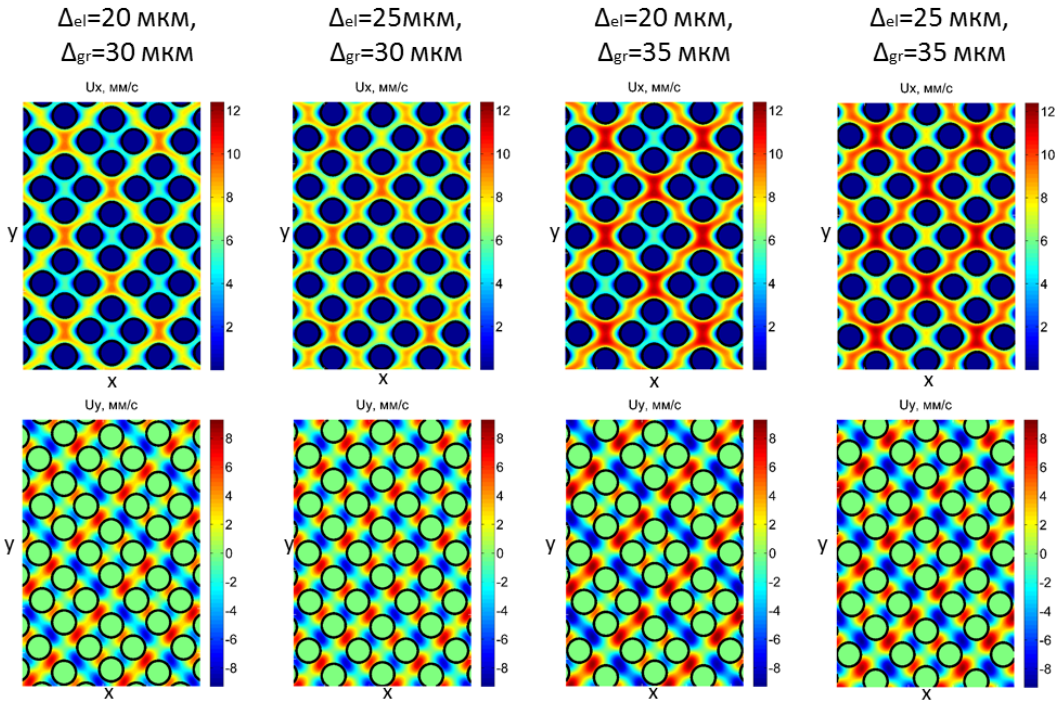


Рис. 1. Профили продольной (*Ux*) и поперечной (*Uy*) компонент скорости в поперечном сечении микроканала с двумя масштабами упорядочивания столбиков при различных значениях Δ

Проведено исследование изменения объемного расхода жидкости при введении второго масштаба упаковки для различных высот канала, симметрии упаковки и при изменении высоты столбиков относительно основного канала. Особый интерес вызывает исследование поперечных потоков внутри микроканала с распределенными столбиками. Кроме того, проведено исследование изменения структуры течений в открытом типе микроканалов при изменении высоты пинов до 50 и 75 % от высоты канала. Выявлен новый критерий, характеризующий течения в плоском микроканале с несколькими масштабами распределения столбиков – соотношение расстояния между отдельными столбиками внутри групп упаковки и между группами столбиков.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00697 (https://rscf.ru/project/24-19-00697).

Список источников

1. Ndao S., Peles Y., Jensen M. K. Effects of pin fin shape and configuration on the single-phase heat transfer characteristics of jet impingement on micro pin fins // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 70. Pp. 856–863.

2. Bhandari P. et al. Thermo-hydraulic investigation of open micro prism pin fin heat sink having varying prism sides // Alexandria Engineering Journal. 2023. Vol. 69. Pp. 457–468.

3. Prajapati Y. K. Influence of fin height on heat transfer and fluid flow characteristics of rectangular microchannel heat sink //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 137. Pp. 1041–1052.

4. Абрамова О. А. и др. Трехмерное моделирование динамики деформируемых капель эмульсии методом граничных элементов и быстрым методом мультиполей на гетерогенных вычислительных системах // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14 (4). С. 438–450.

5. Солнышкина О. А. и др. Трехмерное моделирование однофазных и многофазных течений в микроканалах с неровностями // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26, № 2 (94). С. 130–141.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

М. А. Чернышева*, Ю. Ф. Майданик

Институт теплофизики УО РАН
620016, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 107а
** mariya@itpuran.ru*

В работе представлены теоретические основы работы контурных тепловых труб, рассмотрены условия работоспособности контурных тепловых труб и критерии качества для выбора теплоносителей с оптимальными теплофизическими параметрами.

В настоящее время все большую актуальность приобретают научно-технические задачи, связанные с тепловым регулированием различных технических объектов. Одним из эффективных решений является применение двухфазных циркуляционных теплопередающих устройств с фазовыми переходами «жидкость – пар» и «пар – жидкость», которые протекают в зонах нагрева (в испарителе) и сброса тепла (в конденсаторе) соответственно. К таким устройствам относятся контурные тепловые трубы (КТТ), прокачка теплоносителя в которых осуществляется капиллярными силами, создаваемыми мелкопористой капиллярной структурой (фитилем). В КТТ фитиль размещается только в испарителе, а именно в наиболее горячей его части, которая находится в тепловом контакте с источником тепла (рис. 1). Испаритель и конденсатор соединяются тонкими, а потому достаточно гибкими трубками, предназначенными для раздельного переноса теплоносителя в паровой и жидкой фазах. Испаритель КТТ снабжен компенсационной полостью, которая служит аккумулятором жидкости при освобождении конденсатора и паропровода при запуске КТТ.

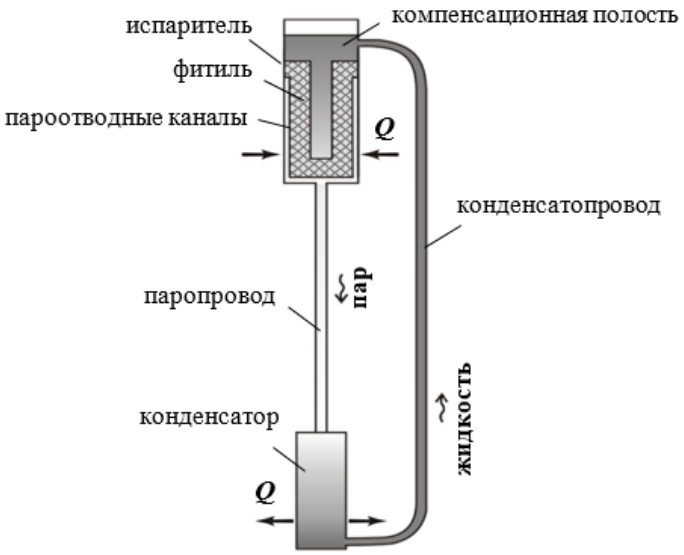


Рис. 1. Принципиальная схема контурной тепловой трубы

Физическая концепция КТТ может быть описана на основе *P–T*-диаграммы рабочего цикла теплоносителя (рис. 2). Точки на кривой насыщения описывают двухфазное состояние теплоносителя в зоне испарения и конденсации, а также в компенсационной полости (КП). На основе этой диаграммы формулируются два основных условия

© Чернышева М. А., Майданик Ю. Ф., 2025

работоспособности КТТ [1]. Согласно гидравлическому условию, капиллярное давление, создаваемое менисками фитиля ΔP_c, должно компенсировать перепад давления при циркуляции теплоносителя в КТТ:

$$\Delta P_{\text{с}} \geq \Delta P_{\text{ф}} + \Delta P_{\text{пк}} + \Delta P_{\text{пп}} + \Delta P_{\text{конд}} + \Delta P_{\text{жк}} \pm \Delta P_g, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ф}}$ – падение давления в фитиле; $\Delta P_{\text{пк}}$ – в пароотводных каналах; $\Delta P_{\text{пп}}$ – в паропроводе, $\Delta P_{\text{конд}}$ – в конденсаторе; $\Delta P_{\text{жк}}$ – в конденсатопроводе; ΔP_g – гидравлические потери.

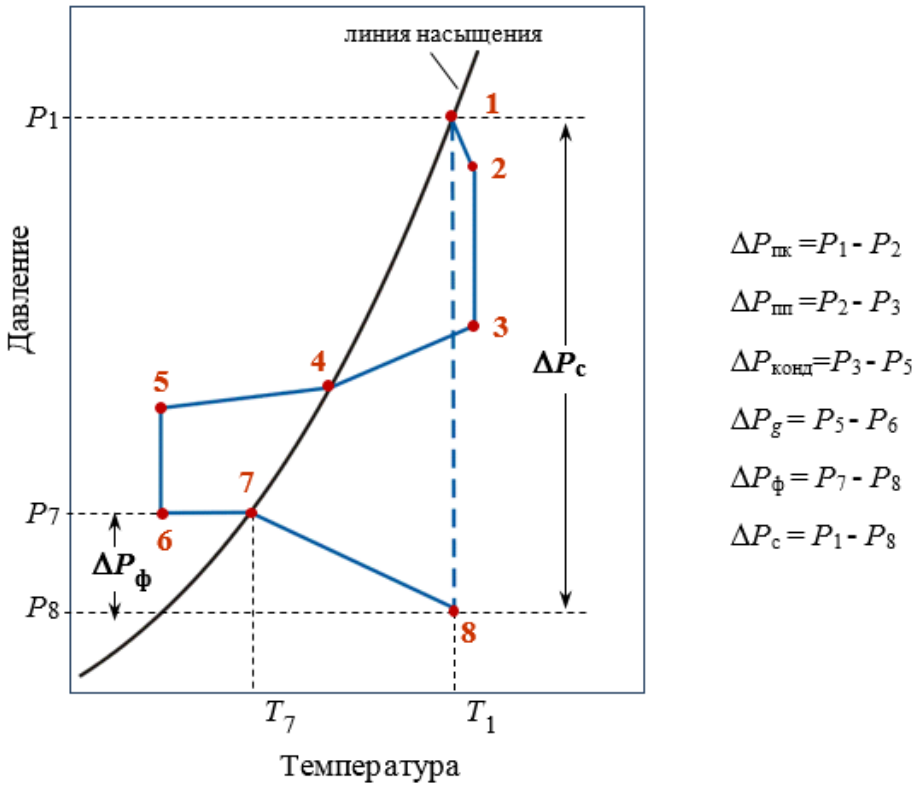


Рис. 2. *P–T*-диаграмма рабочего цикла КТТ

Второе условие (термодинамическое) работоспособности КТТ связывает перепад температур $\Delta T_{\text{ф}}$ на испаряющей поверхности фитиля и над поверхностью раздела фаз в КП, с перепадом давления на внешних, относительно фитиля, транспортных участках КТТ. Согласно *P–T*-диаграмме рабочего цикла КТТ, это условие имеет вид:

$$\Delta T_{\text{ф}} = \left(\Delta P_{\text{КТТ}} - \Delta P_{\text{ф}}\right)\frac{dT_s}{dP_s}. \quad (2)$$

Третье условие работоспособности определяет соотношение между внутренним объемом КТТ и объем теплоносителя, заправленного в КТТ:

$$V_{\text{ж}} = V_{\text{жк}} + \Pi\, V_{\text{ф}} + (0.2 \div 0.3)V_{\text{конд}}, \quad (3)$$

где П – пористость фитиля.

Имеется также ряд критериев для жидкостной ($K_{ж}$) и паровой фаз ($K_п$) теплоносителя, на основании которых проводится оценка «качества» теплоносителя и его выбор. Они представляют собой комплексы, состоящие из теплофизических параметров:

$$K_{ж} = \frac{\rho_{ж}\,\sigma\,h}{\mu_{ж}}, \tag{4}$$

$$K_{п} = \frac{\rho_{п}\,h}{\mu_{п}}\,\frac{dP_s}{dT_s} \tag{5}$$

где σ – поверхностное натяжение, h – теплота испарения, μ – вязкость, ρ – плотность.

Список источников

1. Майданик Ю. Ф., Ферштатер Ю. Г., Пастухов В. Г. Контурные тепловые трубы // Препринт № 54 Научные доклады УрО АН СССР. Свердловск, 1989

Секция 8
Возобновляемая
и альтернативная энергетика

PLASMA GASIFICATION OF UNSORTED CARBONACEOUS BIOMEDICAL WASTE IN VARIOUS OXIDANTS

V. E. Messerle*, A. B. Ustimenko

SPTC ZHALYN, Al-Farabi Kazakh National University
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi av.
** ust@physics.kz*

This paper presents the results of thermodynamic calculations of plasma gasification of biomedical waste using various gasifying agents (air, water vapor, carbon dioxide, oxygen).

Problem of treatment and disposal of biomedical waste (BMW) containing toxic substances is very relevant. A considerable amount of information on use of arc plasma generators in installations of high temperature processing of various waste containing organic and inorganic substances appeared in recent years. In contrast to the traditional fire treatment method of BMW, plasma gasification makes it possible to process unsorted waste and ensures reliable destruction of highly toxic dioxins, benzo(a)pyrene, and furans [1]. This report presents the results of thermodynamic calculations of plasma gasification of BMW using various gasifying agents (air, water vapor, carbon dioxide, oxygen). The thermodynamic calculations were verified using experiments on air gasification of BMW in a plasma gasifier. The typical composition of the BMW is represented by the following materials: paper – 16.17 %, textiles – 9.77 %, cardboard and wood – 1.12 %, food waste – 21.51 %, plastic – 50.45 %, metal – 0.40 %, glass – 0.57 % [2]. Code Terra [1] was used to perform thermodynamic calculations of BMW plasma gasification. Calculations were carried out in the temperature interval 298–3,000 K and a pressure of 0.1 MPa. For calculations of the BMW gasification, the following process mixtures were used, the composition of which provided 100 % gasification of the waste: 100 kg of BMW + 117 kg of air; 100 kg of BMW + 31 kg of steam; 100 kg of BMW + 80 kg of carbon dioxide; 100 kg of BMW + 28 kg of oxygen. The purpose of the calculations was to determine the integral parameters of the BMW gasification process: the equilibrium composition of gas and condensed products, the degree of carbon gasification, the specific energy consumption for the process and the waste gasification efficiency. BMW plasma gasification experiments were conducted using a plasma gasifier of 50 kg/h productivity from BMW and a DC plasma torch of 100 kW power [1]. As a result of BMW air gasification synthesis gas of 62.2 % (CO – 31.7 %, H_2 – 30.5 %, N_2 – 36.8 %) concentration was received. Discrepancy between experimental and calculated data by the yield of synthesis gas was not more than 10 %. Harmful impurities were not observed in the gases or the condensed products generated from the plasma-air gasification of BMW.

As a result of thermodynamic calculations, it was found that the maximum yield of synthesis gas during plasma gasification of BMW in various gasifying agents is reached at 1,600 K. It is shown that at this optimum temperature, synthesis gas is obtained with a yield of up to 96.6 %. This value is achieved during plasma-steam gasification. During plasma gasification using carbon dioxide and oxygen as gasifying agents, the synthesis gas output reaches 95.6 and 95.5 %, respectively. With plasma-air gasification, the maximum concentration of combustible components of synthesis gas reaches 68.1 %. The specific energy consumption for the process of plasma gasification of BMW, depending on the type of gasification agent, varies in the range of 1.22–2.03 kWh/kg.

© Messerle V. E., Ustimenko A. B., 2025

References

1. Messerle V. E., MosseA. L., UstimenkoA. B. Processing of biomedical waste in plasma gasifier // Wast Management. 2018. Vol. 79. Pp. 791–799.

2. Chih-Shan Li and Fu-Tien Jenq. Physical and Chemical Composition of Hospital Waste // Infection Control and Hospital Epidemiology. 1993. Vol. 14 (3). Pp. 145–150.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОИДАЛЬНОГО РОТОРА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Д. А. Дектерев[1, 2*], Т. Ш. Селищев[2], П. А. Необъявляющий[1], Ар. А. Дектерев[1], Д. В. Платонов[1, 2]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
** dekterev_da@mail.ru*

Проведены исследования циклоидального ротора в режиме генерации электроэнергии. В режиме свободного вращения определено оптимальное фазовое положение ротора относительно набегающего потока. Получены зависимости вырабатываемой мощности при данном фазовом положении и различных углах атаки лопастей (общем шаге). В режиме принудительного вращения получены зависимости потребляемой мощности от фазового положения и общего шага, на основании которых определен коэффициент использования энергии ветра.

Циклоидальный ротор – это ортогональный ротор с лопастями, динамически меняющими угол атаки при изменении фазового положения. По сути, такой ротор имеет возможность создания тяги с управляемой силой и направлением, что говорит о его применимости в качестве движителя летательных аппаратов. За более чем вековую историю было сделано немало попыток создания летательных аппаратов, однако более-менее успешные работы стали появляться буквально последние два десятилетия [1–3].

Авторы данных материалов принимали участие в разработках и комплексных численных и экспериментальных исследованиях циклоидальных движителей летательных аппаратов диаметрами от 200 до 1700 мм. При проведении испытаний движителей в аэродинамических трубах было замечено, что в условиях набегающего потока потребляемая мощность может значительно отличаться от мощности, затрачиваемой на работу в режимах без потока. При изменении ориентации ротора относительно потока в диапазоне 360° наблюдались режимы как с заметным ростом, так и со значительным снижением потребляемой мощности. Таким образом, существуют режимы работы, в которых набегающий поток создает силу, вращающую ротор как попутно, так и противоположно его принудительному движению. Это приводит к выводу о возможности использования подобных роторных систем в режимах генерации энергии.

В целом конструкция циклоидального движителя напоминает Н-образный ротор Дарье для вертикально-осевых ветроэнергетических установок. Главным отличием является динамически изменяемый угол атаки. В работах [4; 5] отмечается заметный рост эффективности ветроэнергетических установок при реализации механизмов качания лопастей.

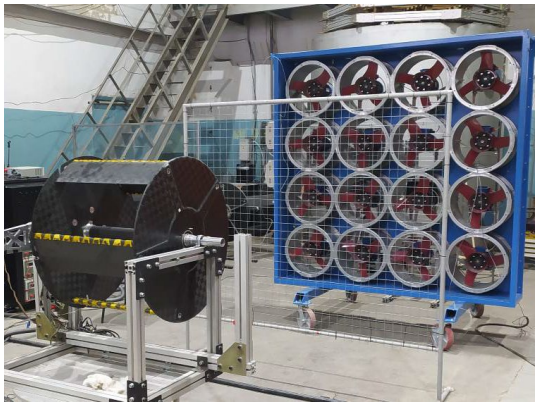
В данной работе исследуется ротор диаметром D = 600 мм с пятью лопастями длиной L = 500 мм и хордой H = 150 мм, на котором применяется кинематическая схема с двумя изменяемыми параметрами – величиной эксцентриситета (изменяет максимальное отклонение лопасти от нулевого положения, называемая общим шагом) и направлением этого смещения (фазовый угол – отвечает за фазовое положение лопастей в диапазоне 360°, в которых наблюдается максимальное отклонение лопастей). Максимальное отклонение лопастей от нулевого положения при 100 % общего шага составляет $\alpha = -36°/+39°$.

© Дектерев Д. А., Селищев Т. Ш., Необъявляющий П. А., Дектерев Ар. А., Платонов Д. В., 2025

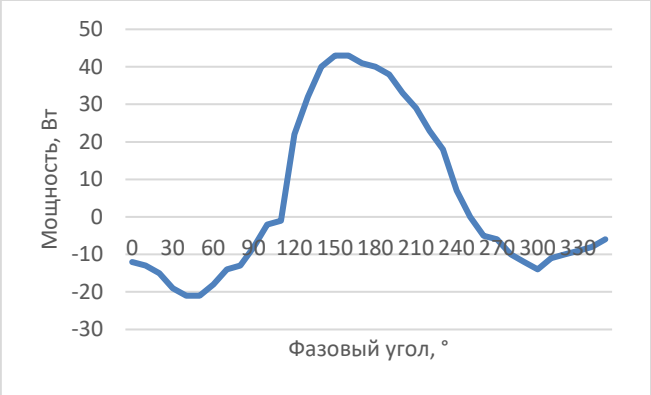
Изучение циклоидального ротора в качестве ветроколеса сводится к определению оптимального сочетания общего шага и фазового угла. Необходимость определения фазового угла, по сути, приводит к тому, что ротор становится ветроориентированным. С одной стороны, это приводит к необходимости реализации механизма подстраивания под направление ветра, с другой стороны делает ротор самостартующим при малых скоростях ветра, способным выбирать оптимальный энергетический режим в зависимости от условий и безопасный режим при критических ветровых нагрузках.

Поток на ротор создавался с помощью аэродинамической стены (рис. 1, *а*). Изначально в режиме свободного вращения определено оптимальное фазовое положение ротора относительно набегающего потока, при котором достигаются наивысшие скорости. Затем на оптимальном фазовом углу определялся наиболее эффективный общий шаг.

Стоит отметить, что исследуемый ротор создавался как движитель летательного аппарата, соответственно, его аэродинамические параметры, а также силовая энергетическая установка являются неоптимальными для работы в генераторном режиме. В связи с этим исследование энергетических параметров выполнялось в обратной постановке – ротор раскручивался до 300 об/мин, производились измерения потребляемой мощности, затем при удержании частоты вращения создавался набегающий поток со скоростью 10 м/с, при варьировании фазового угла и общего шага замерялось изменение потребляемой мощности. На рис. 1, *б*, представлен график снижения потребляемой мощности при общем шаге 70 % и изменении фазового угла в диапазоне 0–360°.



а



б

Рис. 1. Циклоидальный ротор перед аэродинамической стеной (*а*)
и его энергетические параметры (*б*)

Можно наблюдать, что максимальное падение потребляемой мощности достигает 44 Вт. При этом показатель коэффициента использования ветра (КИЭВ) достигает значения 0,24, что является средним показателем для вертикально-осевых ветротурбин. Тем не менее предполагается, что оптимизация конструкции под задачи ветроэнергетики, а также оснащение специализированным генераторным оборудованием позволит достичь значительно больших показателей КИЭВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 124062400029-2.

Список источников

1. Xisto C. M. et al. Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions // J. Aerosp. Eng. – 2017. – V 30, N 1. – P. 04016066.

2. Yun C. Y., Park K., Lee H. Y., Jung J. S., Hwang I. S. Design of a new unmanned aerial vehicle cyclocopter//Journal of the American Helicopter Society. – 2007. – V 52, N 1. – P. 24–35.

3. Benedict M., Ramasamy M., Chopra I. Improving the aerodynamic performance of micro-air-vehicle-scale cycloidal rotor: An experimental approach//Journal of Aircraft. 2010. – V 47, N 4. – P. 1117–1125.

4. Hwang I. S., Kang W., Kim S. J. High altitude cycloidal wind turbine system design // Procedia Engineering. – 2013. –V 67. – P. 78–84.

5. Гринченко В. Т., Каян В. П. Оптимизация характеристик ветроротора Дарье с прямыми управляемыми лопастями // Доклады НАН Украины. – 2015. – № 16. – С. 37–45.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА РЕЧНОЙ ВОДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А. В. Ануфриенко[1], С. Л. Елистратов [1, 2, 3]

[1]Новосибирский государственный технический университет
630037, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
683032, Российская Федерация, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д. 4

Для работы теплонасосных установок городского теплоснабжения мощностью в десятки гигакалорий в час требуется использование в пределах города соответствующих по теплосодержанию низкопотенциальных (до 40–45°С) источников тепла, возобновляемых источников энергии и/или техногенных источников. Рассмотрены особенности применения для этих целей воды незамерзающей реки Енисей. Представлены расчетные данные по удельным энергозатратам теплонасосных установок с водозабором из реки при работе в составе городской системы теплоснабжения города Дивногорска Красноярского края.

Для оценки эффективности работы теплонасосных установок (ТНУ) парокомпрессионного типа используют коэффициент преобразования тепловой энергии (COP – Coefficient of Performance, англ.):

$$COP = \frac{Q}{N_{КМ}} = \frac{N_{КМ} + Q_{НИТ}}{N_{КМ}} = 1 + \frac{Q_{НИТ}}{N_{КМ}} = 1 + \varepsilon\,, \qquad (1)$$

где Q, $Q_{НИТ}$ и $N_{КМ}$ – соответственно теплопроизводительность ТНУ, утилизируемая теплота НИТ и затраты энергии на компрессию пара в рабочем цикле ТНУ; ε – холодильный коэффициент, характеризующий энергетическую эффективность утилизации тепла НИТ.

Для обеспечения удельной теплопроизводительности ТНУ в размере 1,0 Гкал/ч (1,163 МВт) для $COP = 1{,}5 \div 10$ потребуется, соответственно, обеспечить утилизацию $Q_{НИТ} = 0{,}33 \div 0{,}90$ Гкал/ч при удельных затратах $N_{КМ} = 775$–116 кВт·ч/Гкал тепла. Затраты электроэнергии на доставку воды из реки к ТНУ можно оценить как:

$$Э = \frac{G \cdot \Delta p}{\rho \cdot \eta_{Н.У.}}\,, \qquad (2)$$

где G – расход воды, кг/с; Δp – перепад давлений, развиваемый насосами речного водозабора, Па; ρ – плотность воды, кг/м^3; $\eta_{Н.У.} = 0{,}7$ – средний КПД насосной установки водозабора (произведение КПД гидравлического насоса на КПД приводного электродвигателя).

Сезонные изменения температуры речной воды (табл. 1) и температурного графика отопления определяют многовариативность решений задачи минимизации энергозатрат на работу ТНУ в составе городской системы теплоснабжения в широком диа-

© Ануфриенко А. В., Елистратов С. Л., 2025

пазоне изменения расхода низкопотенциальных источников тепла (НИТ). Вследствие этого целесообразно использовать частотное регулирования для работы насосов речного водозабора, на 10 % и более, позволяющих снизить относительные затраты электроэнергии на доставку воды к ТНУ.

В наиболее холодный период года температура воды в реке понижается до 2 °С, что приводит к необходимости регулирования ее расхода при соблюдении минимальных перепадов температур на входе и выходе из ТНУ для предотвращения ее замерзания в испарителе. В результате при минимальных значениях *COP* = 1,5–2,0 изменяются удельные энергозатраты, которые имеют тенденцию к относительному увеличению (рис. 1) с ростом *COP*.

Таблица 1

Среднемесячные значения температур для г. Дивногорска Красноярского края

Параметры	Месяцы года												Примечание
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура окружающего воздуха, t_{OB}, °С	–19	–14	–4	3	11	17	21	19	10	3	–4	–10	Наиболее холодный год в 2021–2023 гг.
Температура воды в реке Енисей t_{S1}, °С	1,8	2,0	2,2	2,3	3,2	6,8	8,3	10,3	11,8	10,7	7,4	3,8	0,2 м от поверхности воды в 2019 г. (E 55° 96′ 869″, N 32° 37′ 318″)
Температура холодной подпиточной воды t_{F1}, °С	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	6,0	11,0	12,0	14,0	12,0	8,0	5,0	Для горячего водоснабжения (ГВС)
Нормативная температура сетевой воды на подаче t_{W2}, °С	91	83	72	65,5	65	65	65	65	65	65,5	72	79	В мае – сентябре только на ГВС
Нормативная температура обратной сетевой воды t_{W1}, °С	65	60	56	54	58	58	58	58	58	54	56	59	

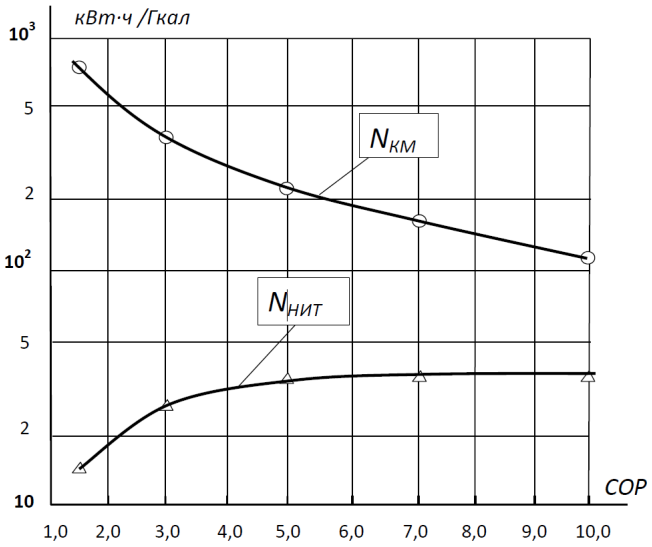


Рис. 1. Удельные энергозатраты на обеспечение работы ТНУ на базе речной воды с предельно низкой температурой $\Delta t_{S1} = t_{S1}^{вх} - t_{S1}^{вых}$ = 1,0 °С и гидравлическом напоре Δp = 10^5 Па.

Область малых значений COP $\rightarrow$ 1,0 соответствует январскому моновалентному режиму работы ТНУ с нагревом теплоносителя системы отопления до $t_{W2} \cong 90$ °C, а больших значений – нагреву до более низкого температурного уровня в отдельные периоды года. Обнаружено, что при малых Δt_{S1} и больших значениях COP $\rightarrow$ 10,0, возрастают общие энергозатраты в системе «ТНУ + водозабор», что приводит к относительному снижению COP до 23 %.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБЛЕДЕНЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ МАЛЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

Е. В. Панкратов*, П. Д. Алексеев

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 17
** e.pankratov@narfu.ru*

Лед, образующийся на поверхности лопастей, изменяет их аэродинамический профиль, снижает аэродинамическую эффективность. Это приводит к уменьшению производительности турбины и снижению количества вырабатываемой электроэнергии. Кроме того, обледенение увеличивает вес лопастей, что повышает нагрузку на ротор и риск выхода из строя ветрогенератора. Проведена оценка влияния обледенения на аэродинамические характеристики лопастей малых ветрогенераторов. Смоделированы условия, при которых на лопастях образуется лед. Основными факторами, влияющими на обледенение, стали температура, влажность воздуха и размер капель воды. Результаты показывают значительное уменьшение производительности турбин в условиях обледенения, что подчеркивает необходимость разработки эффективных методов борьбы с этим процессом для улучшения работы ветрогенераторов в холодных регионах.

Обледенение лопастей ветрогенераторов является одной из наиболее значимых проблем в Арктической зоне [1]. Лед, образующийся на поверхности лопастей, изменяет их аэродинамический профиль, что снижает аэродинамическую эффективность. Это приводит к уменьшению производительности турбины и снижению количества вырабатываемой электроэнергии. Кроме того, обледенение увеличивает вес лопастей, что повышает нагрузку на ротор и риск выхода из строя ветрогенератора.

Для исследования процесса обледенения использовалась геометрия лопасти турбины NREL 5MW, характеризующаяся высокой аэродинамической эффективностью. Этот аэродинамический профиль разработан для обеспечения максимальной производительности при различных условиях эксплуатации. Основные параметры лопасти приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры лопасти NREL 5MW

Характеристика	Значение
Номинальная мощность	5 МВт
Диаметр ротора	126 м
Диаметр ступицы	3 м
Длина лопасти	61,5 м
Высота ступицы	90 м
Начальная/номинальная/конечная скорость ветра	3/11,4/25 м/с
Начальная/номинальная скорость вращения ротора	6,9/12,1 об/мин

Для моделирования влияния обогреваемого стержня на аэродинамический профиль была создана гексаэдрическая сеточная модель в программном комплексе ANSYS, показанная на рис. 1.

© Панкратов Е. В., Алексеев П. Д., 2025

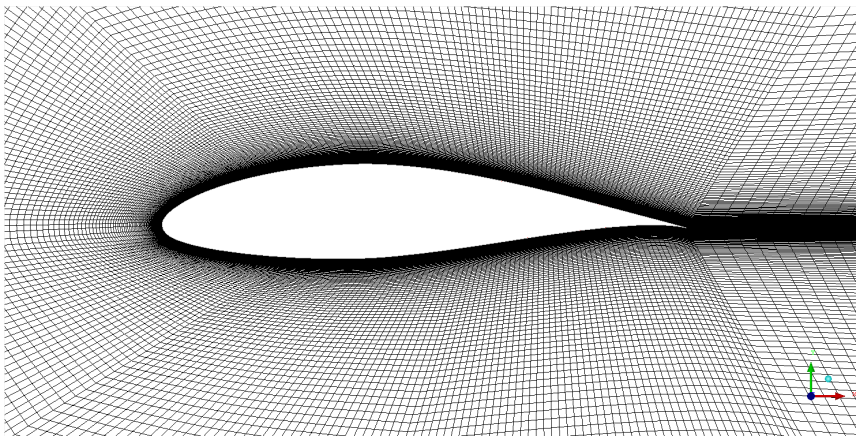


Рис. 1. Гексаэдрическая сеточная модель

Далее методом импульса элементов лопаток (Blade Element Momentum Theory, BEM) была проанализирована работа лопастей ветровых турбин. Данный метод сочетает теорию импульса, учитывающую влияние лопастей на поток воздуха, и аэродинамическую теорию элементов, позволяющую рассчитывать подъемную силу и лобовое сопротивление для каждого участка лопасти.

Лопасть была поделена на небольшие элементы, для которых определяются локальные параметры потока, такие как угол атаки и распределение скоростей. Это позволяет оптимизировать форму лопасти, включая угол закрутки и хорду, для повышения эффективности [2].

Исследованные характеристики потока при разных условиях приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики входящего потока

Скорость воздуха, м/с	Коэффициент осевой индукции	Коэффициент тангенциальной индукции	Угол атаки, °	Относительная скорость, м/с
10	0,21613	0,00360	6,5	68,9
15	0,04629	0,00163	–1,0	79,4
20	0,00386	0,00028	–3,8	80,6
25	–0,00757	–0,00080	–5,9	82,0

При моделировании в ANSYS Fluent была использована характеристическая длина 1,419 м, соответствующая аэродинамическому профилю лопатки NACA 64-618. Относительная скорость воздушного потока составляла 75,88 м/с, что позволило учитывать взаимодействие капель с поверхностью при высоких нагрузках. Статическое давление воздуха было принято равным 101 325 Па, а температура –10 °C.

При угле атаки, равном 5,824°, были смоделированы реальные режимы эксплуатации. Содержание жидкой воды было установлено на уровне 0,5 г/м³, а средний объемный диаметр капель составлял 20 мкм, что соответствует распределению Langmuir D. Модель Джонса использовалась для оценки плотности льда, имитируя образование глазури (рис. 2).

Рис. 2. Полученная модель обледенения на профиле лопатки NACA 64-618

Моделирование выполнялось на интервале 3600 с. Шероховатость поверхности не учитывалась, чтобы упростить начальный этап анализа параметров потока и накопления льда. Температура цилиндра равнялась 20 °C.

В ходе исследования была проведена оценка влияния обледенения на аэродинамические характеристики лопастей малых ветрогенераторов. При использовании метода BEM в программном комплексе ANSYS были смоделированы условия, в которых на лопастях образуется лед, что приводит к снижению их эффективности. Основными факторами, влияющими на обледенение, стали температура, влажность воздуха и размер капель воды. Результаты показывают значительное уменьшение производительности турбин в условиях обледенения, что подчеркивает необходимость разработки эффективных методов борьбы с этим процессом для улучшения работы ветрогенераторов в холодных регионах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Список источников

1. Kangash A. Numerical study of icing impact on the performance of pitch-regulated large wind turbine / A. Kangash, M. Virk, P. Maryandyshev // Wind Engineering. 2022. Т. 47. С. 0309524X2211301.

2. Jin J. Y. Study of Ice Accretion on Horizontal Axis Wind Turbine Blade Using 2D and 3D Numerical Approach / J.Y. Jin [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 166236–166245.

ЭКОМАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО: СИНЕРГИЯ CZTS И ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Т. О. Зинченко

Пензенский государственный университет
440026, Российская Федерация, Пенза, ул. Красная, д. 40
scar0243@gmail.com

Переход к углеродно нейтральной энергетике требует внедрения экологически чистых и доступных материалов. Одно из наиболее перспективных решений – солнечные панели на основе Cu_2ZnSnS_4 (CZTS), безопасного и недорогого полупроводника. В сочетании с прозрачными проводящими оксидами (ППО), такими как ZnO:Al, возможно создать высокоэффективные, экологически устойчивые устройства. В работе рассматриваются методы оптимизации свойств ППО, минимизация потерь на интерфейсах ППО/CZTS и экологические преимущества данной технологии. Рассчитанный КПД солнечных панелей достигает 10,5 %, а углеродный след снижается на 50 % по сравнению с аналогами.

В современных условиях перехода к возобновляемой энергетике все большее внимание уделяется экологической безопасности материалов. CIGS и CdTe, хоть и демонстрируют высокую эффективность, но зависят от токсичных и редкоземельных элементов. Cu_2ZnSnS_4 (CZTS), в основе которого лежат распространенные и безопасные элементы (Cu, Zn, Sn, S), становится привлекательной альтернативой [1]. Для реализации высокоэффективных солнечных панелей ключевую роль играют прозрачные проводящие оксиды (ППО), выполняющие функции проводящего электрода и пропускающие солнечный свет в активный слой. Однако многие коммерческие ППО, например ITO (оксид индия-олова), дороги и ограничены в ресурсах. В работе предлагается использование ZnO:Al как дешевого и доступного аналога, совместимого с CZTS [2]. Цель исследования – оптимизация сочетания CZTS и ППО для создания эффективных, устойчивых солнечных панелей.

Для достижения этих характеристик в рамках исследования был применен метод спрей-пиролиза, позволяющий эффективно контролировать параметры осаждения, такие как температура подложки, концентрация раствора и состав прекурсоров. В результате удалось получить слои ZnO:Al с прозрачностью более 88 % в диапазоне длин волн 400–800 нм, что сопоставимо с прозрачностью эталонного материала ITO.

Проведенные расчеты показали, что удельное сопротивление слоя ZnO:Al составляет приблизительно $4{,}2\cdot10^{-4}$ Ом·см, что достигается при концентрации носителей заряда около 5×10^{19} см$^{-3}$ и подвижности 30 см^2/(В·с).

Для обеспечения высокой производительности солнечных панелей важно достичь максимальной прозрачности и проводимости ППО. Прозрачные проводящие слои ZnO:Al были получены методом спрей-пиролиза с контролем температуры подложки, концентрации раствора и состава прекурсоров.

Граница между прозрачным проводящим оксидом (ППО) и активным слоем Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) играет решающую роль в эффективности солнечных панелей, так как именно на этой границе могут происходить значительные потери из-за рекомбинации носителей заряда. Для снижения этих потерь в исследовании был использован буферный слой ZnS, который выполняет функцию переходного материала, минимизируя несовместимость кристаллических структур и энергию дефектов на границе ППО/CZTS.

© Зинченко Т. О., 2025

Экспериментально были изучены зависимости эффективности солнечных панелей от толщины буферного слоя в диапазоне от 10 до 100 нм. Оптимальная толщина составила 50–60 нм, при которой наблюдалось снижение рекомбинационных потерь на 15 % и повышение теоретического КПД панели до 12,6 % (рис. 1). Анализ методом спектроскопии импеданса подтвердил, что буферный слой устраняет энергетические барьеры для переноса заряда, а также снижает концентрацию поверхностных дефектов, которые могли бы выступать центрами рекомбинации.

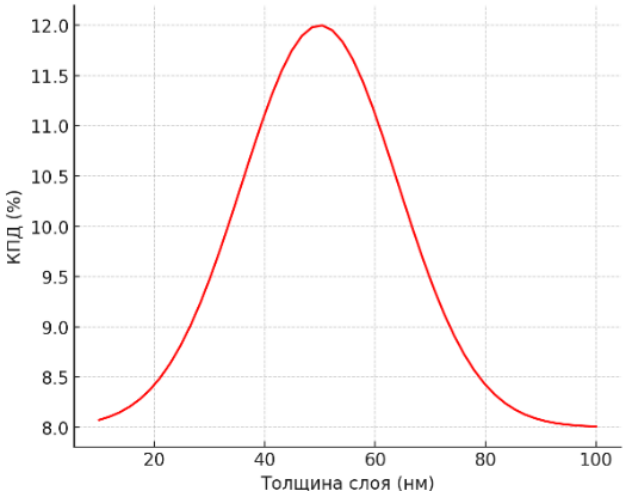
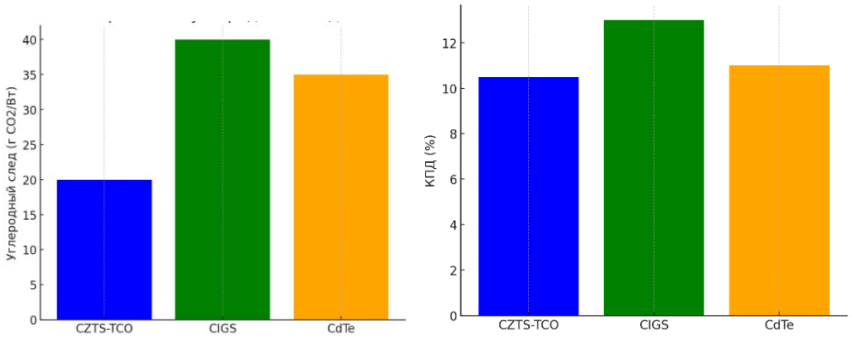


Рис. 1. КПД в зависимости от толщины буферного слоя

Использование CZTS и ZnO:Al снижает негативное воздействие на окружающую среду и делает производство солнечных панелей более доступным. В ходе анализа жизненного цикла (LCA) и расчета углеродного следа панелей с использованием CZTS и ППО (рис. 2, *а*) было установлено, что углеродный след панелей на основе CZTS-ППО составляет примерно 20 г CO_2/Вт, что в два раза меньше, чем у CIGS [3], где этот показатель достигает 40 г CO_2/Вт. Доступность и экологическая безопасность таких материалов, как Cu, Zn, Sn и S, в сочетании с экономичностью метода спрей-пиролиза, делают технологию CZTS-ППО конкурентоспособной. На графике сравниваются углеродный след и КПД солнечных панелей CZTS-ППО, CIGS и CdTe (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Характеристики CZTS-ППО, CIGS и CdTe:
а – углеродный след; *б* – КПД солнечных панелей

Прототип солнечных панелей на основе CZTS и ZnO:Al продемонстрировал высокий КПД, который в экспериментальных условиях составил 10,5 % при плотности

тока 24 мА/см² и напряжении холостого хода 0,7 В. Несмотря на то, что эффективность CZTS-ППО немного уступает CIGS (13 %), экологические и экономические преимущества этой технологии делают ее более перспективной для массового внедрения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00343.

Список источников

1. Wang Y., Zeng J., Wang X., Li Y., Xu F., Zhang W., Li J., Li Y., Song Y., Liu Z. Recent advancements in Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) thin film solar cells: material properties, fabrication techniques, and performance optimization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 145. P. 111074. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111074.

2. Zhao Y., Liu L., Li X., Liu X., Li Z., Song Y., Zhang S., Zhang Z. ZnO:Al thin films prepared by spray pyrolysis: a review of synthesis, properties, and applications in optoelectronic devices // Materials Science in Semiconductor Processing. 2023. Vol. 143. P. 106406. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.106406.

3. Zhang Y., Duan L., Li X., Liu Y., Zheng L., Wang L., Li C., Shi J., Chen Q., Wang H. Carbon footprint and cost analysis of CZTS and CIGS solar cells: A comparative study // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 377. P. 134490. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134490.

СОСТАВ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ

Д. М. Головко[1], К. Ю. Вершинина[1*], В. В. Дорохов[1, 2], Д. С. Романов[1, 2]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** vershininaks@tpu.ru*

Выполнено исследование горения топливных композиций на основе угля, угольного шлама, древесных отходов и воды в различных пропорциях. Определен состав дымовых газов, формирующихся при нагреве и горении топлив. Установлено, что при росте температуры в диапазоне 700–900 °C средние выбросы SO_2 увеличивались в 2–4 раза. Наибольший эффект добавок биомассы на снижение выбросов SO_2 регистрировался в температурном диапазоне 800–900 °C, обеспечивая снижение концентраций в среднем в 1,4–2 раза. Установлено, что использование жидких композиционных топлив позволяет снизить концентрацию оксидов азота в продуктах сгорания на 6–25 % в сравнении с каменным углем при сохранении идентичной теплотворной способности топлива. Полученные данные подтверждают высокий энергетический и экологический потенциал утилизации смесевых топлив и целесообразность развития технологий переработки отходов для рационального использования ресурсов.

В современном мире переработка отходов становится одной из ключевых задач для обеспечения экологической и энергетической устойчивости. Увеличение объемов бытовых и промышленных отходов требует поиска решений, которые позволят снизить их вредное влияние на природу и одновременно извлечь из них пользу, например, в виде энергии. Использование смесевых топлив на основе отходов рассматривается как один из эффективных способов решения проблемы утилизации отходов. Данный подход позволяет не только существенно сократить объемы отходов [1], но и преобразовать их в источник энергии или сырья для дальнейшего использования. Основная задача таких технологий – обеспечение высокой эффективности процесса при минимальном вреде для окружающей среды. Для этого необходимо изучение состава продуктов пиролиза и горения и динамики их образования, что позволяет определить степень экологической безопасности соответствующих процессов. Результаты многих исследований (например, [2]) показывают, что оптимизация процессов сжигания может обеспечить выработку энергии при сравнительно низком уровне выбросов.

В настоящей работе определялся состав дымовых газов при сжигания различных топлив. Основными компонентами для подготовки смесей являлись уголь, угольный шлам и опилки. Дополнительно для некоторых композиционных топлив использовалась вода. Компоненты смешивались в различном процентом соотношении (по массе) для получения смесей следующих составов: 50 % угольный шлам, 50 % опилки; 70 % угольный шлам, 30 % опилки; 50 % угольный шлам 50 % вода; 50 % угольный шлам; 40 % вода, 10 % опилки. Приготовление смесевых топлив проходило с помощью лабораторных весов, гомогенизатора, магнитной мешалки. Масса образца топлива для последующего сжигания составляла 0,1 г. Перед сжиганием топлива печь (R50/250/13 Nabertherm GmbH) с керамическим трубчатым муфелем предварительно нагревалась до необходимой температуры (700–1000 °C). Топливо подавалось в печь автоматически с одной стороны керамической трубки. С другой стороны трубки размещался зонд га-

© Головко Д. М., Вершинина К. Ю., Дорохов В. В., Романов Д. С., 2025

зоаналитической системы Тест–1 («Бонэр – ВТ», г. Новосибирск). Во время эксперимента зонд газоанализатора размещался вблизи топливного образца для отбора пробы дымовых газов в течение всего периода горения. В состав газоаналитической системы также входила система конденсации и фильтрации, измерительный блок с группой сенсоров (указаны диапазон и погрешность): электрохимические – O_2 (0–25 %, ±0,2 %), CO (0–40000 ppm, ±5 %), SO_2 (0–1000 ppm, ±5 %), NO (0–2000 ppm, ±5 %), NO_2 (0–500 ppm, ±7 %), H_2S (0–500 ppm, ±5 %); оптические – CO_2 (0–30 %, ±2 %), CH_4 (0–30 %, ±5 %), CO (0–30 %, ±5 %); полярографический – H_2 (0–5 %, ±5 %). После размещения топлива и зонда газоанализатора в печи, ее отверстия герметично закрывались.

В табл. 1 представлены нормированные значения концентраций SO_2 и NO, т. е. приведенные к теплоте сгорания сжигаемого топлива. Данные получены в экспериментах при температуре 1 000 °С. Наибольшее увеличение концентрации SO_2 относительно каменного угля (на 10 %) зарегистрировано для смеси «50 % угольный шлам и 50 % вода». Результат объясняется тем, что вода может способствовать микровзрывным эффектам при нагреве смеси, таким образом увеличивая степень выгорания органической массы, разложения и окисления серосодержащих соединений. Однако для смеси «50 % угольный шлам, 50 % опилки» выбросы SO_2 уменьшились на 40 %, что связано с изменением химического состава смеси, обусловлено это пониженным содержанием серы в опилках, в отличие от угля. Кроме того, смеси с биомассой характеризуются повышенным содержанием щелочных и щелочноземельных металлов, которые активны в отношении оксидов серы и могут связывать серу в твердые соединения (в виде солей). Это также подтверждается тем, что при сжигании опилок без дополнительных компонентов, относительные выбросы SO_2 были наименьшими среди рассмотренных топлив.

Таблица 1

Концентрации оксидов серы и азота, приведенные к теплоте сгорания топлив (для условий сжигания в модельной камере)

Состав	Уголь	Угольный шлам	Опилки	50 % угольный шлам, 50 % опилки	70 % угольный шлам, 30 % опилки	50 % угольный шлам, 50 % вода	50 % угольный шлам, 40 % вода, 10 % опилки
NO, ppm/(МДж/кг)	10,1	8,1	2,8	4,9	5,5	7,6	6,5
SO_2, ppm/(МДж/кг)	5,7	5,5	1,3	3,9	4,12	6,1	3,7

Максимальная концентрация NO была характерна углю и угольному шламу, что связано с более высоким содержанием азота в топливе. Топливо «50 % угольный шлам и 50 % вода», а также «50 % угольный шлам, 40 % вода и 10 % опилки», демонстрировали заметное снижение концентрации NO на 15–40 % по сравнению с угольным шламом. Такое снижение происходит из-за разбавления угольного шлама менее азотосодержащими компонентами, а также снижением температуры в зоне горения за счет добавления воды. Наиболее значительное снижение выбросов NO (около 70 %) относительно угольного шлама регистрировалось при сжигании опилок и смесей «70 % угольный шлам, 30 % опилки», «50 % угольный шлам, 50 % опилки».

Исследования показали перспективность использования смесевых топлив на основе отходов как эффективный подход к переработке бытовых и промышленных отходов. Анализ дымовых газов показал, что добавление опилок или воды в состав топливных смесей существенно снижает выбросы NO и SO_2, что связано с изменением химического состава топлива и условий горения.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-543.

Список источников

1. Traven L. The potential for a combined heat and power (CHP) generation from municipal solid waste: A case study of Croatia // Case Stud. Chem. Environ. Eng. 2023. Vol. 8. P. 100450.

2. Lasek J. A., Matuszek K., Hrycko P., Głód K., Li Y.-H. The combustion of torrefied biomass in commercial-scale domestic boilers // Renew. Energy. 2023. Vol. 216. P. 119065.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ТОРРЕФИКАЦИИ

А. Е. Костогоров[1*], В. К. Любов[2]

[1] АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат»
163900, Российская Федерация, Новодвинск, Мельникова, д. 1
[2] Северный Арктический федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Российская Федерация, Архангельск, Набережная северной Двины, д. 17
** ae.kostogorov@mail.ru*

Предлагаемая работа посвящена исследованию процесса низкотемпературного пиролиза – торрефикации биотоплива и способам его практической реализации. Торрефицированная биомасса обладает повышенной энергетической эффективностью, влагостойкостью, способностью к длительному хранению и размолу до тонкодисперсного состояния. Применение торрефикации повышает энергетическую плотность, механическую и биологическую стойкость биотоплива, позволяя ему не только заменить в качестве добавки или полностью каменный уголь на оборудовании, предназначенном для его сжигания, но и сделает экономически целесообразной доставку модифицированного биотоплива на большие расстояния.

Биотопливо – возобновляемый энергетический ресурс на основе биомассы растительного и животного происхождения. Источником эффективной энергии могут стать: отходы сельского хозяйства – солома, лузга; лесной промышленности – опилки; отходы рубки и распиловки леса: пни, ветви деревьев, неделовая древесина (тополь, ольха и др.); биомасса специально выращенных энергетических культур. Значительным плюсом использования биотоплива может стать его «нейтральный углеродный след», низкая зольность и низкое содержание серы [1–5].

Измельченная биомасса и биомасса, превращенная прессованием в топливные пеллеты или брикеты, является готовым топливом для использования в энергетических и отопительных установках, при этом пеллеты и брикеты обладают рядом преимуществ по сравнению с просто измельченной биомассой: объем складов хранения прессованного топлива уменьшается в разы, снижаются затраты на его транспорт, прессованное топливо эффективно горит, процесс его сжигания легко автоматизируем. Однако пеллеты и брикеты гигроскопичны, биологически нестойки, их транспортирование, хранение и сжигание требует специализированного оборудования. Из-за высокого содержания летучих компонентов во время начальной стадии горения образуется большое количество дыма, что является причиной неполного сгорания горючих газов, отмечены случаи самопроизвольного возгорания силосов хранения измельченного и улучшенного прессованием биотоплива.

Давно известна технология улучшения потребительских свойств древесного топлива пиролизом, осуществляемым при пониженном содержании кислорода [6]. В настоящее время в мировой практике низкотемпературный пиролиз является актуальной ступенью улучшения эксплуатационной и энергетической эффективности биотоплива – торрефикацией в инертной среде при температуре 250–300 °C с последующим охлаждением [3].

Для исследования процесса торрефикации разработана, изготовлена и опробована экспериментальная установка, состоящая из реакционной камеры, подвешенной на датчике электронных весов, модуля управления на микроконтроллере, монтажного каркаса, персонального компьютера и программного обеспечения для управления режимом работы установки и записи параметров опыта. Установка поз-

© Костогоров А. Е., Любов В. К., 2025

воляет реализовать нагрев биомассы в конвективных потоках инертного газа или теплопередачей через газонепроницаемую стенку до назначенной температуры в интервале 70–500 °С с точностью ± 1 °С и записать изменение массы и температуры (в трех слоях) пробы массой от 20 до 60 г с интервалом от 20 с. Результатом экспериментов должна стать зависимость массового выхода биоугля от температуры и времени торрефикации, влияние вида исходного биотоплива на гранулометрический состав торрефиката и другие факторы, отражающие процесс торрефикации [7]. Получено торрефицированное биотопливо при разных температурных и временных режимах обработки из отходов переработки древесного сырья, образовавшихся при производстве щепы для варки целлюлозы в технологическом цикле целлюлозно-бумажного производства, характер теплообмена – через стенку. Исходный материал имел неоднородный гранулометрический состав, в котором частицы размером 1,0 мм и более составляли по массе 64,47 %. Получены результаты изменения влажности, зольности, выхода летучих веществ и удельной теплоты сгорания биотоплива в результате торрефикации при разных температурных условиях и времени выдержки. Подтвержден экзотермический [6] характер процесса торрефикации.

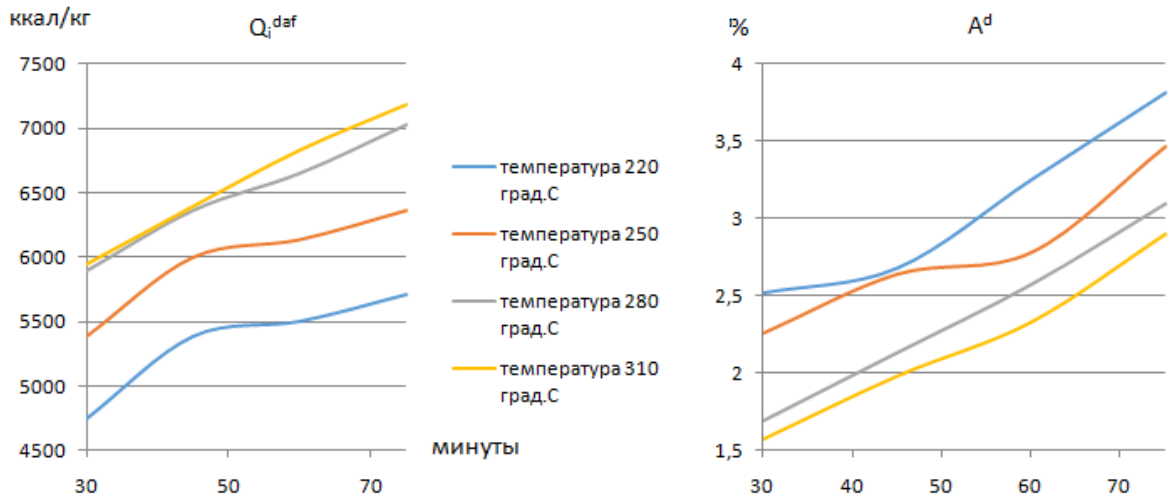


Рис. 1. Графики изменения теплотворной способности
и зольности торрефицированного биотоплива

На рис. 1 приведены графики изменения теплотворной способности и зольности торрефицированного биотоплива в зависимости от времени и температуры процесса торрефикации.

Список источников

1. Зимаков А. В. Есть ли будущее у угольных ТЭС в Европе? // Вестник МГИМО-Университета. 2017. № 5. С. 130–150.
2. Овсянко А., Юдкевиич Ю. Торрефикат: мифы, значение, применение, производство // Лес-ПромИнформ. 2015. № 4. С. 130–132.
3. Передерий С. Торрефикация биомассы: за и против // ЛесПромИнформ. 2019. № 1. С. 150–153.
4. Любов В. К., Попова Е. И., Шкаева Н. В. [и др.] Исследование процесса торрефикации древесины // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 3 (78). С. 38–45.

5. Любов В. К., Попова Е. И., Попов А. Н. Торрефакция гидролизного лигнина // Химия твердого топлива. 2018. № 4. С. 24–33.

6. Никитин Н. И. Очерки по химии древесины: с кратким очерком строения древесины Л.А. Иванова. Л. : Науч. хим.-техн. изд-во : Гос. тип. им. И. Федорова, 1926.

7. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента : монография. М. : Мир, 1972. 376 с.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ БИОДИЗЕЛЬНОГО МИКРОЭМУЛЬСИОННОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ БИОКОМПОНЕНТОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А. Е. Ашихмин*, М. В. Пискунов,
А. И. Кожевникова, А. Н. Казанцев, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** aeatpu@gmail.com*

Получены результаты измерений физико-химических свойств дизельного и биодизельного микроэмульсионного топлива, содержащего метиловые эфиры жирных кислот рапсового масла, дистиллированного таллового масла и жирных кислот таллового масла. Измерены физико-химические свойства микроэмульсионного топлива и его компонентов. Определены характеристики зажигания и горения такого топлива. Для приближения условий опытов к реальным энергетическим объектам температура в модельной камере сгорания контролируемо варьировалась в диапазоне от 500 до 1000 °С. Установлено влияние типа биодобавки на характеристики термического разложения. Определены условия эффективного сжигания дизельных и биодизельных микроэмульсий.

В работе [1] авторы пишут о перспективности биотоплив на основе микроэмульсии из-за снижения концентрации вредных выбросов в дымовых газах, повышения эффективности сгорания вследствие интенсификации теплообмена за счет наличия низкокипящего компонента в составе, а также экономии нефтяных топлив за счет добавления растительных масел и их производных. Микроэмульсионные биотоплива являются потенциальным кандидатом для широкого применения в ДВС и энергетических объектах. Тем не менее необходимы комплексные исследования для оптимизации характеристик биотоплива с микроэмульсионным строением.

Так, целью данного исследования является определение влияния типа биодобавки в составе топливных микроэмульсий на характеристики термической конверсии и определение условий эффективного сжигания микроэмульсионного топлива на энергетических установках. Будут рассмотрены топливные композиции с внутренней структурой микроэмульсии и с добавлением трех типов биокомпонентов: метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) рапсового масла, МЭЖК дистиллированного таллового масла и жирных кислот таллового масла. Приготовлены биокомпоненты самостоятельно путем переэтерификации сырых масел с использованием гомогенных катализаторов.

Экспериментально определены значения времени задержки зажигания t_{delay} образцов биодизельного микроэмульсионного топлива (рис. 1) на стенде, аналогичном использованному в работе [2]. Температура в камере муфельной печи T_{c} от 500 до 1000 °С соответствует зарегистрированным температурам в камерах сгорания энергетических объектов.

Значения t_{delay} исследуемых топлив в зависимости от температуры в камере сгорания уменьшаются в 1,5–5 раз за счет интенсификации прогрева капли. Установлено, что при T_c = 1000 °С разница между значения t_{delay} не превышает 10 %, свидетельствуя о том, что повышение температуры окислителя минимизирует отличия в t_{delay} в зависимости от компонентного состава топливных смесей (рис. 1). Однако в сравнении с дизельным топливом и биодизельными составами разница в задержке зажигания – до 65 %. Этот эффект достигается засчет снижения цетанового числа микроэмульсионного топлива вследствие добавления воды и эмульгирующих веществ.

© Ашихмин А. Е., Пискунов М. В., Кожевникова А. И., Казанцев А. Н., Стрижак П. А., 2025

Экспериментально определены концентрации углекислого и угарного газа на испытательной установке, аналогичной использованной в работе [2]. Давление впрыска топлива составляло 10 бар, а коэффициент эквивалентности поддерживался равным 1 во время всего эксперимента.

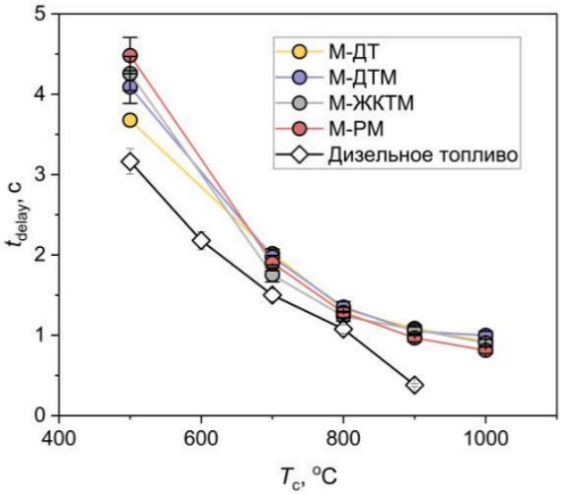


Рис. 1. Значения времени задержки зажигания t_{delay} микроэмульсионного топлива с добавкой разных биокомпонентов при увеличении температуры в камере сгорания T_c, сравниваемые со значениями t_{delay} для дизельного топлива и микроэмульсии на основе дизельного топлива М-ДТ

На рис. 2 представлено отношение концентраций монооксида углерода (*CO*) к диоксиду углерода (CO_2), содержавшихся в дымовых газах после выгорания порций (150 мл) микроэмульсионного топлива, в зависимости от вида МЭЖК в топливных композициях.

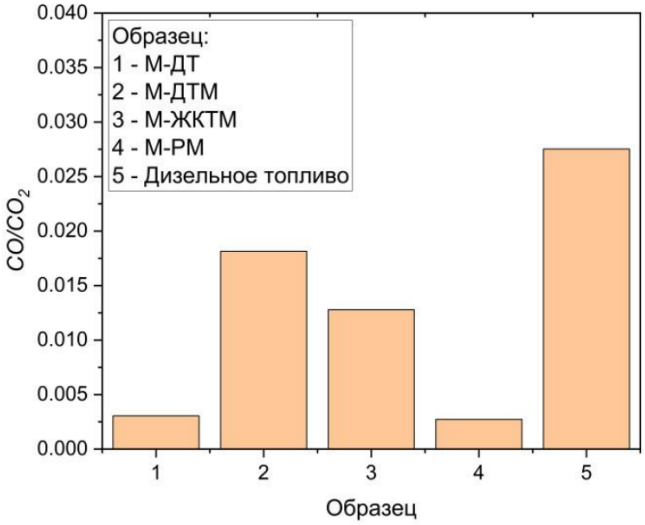


Рис. 2. Отношение содержания монооксида углерода к диоксиду углерода в составе дымовых газов

Концентрация *CO* в составе дымовых газов при горении образцов 2 и 3 с содержанием биодобавки на основе дистиллированного таллового масла и жирных кислот таллового масла превосходит на 74 % и 67 % остальные образцы. Добавление МЭЖК

рапсового масла (образец 4) не оказывает существенного влияния на содержание CO и CO_2. Однако в сравнении с дизельным топливом все образцы микроэмульсионного топлива имеют меньшее отношение CO/CO_2, в среднем на 65 %. Повышение концентрации CO_2 в совокупности со снижением концентрации CO означает увеличение полноты выгорания микроэмульсионного топлива. Повышение полноты выгорания в свою очередь положительно сказывается на снижении концентрации вредных веществ, содержащихся в дымовых газах.

Список источников

1. Ashikhmin A., Khomutov N., Piskunov M., Strizhak P., Yanovsky V. Synergistic effect of the fuel microemulsion characteristics on drop interaction with a hot wall. Energy and Fuels. 35, 8042–8050, 2021.

2. Ashikhmin A., Verkhodanov D., Piskunov M., Strizhak P. Operational and Environmental Tests of Nanomembrane-Produced Rapeseed Biodiesel at a Small Biomass-Fuelled Power Plant. Waste and Biomass Valorization. 2024.

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ: ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

А. Н. Козлов*, В. В. Баденко,
Е. В. Губий, М. В. Пензик

Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН
664033, Российская Федерация, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130
** kozlov@isem.irk.ru*

Представлен анализ структуры отходов лесопромышленного и агропромышленного комплексов, твердых коммунальных отходов в России и в разрезе федеральных округов. Осуществлен экономический анализ производства пеллет из разных видов отходов. Разработана и протестирована установка торрефикации отходов для дальнейшего производства пеллет. Определены оптимальные соотношения для производства гранул из отходов растениеводства. Оценены перспективы использования пеллет в слоевых газогенераторах для автономного электроснабжения.

В настоящее время происходит энергетический переход, целью которого является сокращение зависимости от ископаемых источников энергии и перехода к более экологичным и устойчивым возобновляемым источникам энергии, в т. ч. ресурсам биомассы. Биомассу необходимо рассматривать не только в качестве отходов или неиспользуемого материала, а как ценный ресурс, который может быть использован для производства различных продуктов и энергии с минимальным воздействием на окружающую среду. Применение подхода, основанного на замкнутом экономическом цикле, позволяет максимально использовать потенциал ресурсоэффективности при устойчивом использовании биомассы. Биомасса может быть преобразована в различные энергетические продукты, такие как биотопливо или биогаз, что может способствовать формированию более устойчивого и диверсифицированного энергетического баланса. Топливной базой биомассы являются отходы лесопромышленного и агропромышленного комплексов, а также твердые коммунальные отходы.

По данным Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации, в 2022 г. на территории России было образовано 9017,3 млн т отходов производства и потребления (далее – отходов), что на 6,7 % выше уровня 2021 г. При этом в 2022 г. было утилизировано лишь 45,5 % всех отходов. Одной из основных технологий переработки отходов является его гранулирование (пеллетизация), которое позволяет сократить расходы на транспортировку, хранение, повысить эффективность и степень автоматизации, используемого оборудования. Использование пеллетезированного топлива имеет двойной эффект: экологический (в части утилизации отходов) и экономический (производитель получает дополнительный доход от продажи или собственного потребления вторичного продукта, а потребитель получает экологически чистое топливо по сравнительно низкой цене).

В итоге целью работы является: 1) анализ структуры отходов производства и потребления, оценка их доли, пригодной для биоэнергетики; 2) анализ перспективных технологий пеллетизации отходов; 3) оценка эффективности использования отходов в энергетических целях.

В результате была проанализирована структура отходов производства и утилизации по федеральным округам России. Показано, что в четырех федеральных округах (ЮФУ, ПФО, СКФО и СФО) утилизируется отходов 50 % и более; в ДФО, ЦФО

© Козлов А. Н., Баденко В. В., Губий Е. В., Пензик М. В., 2025

и УФО утилизируется 39–47 % отходов, при этом в СЗФО утилизируется меньше 20 % (табл. 1).

Таблица 1

Объемы образованных и утилизированных отходов в России в 2022 г.

Федеральный округ	Образование отходов, млн т	Утилизация отходов, млн т	Доля утилизированных отходов, %
ЦФО	267,7	116,5	43,5
СЗФО	526,3	94,3	17,9
ЮФО	38,6	23,8	61,7
СКФО	3,6	1,8	50,0
ПФО	129,7	73,1	56,4
УФО	454,2	212,4	46,8
СФО	5603,5	2803,5	50,0
ДФО	1993,6	781,6	39,2
РФ, всего	9017,3	4107,0	45,5

Осуществлен экономический анализ производства пеллет из разных видов отходов. Себестоимость пеллет из отходов ЛПК, АПК и ТКО составляет 6,1; 6,4 и 8,2 тыс. руб./т соответственно, также показано, что себестоимость при условно бесплатном сырье составит 3,5; 3,7 и 4,3 тыс. руб./т соответственно Анализ показал, что ключевым фактором в себестоимости пеллет является именно стоимость исходного сырья.

Для получения торрефицированных топливных гранул была разработана и смонтирована лабораторная установка. Данная установка позволяет непрерывно производить смешивание компонентов в необходимых пропорциях с возможностью их торрефикации при заданных значениях температур и времени пребывания в зоне нагрева. Производительность установки составляет от 3 до 7 кг в час в зависимости от используемого сырья. Установка была испытана для торрефикации лузги подсолнечника, которая наряду с соломой является ключевым отходом агропромышленного комплекса (АКП). Торрефицированная лузга подсолнечника была использована для формирования композитного брикета с соломой в разных соотношениях.

Для полученных пеллет из торрефицированной лузги и соломы были определены технические характеристики и механические свойства (табл. 2).

Таблица 2

Технические и механические свойства пеллет

Состав пеллеты	Выход летучих, %	Зольность, %	Теплота сгорания, МДж/кг	Насыпная плотность, г/мл	Мех. прочность, %
Солома	80	5,44	16,85	0,33	95,9
Лузга	63	6,97	22,07	0,57	30,2
Лузга 25 %, солома 75 %	73	5,65	19,20	0,42	91,7
Лузга 15 %, солома 85 %	75	4,65	17,18	0,44	93,2
Лузга 10 %, солома 90 %	77	5,01	16,88	0,40	95,7

Определено, что при увеличении доли соломы в составе пеллет значительно увеличивается механическая прочность при незначительном изменении технических характеристик. Оптимальное содержание лузги подсолнечника составляет не менее 10 %.

С использованием полученных пеллет была осуществлена газификация в слоевом газогенераторе, которая показала более низкие показатели эффективности по сравнению с товарными древесными пеллетами.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 24-29-00596 (https://rscf.ru/project/24-29-00596).

ТЕПЛОВОЙ НАСОС ВМЕСТО ГРАДИРНИ

И. И. Гогонин

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 1
gogonin@itp.nsc..ru

В докладе делается попытка ответить на вопрос, насколько выгодно использование теплового насоса вместо градирни, когда источником энергии является вода на выходе из труб конденсатора электростанции. Приведены оценочные результаты сравнительного анализа. Показано, что замена градирни тепловым насосом приводит к значительному повышению экономической эффективности станции. Срок окупаемости подобной модернизации станции не превышает одного года. Недостаток подобной замены – заметное увеличение отапливаемых площадей. Станция становится многоконтурной, поэтому усложняется ее обслуживание.

Хорошо известно, что вода, охлаждающая конденсатор электростанции, уносит до 40 % общей энергии, полученной в котле или реакторе. При конденсации массового потока пара 1 кг/с необходим массовый поток охлаждающей воды – около 50 кг/с [1].

Существует несколько способов охлаждения конденсатора. Одним из них является прямоточный: вода берется из ближайшей реки или озера и после охлаждения конденсатора сбрасывается обратно в водоем. По санитарным нормам перед сбросом температура воды должна быть снижена на 8–12 °С. Для этого сооружаются водоемы, где за счет испарения в воздух вода охлаждается перед сбросом [1].

Другим часто использующимся способом охлаждения воды является замкнутый цикл с использованием градирни. После охлаждения в градирне вода снова подается на вход в конденсатор. Однако градирня – это дорогостоящее и громоздкое сооружение. Для мощных электростанций высота градирни колеблется от 90 до 150 м, а диаметр на выходе достигает 40–60 м. Кроме того, градирни потребляют электроэнергию на привод водяного насоса, а в некоторых конструкциях и на привод вентилятора [1].

В представленном докладе делается попытка в первом приближении ответить на вопрос, насколько выгодно использование теплового насоса вместо градирни, когда источником его энергии является вода на выходе из труб конденсатора электростанции.

Предполагается, что парогенератор теплового насоса является тонкопленочным аппаратом с горизонтальным расположением оребренных труб. Вода, обогревающая трубы, движется внутри труб, а наружная поверхность оребренных труб орошается кипящей пленкой изобутана при спутном движении пара и пленки [2].

Конденсатор теплового насоса предполагается изготовить из таких же оребренных труб, как и парогенератор. Алгоритм расчета конденсатора изложен в [3; 4]. При оптимальных параметрах оребрения теплоотдача на пучке оребренных труб может быть на порядок интенсивнее, чем на пучке гладких труб.

К недостаткам использования теплового насоса вместо градирни следует отнести заметное осложнение конструкции станции. Даже обычная тепловая станция становится многоконтурной. Требуется монтаж дополнительного оборудования, дополнительные площади, дополнительные специалисты.

Самое сложное: необходимо иметь компрессоры огромной производительностью 285 кг/с, или $3{,}8 \cdot 10^6$ л/мин. Для изобутана давление на выходе из компрессора должно быть около 16 бар с температурой пара не менее 85 °С. Только при таких условиях можно получить из конденсатора теплового насоса воду с температурой 75 °С для бытовых нужд и обогрева жилищного массива. Если половина нагретой воды будет рас-

© Гогонин И. И., 2025

ходоваться на бытовые нужды, то в этом случае полная мощность теплового насоса уменьшится вдвое и составит около $38 \cdot 10^6$ Вт.

Охлаждение воды двух конденсаторов водяного пара позволяет получить суммарную мощность двух тепловых насосов $76 \cdot 10^6$ Вт, что составляет 25,3 % от общей мощности станции на 300 мВт.

Тем не менее предварительные оценки показывают, что при стоимости электроэнергии 5 руб/кВт·ч годовая экономия составит $3{,}32 \cdot 10^9$ руб.

Эта сумма с большим запасом окупит все расходы на создание теплового насоса.

Таким образом, в докладе приведены оценочные результаты сравнительного анализа при замене градирни электростанции тепловым насосом.

Показано, что замена градирни тепловым насосом приводит к значительному повышению экономической эффективности станции. Срок окупаемости подобной модернизации станции не превышает одного года.

Недостатком подобной замены следует считать заметное увеличение отапливаемых площадей. Станция становится многоконтурной, поэтому усложняется ее обслуживание.

Список источников

1. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции. М. : Энергия, 1976. 447 с.

2. Гогонин И. И. Тонкопленочные парогенераторы бинарных геотермальных электростанций // Холодильная техника. 2022. Т. 111. № 2. С. 97–104.

3. Гогонин И. И., Кабов О. А. Влияние плотности орошения на теплообмен при конденсации на пакетах ореберных труб// Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 58. № 1. С. 16–22.

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПИРОЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Ю. М. Фалеева*, Г. А. Сычёв

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/2
** faleeva.julia@mail.ru*

Представлены результаты исследования экзотермических эффектов при термической переработке биомассы (пиролизе и торрефикации). В качестве исследуемых материалов использовались древесные опилки и лузга подсолнечника. Исследование проводилось с использованием как аналитического оборудования (анализ методом дифференциально-сканирующей калориметрии), так и лабораторного стенда, включающего реактор с неподвижным слоем и нагревом через стенку. Полученные данные свидетельствуют о самопроизвольном нагреве биомассы за счет экзотермического выделения теплоты до температур, значительно превышающих температуру нагревателя.

К биомассе относятся древесные и сельскохозяйственные отходы, торф и отходы жизнедеятельности различных видов. Использование топлива, полученного гранулированием биомассы, благодаря широкому географическому распространению и постоянному годовому воспроизводству последней, является перспективным решением текущих энергетических и экологических проблем. Однако данное топливо имеет ряд недостатков, таких как низкая плотность энергии, значительная гигроскопичность (способность сорбировать водяные пары из окружающей среды) и подверженность гниению при несоблюдении условий хранения.

В качестве основного технологического процесса улучшения потребительских свойств топлива из различных видов биомассы рассматривается процесс низкотемпературного пиролиза (торрефикации) – нагрев перерабатываемого сырья в инертной газовой среде до температуры, которая обычно составляет 250–300 °C [1]. При торрефикации увеличивается плотность энергии и измельчаемость биотоплива, снижается предел гигроскопичности и подверженность гниению. Биомасса обретает гидрофобные свойства и не требует специальных условий при хранении и транспортировке.

Известно, что термохимическая конверсия биомассы сопровождается экзотермическими реакциями [2]. Ранее проведенные исследования пиролиза в неподвижном слое продемонстрировали, что лигноцеллюлозные материалы, нагретые до относительно низкой температуры, проявляют значительную экзотермичность [3; 4]. Поскольку контроль температуры реакции в течение заданного времени выдержки имеет решающее значение для получения торрефицированной биомассы с требуемыми свойствами, необходимо исследовать механизм экзотермического разогрева, происходящего при термической переработке биомассы.

Настоящая работа была посвящена анализу поведения растительных материалов при пиролизе с использованием аналитического оборудования и реактора с неподвижным слоем при нагреве через стенку. В опытах использовались образцы отходов лесоперерабатывающей и сельскохозяйственной промышленности (древесные опилки и лузга подсолнечника).

Поведение материалов при термическом разложении изучали с использованием прибора синхронного термического анализатора SDT-Q600, TA Instruments. Анализ методом ДСК (дифференциально-сканирующей калориметрии) выявил температурные ин-

© Фалеева Ю. М., Сычёв Г. А., 2025

тервалы проявления экзотермических процессов термического разложения опилок и лузги (рис. 1). В случае древесных опилок температура начала тепловыделения составила 370 °С, что превышает температуру торрефикации. Температурный интервал тепловыделения составил 386–460 °С, пик которого был достигнут при 417 °С. В случае с лузгой подсолнечника температурный интервал экзотермических реакций составил 276–441 °С.

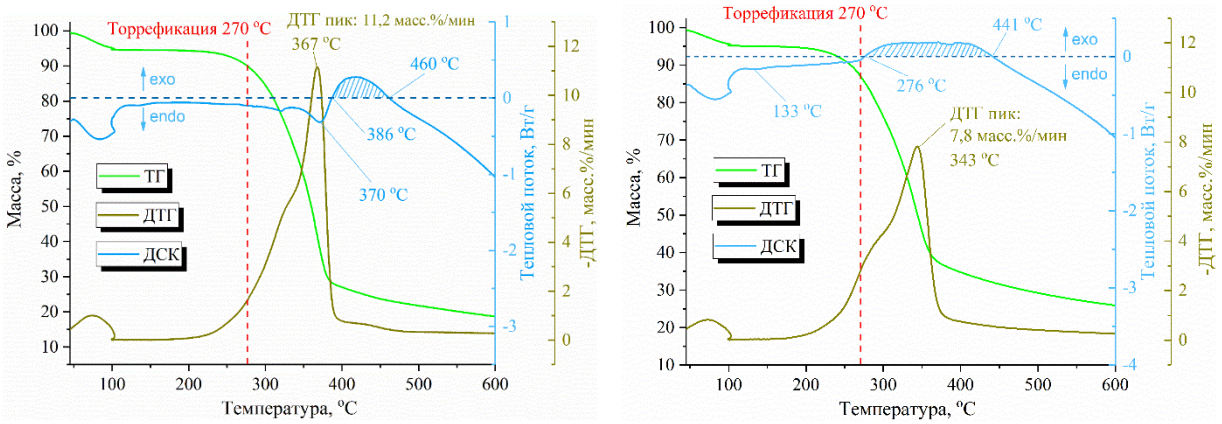


Рис. 1. Результаты ТГ и ДСК анализа ОД (слева) и ЛП (справа)

Исследование тепловых эффектов при торрефикации образцов биомассы в неподвижном слое проводилось в теплоизолированном реакторе с наружным обогревом через стенку с расположенными по всей высоте термопарами (рис. 2). Полезный объем реактора составлял 3,6 дм^3, что позволяло помещать достаточное количество биомассы для наблюдения явления экзотермичности. Температура торрефикации составляла 270 °С.

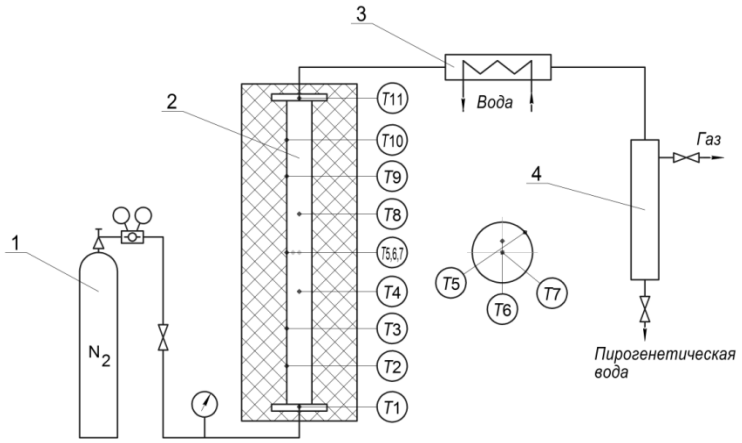


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: *1* – баллон инертного газа (азот); *2* – реактор; *3* – теплообменник; *4* – сепаратор

В результате проведенных исследований было показано, что при торрефикации древесных отходов и лузги подсолнечника в слое материала образуются зоны с температурой, значительно превышающей температуру стенки реактора. Причем процесс торрефикации лузги подсолнечника характеризовался наиболее выраженным перегревом, достигшим значения 100 °С. Полученные экспериментальные данные будут по-

лезны при проектировании технологии получения биотоплива, основанной на процессе торрефикации биомассы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание № 075-00269-25-00.

Список источников

1. Zhang C., Ho S.-H., Chen W.-H., Xie Y., Liu Z., Chang J.-S. Torrefaction Performance and Energy Usage of Biomass Wastes and Their Correlations with Torrefaction Severity Index // Appl. Energy. 2018. Vol. 220. Pp. 598–604.

2. Rath J., Wolfinger M. G., Steiner G. et al. Heat of Wood Pyrolysis // Fuel. 2003. Vol. 82, N 1. Pp. 81–91.

3. Faleeva J. M., Sinelshchikov V. A., Sytchev G. A., Zaichenko V. M. Exothermic Effect During Torrefaction // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 946, conference 1, 012033.

4. Koufopanos C. A., Papayannakos N., Maschio G., Lucchesi A. Modelling of the Pyrolysis of Biomass Particles. Studies on Kinetics, Thermal and Heat Transfer Effects // Can. J. Chem. Eng. 1991. Vol. 69. Pp. 907–915.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВНЕШНЕЙ РЕГЕНЕРАЦИИ В РАБОЧИХ ЦИКЛАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТИПА

И. Н. Сеськин[2*], С. Л. Елистратов[1, 2, 3]

[1] Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 1
[2] Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
[3]Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга
683032, Российская Федерация, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д. 4
** seskin@yandex.ru*

Принципиальное ограничение для эффективной работы высокотемпературных тепловых насосов при больших разностях температур рабочего тела в испарителе и конденсаторе – «горячее дросселирование», вредное влияние которого дополнительно усиливается при предельно низких температурах низкопотенциальных источников тепла. Используемые на практике процессы внутренней регенерации уменьшают потери от «горячего дросселирования», однако не позволяют решить вопросы устойчивой и надежной работы испарителя при утилизации тепла незамерзающих водных источников. Предложено использовать процесс внешней регенерации. Исследование показало, что в случае нагрева воды на переохладителе конденсата можно обеспечить достаточно высокие показатели энергетической эффективности.

Высокотемпературные тепловые насосы (ВТН) являются ключевой технологией энергосбережения, позволяющей обеспечивать нагрев до 80 °С и выше [1]. Однако принципиальным ограничением для их эффективной работы при больших разностях температур рабочего тела в испарителе и конденсаторе является «горячее дросселирование», вредное влияние которого дополнительно усиливается при предельно низких температурах низкопотенциальных источников тепла (НИТ). Используемые на практике процессы внутренней регенерации позволяют уменьшить потери от «горячего дросселирования», но не позволяют решить вопросы устойчивой и надежной работы испарителя ВТН при утилизации тепла незамерзающих водных источников.

Предложено для решения этой задачи использовать процесс внешней регенерации, целевое назначение которой заключается в повышении температуры воды на входе в испаритель ВТН за счет организации возвратных потоков тепла (рециклинга), полезно не используемых в рабочем цикле. Схемы, дающие сравнительное представление о характере его организации, приведены на рис. 1, а данные для сравнительного анализа двух рабочих тел – в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные показатели эффективности схемных решений ТНУ при одинаковой общей холодопроизводительности $Q_И$

Наименование	R-134a			R-600a		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3
$Q_И$, кВт	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
t_{S1}, ºС	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
t_{S2}, ºС	0,50	0,50	1,72	0,50	0,50	1,56

© Сеськин И. Н., Елистратов С. Л., 2025

Окончание табл. 1

Наименование	R-134a			R-600a		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3
W_S, м³/ч	57,4	57,4	57,4	57,4	57,4	57,4
T_o, ºС	–2,50	–2,50	–1,28	–2,50	–2,50	–1,44
P_o, 105 Па	2,67	2,67	2,80	1, 44	1, 44	1,50
t_K, ºС	70	70	70	70	70	70
P_K, 105 Па	21,16	21,16	21,16	11,01	11,01	11,01
t_{W2}, ºС	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
t_8, ºС	64,8	7,0	7,0	64,2	7,0	7,0
G_{PT}, кг/с	0,996	0,536	0,988	0,518	0,297	0,514
V, м³/ч	284	153	270	495	284	475
x	0,496	0,062	0,054	0,464	0,061	0,055
Q_{PT}	9,0	5,1	9,0	8,4	4,8	8,4
$Q_К$, кВт	157,0	84,6	155,0	152,7	87,7	151,3
$Q_{ОК}$, кВт	–	46,1	84,7	–	42,5	70,0
$Q = Q_К + Q_{ОК}$,	157,0	130,7	155,0*	152,7	130,2	151,3*
Ne, кВт	63,3	34,1	61,1	58,6	33,7	57,3
$\varphi = Q/Ne$	2,48	3,83	2,54	2,61	3,87	2,64
$\varphi^* = 1 + Q_И/Ne$	2,48	3,83	3,92	2,61	3,87	3,64

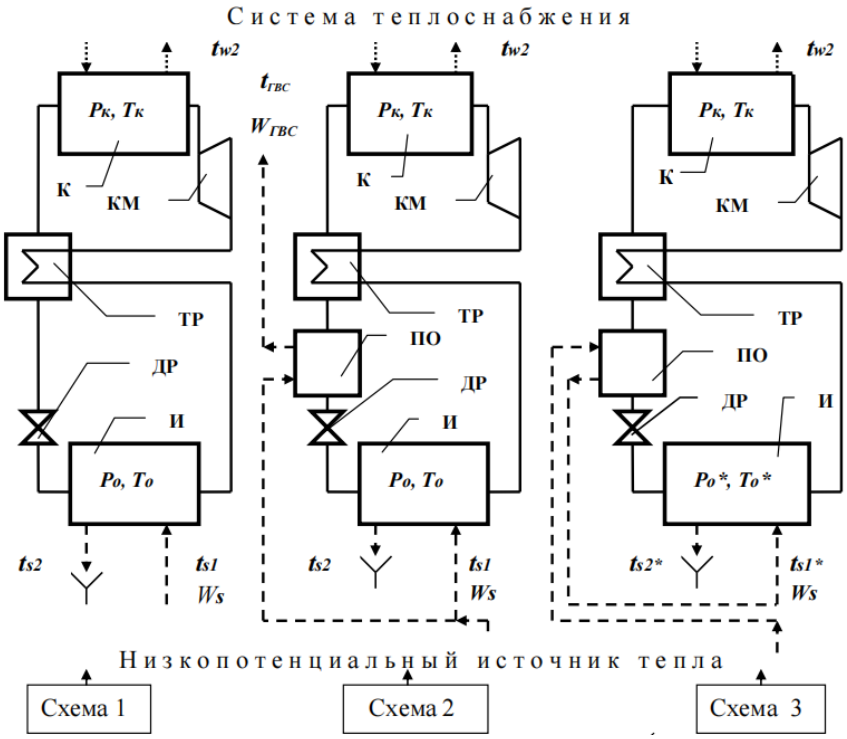


Рис. 1. Схемы организации тепловых потоков ВТН:
КМ – компрессор; *ТР* – теплообменник регенеративный парожидкостной;
К – конденсатор; *ПО* – переохладитель; *ДР* – дроссельное устройство; *И* – испаритель.

Анализ расчетных данных (табл. 1) показал, что в случае нагрева воды на переохладителе конденсата ПО (рис. 1, схема 2) можно обеспечить достаточно высокие показатели энергетической φ эффективности по сравнению с базовым вариантом (рис. 1, схема 1) и с внешней регенерацией (рис. 1, схема 3). Положительными моментами при использовании внешней регенерации являются повышение температуры T_o в испарителе и на входе в испаритель, возможность максимально полного устранения «горячего дросселирования».

Список источников

1. Елистратов С. Л. Высокотемпературные тепловые насосы // Десять прорывных идей в энергетике на ближайшие десять лет : сборник статей Глобальной энергетической ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики. М., 2021. Т. 2. С. 85–99.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗ-ГАЗА, ПОЛУЧАЕМОГО ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

В. А. Лавренов*, Ю. М. Фалеева

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/2
** v.a.lavrenov@gmail.ru*

На установке непрерывного действия проведены экспериментальные исследования процесса двухстадийной пиролитической переработки растительного сырья с различными добавками в синтез-газ. В качестве основного сырья использовались древесные опилки и мискантус, в качестве добавок – осадки сточных вод, нефтешламы и технический природный газ. Показано, что добавление 1/10 массовой доли нефтешламов к сырью позволяет увеличить соотношение объемных долей H_2/CO в синтез-газе с 1,05 до 1,2–1,4, а введение метана – вплоть до 5,9, т. е. позволяет улучшить характеристики синтез-газа.

Использование местных возобновляемых топливных ресурсов, особенно отходов, является важной задачей развития распределенного энергоснабжения. Одним из перспективных методов переработки отходов в электроэнергию или химические продукты является двухстадийная пиролитическая конверсия, сочетающая пиролиз и последующий высокотемпературный крекинг летучих веществ в неподвижном угольном слое. Такой способ обеспечивает высокую степень преобразования энергии сырья в синтез-газ, имеющий низшую теплоту сгорания 10–12 МДж/м^3 и состоящий как минимум на 90 об. % из водорода и оксида углерода в соотношении от 1:1 до 3:1 и более, в зависимости от типа сырья и параметров процесса [1]. Он также может быть использован для каталитического синтеза метанола, ДМЭ и биотоплива [2]. На эффективность конверсии синтез-газа в метанол существенно влияет соотношение объемных долей водорода и монооксида углерода, оптимальным значением для которого является 2.

На демонстрационной установке непрерывного действия была проведена серия экспериментальных исследований, включающих измерение компонентного состава синтез-газа и состава микропримесей. В качестве основного вида сырья использовалась биомасса растительного происхождения: древесные опилки и измельченный мискантус. С целью установления целесообразности и технологической возможности совместной переработки растительной биомассы и отходов нерастительного происхождения в опилки и мискантус в ограниченном количестве добавлялись осадки сточных вод высокой влажности и четыре вида нефтешламов. Кроме того, в зону крекинга вводился технический природный газ. Установлено, что добавление 1/10 массовой доли осадков сточных вод позволяет увеличить соотношение H_2/CO с 1,05 до 1,12–1,14; нефтешламов – до 1,2–1,4, а введение технического природного газа позволяет получить синтез-газ с содержанием водорода 76,5 % об. Таким образом, при совместной переработке растительного сырья и широкого круга органических отходов различной природы, доля которых в смеси должна быть ограничена, может быть получен синтез-газ с улучшенными характеристиками, в т. ч. более оптимальным соотношением H_2/CO.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание № 075-00269-25-00.

© Лавренов В. А., Фалеева Ю. М., 2025

Список источников

1. Лавренов В. А., Ларина О. М., Лищинер И. И., Малова О. В., Зайченко В. М. Энергетическая утилизация биомассы. Новые технологии // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 723–731.

2. Kachalov V. V., Lavrenov V. A., Lishchiner I. I., Malova O. V., Tarasov A. L., Zaitchenko V. M. Scientific research on processing of the biomass into basic component of aviation fuel // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012136.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ ГАЗИФИКАЦИИ В СВЯЗАННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ РЕАКТОРАХ И ХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ С ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ

Д. С. Литун*, Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев

АО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-институт»
115280, Российская Федерация, Москва, 3-й Автозаводский проезд, д. 4, корп. 1
** DSLitun@vti.ru*

Представлены результаты научных и технических разработок по оптимизации схемных решений производства водорода с использованием газификации в связанных между собой реакторах и химических циклов с оксидами металлов. С помощью разработанной методики расчета определены рабочие параметры различных вариантов технологической установки и показатели ее эффективности, а также эксплуатационные и капитальные затраты.

В [1] было показано, что использование технологии газификации биомассы и передовые системы получения водорода в связанных между собой реакторах с оксидами железа позволяет получать водород и поток CO_2, готовый к захоронению. Разработанная схема полигенерирующей установки получения водорода и электроэнергии [1] позволяет снизить энергетические затраты на отделение CO_2. Применение в ней аллотермической паровой газификации биомассы в системе связанных реакторов кипящего слоя вместо газогенератора с парокислородным дутьем позволяет практически исключить балластные компоненты в синтетическом газе. Отсутствие кислородного дутья, снижение риска агломерации слоя, благодаря относительно низкой температуре процесса газификации, отсутствие потерь из-за неполноты конверсии углерода при газификации, паровое дутье с утилизацией теплоты парообразования при конденсации под давлением дают преимущество предлагаемой технологической схеме перед аналогами.

В [1] рассматривалось поступление влажного газа в систему химических циклов при восстановлении оксидов до железа. Проведена серия расчетов с изменением условий химического реагирования и восстановлением оксидов до FeO вместо Fe. Это дает некоторые преимущества в части полезного тепла и электроэнергии, но снижает выход водорода. Альтернативными технологическими решениями являются предварительная осушка синтетического газа, а также применение системы газогенератора при атмосферном давлении с последующим увеличением давления синтетического газа перед подачей в химический цикл. Рабочие параметры установки для этих вариантов были рассчитаны по разработанной ранее методике [1]. В табл. 1 представлены расчетные показатели эффективности полигенерирующей системы.

Улучшить показатели эффективности схемы с атмосферным газификатором на осушенном газе можно путем установки газовой турбины в тракте отвода газов из воздушного реактора (рис. 1).

Выполнен расчет гидродинамических показателей реакторов с ЦКС с целью достижения заданных расходов циркулирующего материала, требуемых для поддержания температур в реакторах. Все требуемые расходы были достигнуты в рассмотренных вариантах, включая варианты с атмосферным газификатором. Определены габариты реакторов и представлены схемы их взаимного размещения.

© Литун Д. С., Рябов Г. А., Фоломеев О. М., 2025

Таблица 1

Показатели эффективности полигенерирующей системы

Показатель	Обработка синтез-газа перед топливным реактором		
	Горячий влажный газ	Охлажденный осушенный газ	Охлажденный осушенный газ, атмосферный газификатор
Эффективность по водороду, %	56,94	56,94	56,94
Электрическая мощность турбины, МВт	5,8	5,8	5,8
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	4,94	4,98	4,65
Электрическая мощность чистая, МВт	0,86	0,83	1,15
Эффективность электрическая, %	1,05	1,01	1,4
Эффективность общая, %	58,43	58,38	58,95

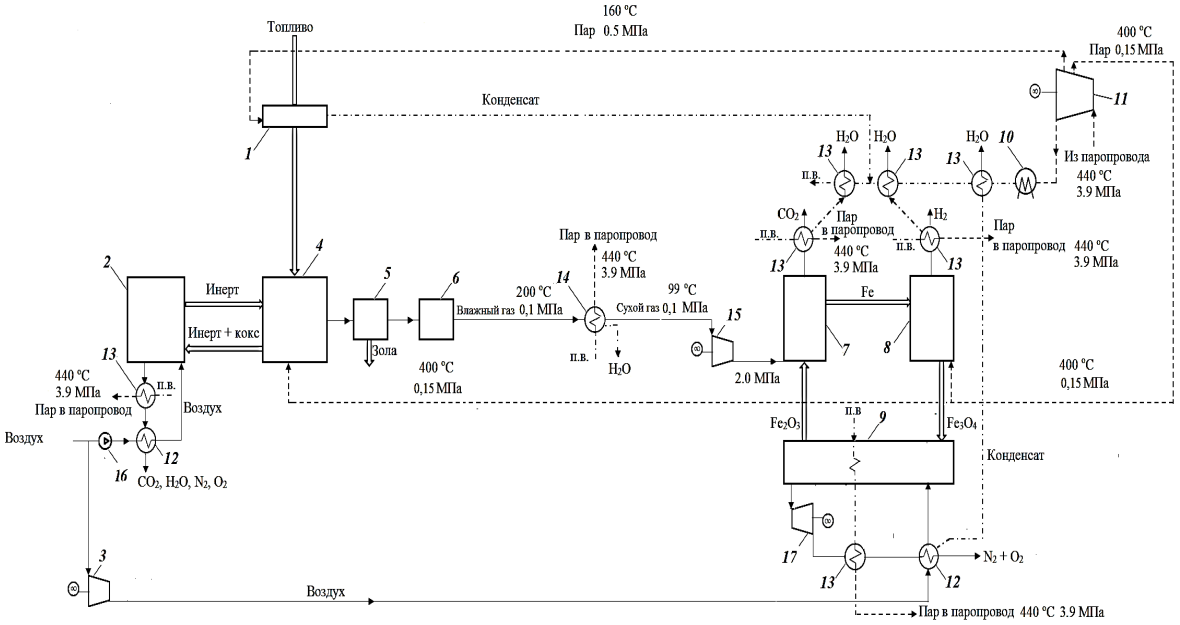


Рис. 1. Схема с атмосферным газификатором и газовой турбиной: *1* – сушилка; *2* – реактор ЦКС; *3* – компрессор; *4* – реактор КС; *5* – керамический фильтр; *6* –очистка серы; *7* – топливный реактор (FR); *8* – паровой реактор (SR); *9* – воздушный реактор (AR); *10* – конденсатор; *11* – паровая турбина; *12* – воздухоподогреватель; *13* – теплообменники-утилизаторы; *14* – охладитель синтез-газа; *15* – компрессор синтез-газа; *16* – воздуходувка; *17* – газовая турбина

Выполнена оценка капитальных и эксплуатационных затрат. Оценена стоимость водорода за жизненный цикл работы установки (в различных вариантах от 1,45 до 1,93 долл. США/кг) в условиях использования биомассы при отсутствии учитываемых выбросов CO_2. Около 2/3 расхода CO_2 уже готово к захоронению, поэтому остается удалить CO_2 только из потока дымовых газов от реактора с ЦКС газогенератора. Это значение находится на уровне известных зарубежных данных [2] по подобным установкам на природном газе (1,68 долл. США/кг) и ниже по сравнению с широко распространенной в мире технологией парового риформинга природного газа с улавливанием CO_2 (2,39 долл. США/кг).

Оптимальной является схема с атмосферной газификацией в системе связанных между собой реакторов с ЦКС последующей очисткой, охлаждением, нагревом и ком-

премированием синтетического газа перед подачей в систему химических циклов, с установкой газовой турбины за воздушным реактором этой системы.

Список источников

1. Литун Д. С., Рябов Г. А. Расчетное обоснование системы получения водорода из биомассы с использованием газификации в химических циклах // Теплоэнергетика. 2024. № 2. С. 90–106.

2. Khan M. N. Techno-economic assessment of a plant based on a three reactor chemical looping reforming system // International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41(48), pp. 22677–22688, December 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.016.

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПЕЛЛЕТ СИСТЕМ «ЛУБ – УГОЛЬ» И «ЛУБ – НСО»

М. В. Мурадова[1, 2*], А. А. Пономарева[1, 2]

[1] Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, п. Аякс, д. 10
[2] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49
**mensura18@mail.ru*

Древесное биотопливо – это экологически чистое топливо, внедрение которого в настоящее время является актуальным. В данной статье приводятся результаты калориметрических исследований биотопливных пеллет на основе луба с различным содержанием бурого угля и нефтесодержащих отходов (НСО). В ходе исследования было выявлено, что теплотворная способность разработанных пеллет сопоставима с теплотой сгорания древесных горючих веществ, используемых в качестве топлива, и бурых углей.

Лесные отходы часто применяются в качестве биологического сырья для производства энергии благодаря их широкому географическому распространению, меньшему количеству выбросов в окружающую среду и высокому потенциалу биомассы. Одним из наименее используемых видов отходов лесозаготовки является кора, ее объемы накопления ежегодно достигают 6 млн т. Кора состоит из двух слоев корки (внешнего слоя) и луба (внутреннего слоя), который обладает гидрофильными свойствами, его разложение в абсолютно сухом виде длится 5–7 лет. Его неправильная утилизация приводит к нарушению окружающей среды: большие накопления луба на определенной территории препятствует росту и развитию растений, что приводит к снижению биоразнообразия. Для утилизации луба используются следующие методы: переработка, компостирование и производство биотоплива. Внедрение древесного биотоплива является актуальной темой в современном мире, поскольку оно снижает зависимость от ископаемых видов топлива, таких как нефть и уголь, и сокращает выбросы парниковых газов в атмосферу [6]. Одним из перспективных направлений производства биотоплива в настоящее время является создание композитов в виде древесных гранул, называемых пеллетами. В целях повышения эффективности лубяных пеллет как топлива в данной работе также предлагается использование композитов на основе луба. В качестве добавочных материалов рассмотрены мелкая фракция бурого угля и нефтесодержащие отходы (НСО).

Таким образом, целью данной работы является исследование низшей теплоты сгорания разработанных композитов. Низшая теплота сгорания является основным параметром при выборе топлива, так как благодаря нему определяется необходимый расход топлива для достижения заданной энергетической отдачи.

Методы и материалы. В качестве основного сырья в данном исследовании были использованы луб березы повислой *(Betula pendula),* бурый уголь (Павловское месторождение) и нефтесодержащие отходы (Холмистое месторождение). При подготовке твердых компонентов (луб и уголь) к пеллетированию были проведены следующие этапы: дегидрирование, измельчение, смешение состава и пеллетизация. Сушка происходила в эксикаторе 24 ч при комнатной температуре для удаления лишней влаги из компонентов. Далее образцы были измельчены механически ротационным измельчителем и с помощью металлотканного сита отбирались фракции для луба 0,25 мм, а для угля от 0,1–0,2 мм. Соотношение компонентов в исследуемых пеллетах приведе-

© Мурадова М. В., Пономарева А. А., 2025

ны в табл. 1, сухие компоненты в необходимых пропорциях перемешивались вручную до однородности состава и при помощи ручного гибридного пресса подвергались гранулированию при постоянном давлении p = 70 бар.

Для разработки пеллет из луба и нефтесодержащих отходов луб проходил те же этапы подготовки, но пеллетизировался в чистом виде. Из отходов нефтедобычи отбиралась легкая фракция и измерялись вязкость и плотность остатков. Далее на полученные лубяные пеллеты гравиметрически покапельно наносились НСО (табл. 1).

Таблица 1

Разработанные составы пеллет

Компоненты пеллет	Соотношение компонентов									
Луб : Уголь	1 : 0	9 : 1	7 : 1	3 : 1	3 : 2	1 : 1	2 : 3	1 : 3	1 : 5	1 : 7
Луб : НСО	1 : 0	1 : 2	1 : 1	3 : 1	4 : 1	-	-	-	-	-

При определении низшей теплоты сгорания разработанных пеллет использовали калориметр IKA C6000 (Германия), оснащенный базовым термостатом IKA RC2 (Германия). Температура воды в калориметре перед началом эксперимента поддерживалась постоянной с помощью термостата.

Обсуждение результатов. Чтобы оценить теплотворную способность исследуемых композитов, были проведены эксперименты по определению низшей теплоты сгорания образцов березового луба и его композитов, содержащих бурый уголь и НСО (рис. 1).

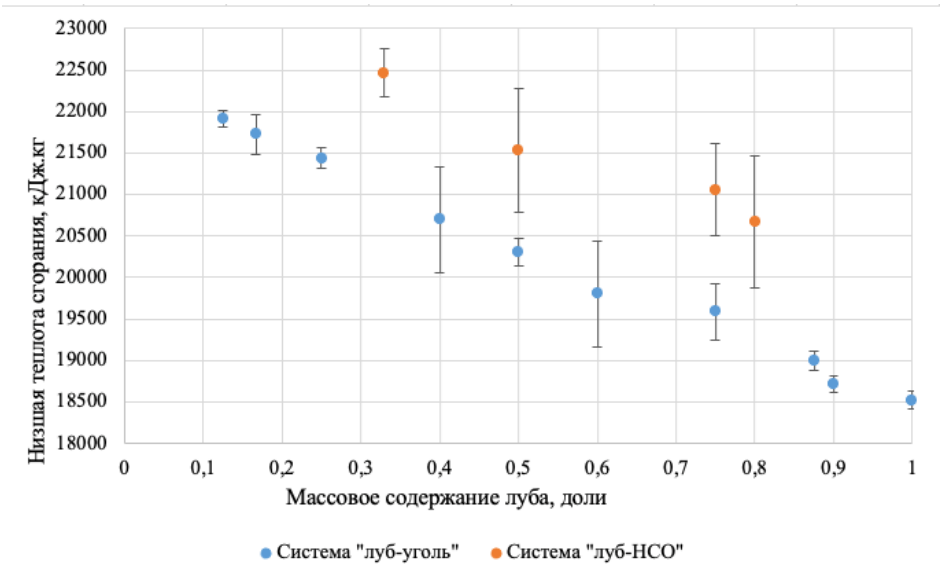


Рис. 1. Зависимость низшей теплоты сгорания композитов от содержания луба

Разработанные пеллеты обладают большей энергетической ценностью по сравнению с древесиной. Например, теплота сгорания хвойных дров составляет 13,7 МДж/кг, березовых дров – 14,1 МДж/кг, дубовых – 16,4 МДж/кг [2].

Бурые угли имеют широкий диапазон калорийности: угли Канско-Ачинского угольного бассейна обладают низшей теплотой сгорания, достигающей 15,5 МДж/кг, а Кузнецкого угольного бассейна – до 22,8 МДж/кг [3]. Из рис. 1 видно, что теплотворная способность пеллет, исследуемых в данной работе, находятся в диапазоне калорийности бурого угля. Таким образом, использование топливных композитов на основе бе-

резового луба с добавлением бурого угля или нефтесодержащих отходов перспективно для сжигания на промышленных объектах энергетики без затрат на модернизацию и переоснащение топочного оборудования.

Исследование поддержано FZNS-2025-0009.

Список источников

1. Laschi A., Marchi E., and S. Gonzales-Garcia, Energy. 2016. N 103. P. 469.
2. Серков Б. Б., Сивенков А. Б. и др. Характеристики тепловыделения при горении древесины различных пород и видов // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Вып. 20, № 7. С. 2–7.
3. Миронов К. В. Справочник геолога-угольщика. М. : Недра, 1991. 362 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АЦЕТАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. И. Мошков[1*], А. И. Кецко[1], А. Э. Василевская[1], А. А. Пономарева[1, 2]**

[1] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А
[2] Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10
** moshkov.ai@yandex.ru, **aaponomareva@itmo.ru*

Мембраны Nafion, применяемые в топливных элементах, ограничивают их коммерциализацию из-за высокой стоимости и ряда физико-химических недостатков. Разработка биополимерных материалов, таких как ацетат целлюлозы, представляет интерес благодаря доступности, низкой стоимости и высокой механической прочности. Данное исследование фокусируется на влиянии концентрации и скорости подачи раствора ацетата целлюлозы на формирование частиц различной морфологии, анализируя образцы с использованием сканирующей электронной микроскопии. Реологический анализ помогает понять процесс формования. Оцениваются физико-химические характеристики пленок, включая влагосодержание и устойчивость к окислению, и влияние соотношений различных растворителей на стабильность пленок.

В условиях глобального энергетического кризиса возникает необходимость в альтернативных источниках энергии, включая топливные элементы (ТЭ). ТЭ преобразуют химическую энергию в электрическую, используя водород и воздух. В последние годы наблюдается переход от традиционных ТЭ с жидким электролитом к системам на основе протонообменных мембран или полимерных электролитических мембран (ПЭМ) [1]. Эти мембраны критически важны для низкотемпературных ТЭ, так как они обеспечивают разделение процессов на аноде и катоде, а также транспорт протонов. Однако существующие коммерческие мембраны, такие как Nafion© [2; 3], имеют недостатки, включая нестабильность при низкой влажности и деградацию при высоких температурах. Это подчеркивает необходимость разработки новых материалов [4; 5], таких как ацетат целлюлозы, который обладает хорошими механическими свойствами и низкой стоимостью, но требует улучшения своей химической и термической стабильности.

Раствор ацетата целлюлозы исследован с использованием ротационного реометра Physica MCR 502, Anton Paar (Австрия) с системой «цилиндр в стакане» CC27 для измерения напряжения сдвига. Диапазон скоростей сдвига составлял от 0,1 до 1000 $с^{-1}$ при константной температуре раствора 25,0 ± 0,2 °C, которая поддерживалась с использованием термостатического модуля C-PTD200 с элементом Пельтье. Процесс электроформования раствора ацетата целлюлозы осуществлялся с помощью установки электрогидродинамического распыления NANON-01A, Mecc (Япония), с распылением раствора через иглу на алюминиевый коллектор при комнатной температуре и различными скоростями подачи раствора. В рамках исследования была проведена оценка влагосодержания и набухания пленок из ацетата целлюлозы. Изучение деградации материала проводили с применением теста Фентона, при котором порошковый сульфат железа использовался вместе с перекисью водорода для генерации гидроксильных радикалов, что позволило оценить влияние окислительных процессов на характеристики мембран.

© Мошков А. И., Кецко А. И., Василевская А. Э., Пономарева А. А., 2025

Морфология поверхности полученных микрочастиц исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega-3, Tescan (Чехия). Для формования мембран в качестве реагентов использовались ацетат целлюлозы, диметилформамид (ДМФА), ацетон и сульфит натрия.

Исследование влагосодержания и степени набухания пленок, изготовленных методом литья из ацетата целлюлозы, продемонстрировало, что как концентрация ацетата целлюлозы, так и соотношение растворителей существенно влияют на их физико-химические свойства. Пленки с более высокой концентрацией имеют максимальное влагосодержание, что связано с формированием плотной структуры, затрудняющей испарение растворителя и способствующей удержанию влаги благодаря образованию межмолекулярных взаимодействий. Кроме того, изменение температуры сушки и концентрации позволяет регулировать степень набухания в различных средах, с рекомендациями по оптимизации условий для достижения желаемых свойств пленок. Тест Фентона выявил процессы деструкции пленок при температуре 20 °C в течение одного часа, что подчеркивает необходимость модификации ацетата целлюлозы для повышения устойчивости к растворению.

В результате электроформования были получены сферические микрочастицы ацетата целлюлозы, при этом с увеличением концентрации наблюдался переход частиц в волокноподобные объекты. Этот переход от распыления к прядению раствора может быть связан с превышением критического значения количества макромолекул в растворе, что приводит к формированию волоконного структурного состояния и переформированию микрочастиц. Анализ морфологии показал, что соотношение растворителей и скорость подачи раствора также влияют на размеры образуемых волокон. С увеличением концентрации ацетата целлюлозы наблюдается улучшение однородности размеров волокон, что может быть связано с увеличением вязкости раствора. Эти результаты открывают перспективы для применения ацетата целлюлозы в области протонообменных мембран, обеспечивая стабильные характеристики и повышенную эффективность в низкотемпературных топливных элементах, однако для достижения оптимальных свойств и повышения устойчивости материала потребуется его модификация.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2025-0009.

Список источников

1. Basak M., Mitra S., Pattader P. S. G. Proton exchange membrane and bio-Fenton micro fuel cells for energy harvesting, gas leakage detection, and dye degradation // RSC advances. 2021. Т. 11. № 21. С. 12720–12728.

2. Zhu L. Y. et al. Recent developments in high-performance Nafion membranes for hydrogen fuel cells applications /Petroleum Science. 2022. Т. 19. № 3. С. 1371–1381.

3. Karimi M. B., Mohammadi F., Hooshyari K. Recent approaches to improve Nafion performance for fuel cell applications: A review // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Т. 44. № 54. С. 28919–28938.

4. Musa M. T. et al. Recent biopolymers used for membrane fuel cells: Characterization analysis perspectives // International Journal of Energy Research. 2022. Т. 46. № 12. С. 16178–16207.

5. Eldin M. S. M. et al. Novel aminated cellulose acetate membranes for direct methanol fuel cells (DMFCs) // International Journal of Electrochemical Science. 2017. Т. 12. № 5. С. 4301–4318.

Секция 9
Гидродинамика и тепломассообмен в задачах атомной промышленности

ТЕПЛООБМЕН В ОБЛАСТИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА И ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ В СЕМИСТЕРЖНЕВОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ

К. С. Лебеда[1*], М. С. Макаров[1], В. С. Наумкин[1, 2], О. В. Витовский[1]

[1] Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2] Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** kslebeda@mail.ru*

В данной работе с применением численных методов исследуется теплообмен при течении газовых смесей в обогреваемой семистержневой сборке цилиндрических тепловыделяющих элементов с дистанционирующими решетками. Решетки изготовлены таким образом, чтобы гидравлические диаметры всех их каналов были равны между собой. В качестве теплоносителя рассматриваются гелий-ксеноновая смесь с числом Прандтля 0,23 и воздух с числом Прандтля 0,71. Получены данные о распределении температуры стенки центрального тепловыделяющего элемента и проведен анализ влияния дистанционирующих решеток на локальные изменения теплоотдачи и распределение температуры.

Высокотемпературные газовые реакторы рассматриваются в качестве энергетических установок в транспортных системах и генерирующей энергетике [1]. Теплоносителем в таких реакторах выступают инертные газы и их смеси. Особое внимание исследователей и разработчиков привлекает смесь гелия с ксеноном. В настоящее время активно исследуются тепловые процессы в проточной части реакторов с газовым охлаждением [2]. Из-за сложной геометрии каналов охлаждения численное моделирование является неотъемлемой частью таких исследований.

Исследуемая геометрия представляет собой семистержневую сборку цилиндрических тепловыделяющих элементов, представленных в виде трубок. Для точного позиционирования стержней применяются дистанционирующие решетки с вытесняющими элементами. Гидравлический диаметр каналов, образованных плотной упаковкой стержней, и гидравлический диаметр каналов дистанционирующих решеток определяется как $d_г = 4S/p$ и равен 5,2 и 3 мм соответственно. Элементы решеток в местах контакта с тепловыделяющим элементом образуют уступы с относительной высотой $h/d_г = 0{,}22$.

Численное моделирование проводилось с использованием пакета ANSYS Fluent 2020 R2. В ходе моделирования решались усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS), турбулентность моделировалась с использованием Transition SST модели.

Визуализация линий тока в окрестности дистанционирующей решетки представлена на рис. 1, *а*. На передней грани решетки формируются вихри, вызванные внезапным сжатием потока, а за решеткой из-за внезапного расширения образуется сложный трехмерный вихрь, что влияет на теплообмен в этой области.

На рис. 2 представлено распределение числа Нуссельта по длине центрального тепловыделяющего элемента. Синим цветом обозначены данные для воздуха, красным для гелий-ксеноновой смеси. Прерывистой линией отмечено значение среднего числа Нуссельта по длине тепловыделяющего элемента, рассчитанное от начала первой ди-

© Лебеда К. С., Макаров М. С., Наумкин В. С., Витовский О. В., 2025

станционирующей решетки. Наблюдается периодическое повышение и понижение значения числа Нуссельта в пространстве между решетками.

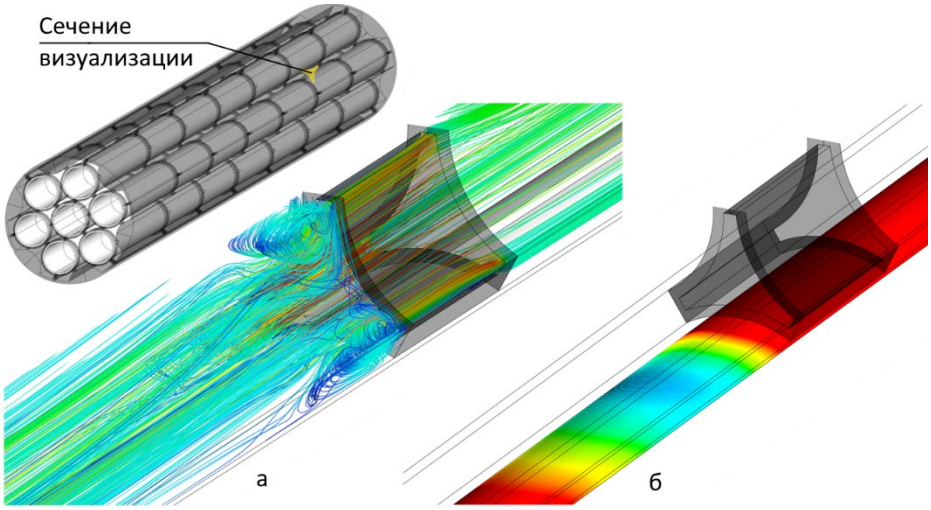


Рис. 1. Визуализация отрывной зоны (*а*) и поле температуры стенки (*б*) за предпоследней дистанционирующей решеткой

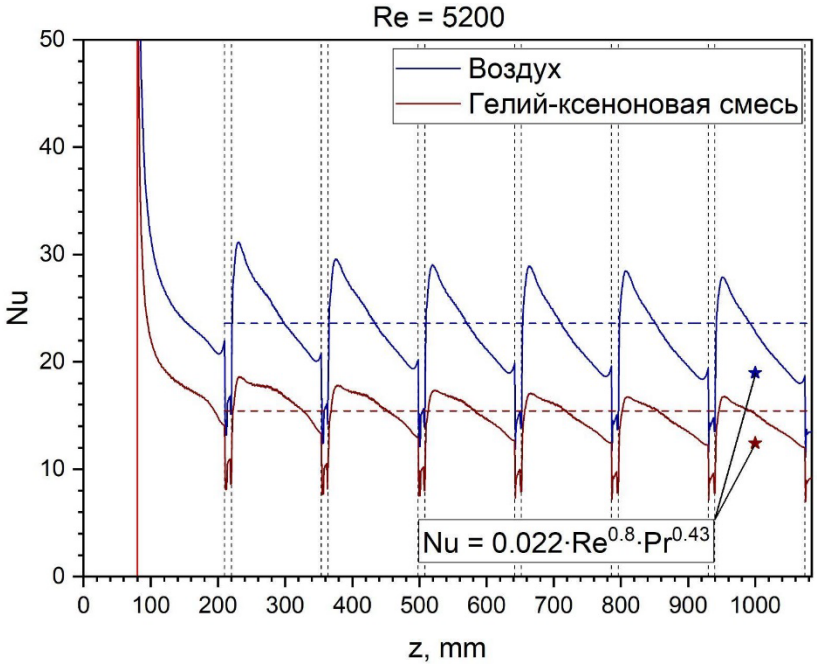


Рис. 2. Распределение локального (сплошная линия) и среднего (прерывистая линия) числа Нуссельта по длине центрального тепловыделяющего элемента при течении воздуха и гелий-ксеноновой смеси, число Рейнольдса 5200

При использовании воздуха в качестве теплоносителя влияние дистанционирующих решеток на изменение числа Нуссельта в их окрестности проявляется сильнее, чем при использовании гелий-ксеноновой смеси. Звездочками на графике (рис. 2) отмечены числа Нуссельта, полученные по критериальной зависимости Михеева.

Список источников

1. Meng T., Cheng K., Zhao F., Xia C., Tan S. Computational flow and heat transfer design and analysis for 1/12 gas-cooled space nuclear reactor, Annals of Nuclear Energy. 135 (2020) 106986.

2. Kewei Ning, Sichao Tan, Shuang Wang, Zhongchun Li, Ruibo Lu, Haoran Shen, Fulong Zhao Numerical investigation of flow stratification and heat transfer characteristics in a strongly heated horizontal rod bundles with helium-xenon gas mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer 221 (2024) 125146.

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ

Р. С. Лукин[1*], А. А. Пьянзин[2]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]АО «ЦПТИ»
660098, Российская Федерация, Красноярск, ул. Алексеева, д. 6г
** rlukin@sfu-kras.ru*

Представлен анализ современных способов воздушного охлаждения сосудов, а также задач, решаемых с целью интенсификации охлаждения оборудования. Выполнен обзор рекомендаций по разработке качественных расчетных моделей, обеспечивающих требуемые параметры точности численного решения. Представлены результаты численного моделирования охлаждения аппарата с постоянным тепловыделением.

Одной из проблем промышленности является обеспечение эффективного управления температурой и увеличения теплосъема с помощью охлаждения воздухом элементов технологического оборудования. Хотя воздушное охлаждение является широко распространенным решением по управлению температурой благодаря таким преимуществам, как низкая стоимость, простота и надежность, оно ограничено своей низкой охлаждающей способностью. При этом встречаются задачи, в рамках которых воздушное охлаждение является приоритетным ввиду особенностей реализуемых технологических процессов. Решение задачи по интенсификации теплообмена может решаться за счет: выполнения модификации поверхности теплосъема с помощью макро и микро выступов, повышающих поверхность теплосъема [1; 2]; иных методов турбулизации потока [3]; подбора расходных характеристик и мощности охлаждающей системы.

В рамках эскизного проектирования и конструкторской проработки изделия решаются следующие основные задачи: проектный расчет; разработка расчетных моделей; оптимизация принятых решений на основании результатов моделирования. При этом учет особенностей (геометрических и материаловедческих) является основной сложностью при проведении исследований в рамках указанных этапов проекта.

Реализация макронеровностей в виде наклонных впадин или преград на поверхности теплообмена приводит к образования турбулентных течений [3]. Однако практическая реализация канавок и выступов приводит к значительному увеличению объема и временных затрат на механическую обработку, повышению количества сварных соединений. Поэтому при разработки единичного оборудования стремятся сохранить технологичность изделия, что затрудняет применение указанных способов интенсификации теплосъема.

В рамках данного исследования анализируется процесс численного моделирования теплообмена с использованием метода вычислительной гидрогазодинамики, позволяющего эффективно решать вторую и третью задачи, обозначенные выше. В качестве расчетной модели рассмотрен охладитель типа «стакан», закручивающий воздух по форме спирали при охлаждении изделия. Задачей расчетной модели является учет постепенного нагрева охлаждающего воздуха при его движении по охлаждающей полости. Подвод холодного воздуха осуществляется через нижний патрубок. Охлаждаемое тело нагревается постоянной мощностью. Учитываются рекомендации [4] по подбору размера конечно-элементной сетки обеспечивающие малые значения невязок решения, сеточную сходимость и сокращение времени расчета.

© Лукин Р. С., Пьянзин А. А., 2025

Приведенные в [4] результаты исследований показывают влияние типа покрытия и скоростей течения на коэффициент теплоотдачи, один из основных параметров количественной оценки эффективности охлаждения. По результатам численных экспериментов [4] по анализу толщины конечных элементов в первом слое получена слабая зависимость интегральных показателей от значения толщины первого элемента. Однако при этом авторами выявлена необходимость обеспечивать достаточное количество призматически слоев. Авторами выбрано граничное значение 10. Данные рекомендации учтены в рамках модельных расчетов.

В результате расчета получены поля полных и статических давлений, температур; вектора скоростей. Произведена оценка значения безразмерного значения Y+, которая по большей части охлаждаемой поверхности не превышает значение в 2 единицы, что соответствует рекомендациям для выбранной модели турбулентности. Получено, что выполнение оребрения эффективно интенсифицирует теплосъем, пропорционально росту охлаждаемой площади. При этом падение полного давления не превышает 5 % при скоростях потока воздуха ниже 20 м/с. Графики относительного прироста данных показателей представлены на рис. 1.

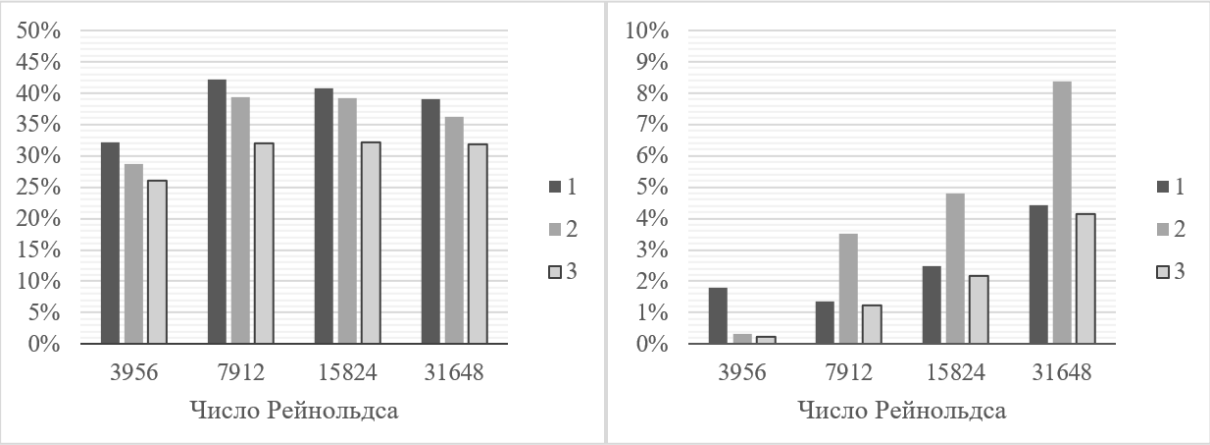


Рис. 1. Зависимость от числа Рейнольдса и типа пассивного охлаждения: слева – роста теплоотдачи; справа – роста потери давления. Типы пассивного охлаждения: *1* – радиальные вставки; *2* – ребра вдоль оси; *3* – ребра в окружном направлении

В рамках подготовки материалов доклада выявлены параметры модели, обеспечивающие требуемую сходимость и производительность расчета. По результатам обзора отмечены практических способы интенсификации теплообмена, некоторые из этих способов требуют значительного усложнения геометрии модели и увеличения объема механической обработки готового изделия. Дальнейшими направлениями расширения функционала данной расчетной модели будет реализация возможности фазовых переходов или параметризация тепловых нагрузок, учет зависимостей свойств теплоносителя от температуры, учет мощностных характеристик охлаждающей системы. Учет данных факторов повысит практическую значимость разработанной модели за счет приближения к реальным условиям тепловой нагрузки оборудования.

Список источников

1. Шаповалов А. В., Кидун Н. М., Никулина Т. Н. Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2021. № 4 (87). С. 67–76.

2. Терехов В. И., Терехов В. В. Пассивное управление теплообменом при свободной конвекции // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 года. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. С. 11–13. EDN FRTSOR

3. Исаев С. А. Управление структурами и эффективные поверхности теплообмена // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 года. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. С. 171–173. EDN QJUUDJ

4. Волков А. А., Попов Г. М., Зубанов В. М., Матвеев В. Н., Батурин О. В. Поиск рекомендаций по выбору настроек численной модели для эффективного моделирования рабочего процесса лопатки осевой турбины с конвективным охлаждением // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 11 (143). С. 1–14.

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД ТЕЧЕНИЯ РТУТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ОБОГРЕВОМ

Д. А. Бердюгин[1*], Я. И. Листратов [1, 2], И. А. Беляев[2]

[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14/1
[2]Объединенный институт высоких температур РАН
124412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/1
** berdyugindaniel@gmail.com*

Прямое численное моделирование позволяет провести детальный анализ смешанной конвекции жидкого металла в горизонтальной трубе под воздействием поперечного магнитного поля. В рассматриваемой задаче магнитное поле направлено поперек течения, стенки трубы электрически изолированы, а ее нижняя часть обогревается постоянным тепловым потоком. Длина области влияния магнитного поля полностью вмещает в себя участок нагрева. Результаты показывают, что рост безразмерного числа Гартмана (Ha) и превышение порога подавления изотермической турбулентности приводит к развитию смешанной конвекции, при этом течение представляет собой перемещение квазидвумерных валов, которые движутся с основным потоком жидкости поперек магнитного поля. Перемещение валов вниз по течению вызывает аномальные высокоамплитудные колебания температуры. Пик колебаний перемещается по длине трубы в зависимости от безразмерного числа Грасгофа (Gr) при значениях безразмерного числа Рейнольдса (Re) 7000 и 10 000.

Развитие термоядерной энергетики на сегодняшний день включает в себя изучение особенностей поведения таких потенциально используемых теплоносителей, как жидкие металлы [1]. Сильные магнитные поля совместно с большими тепловыми нагрузками, появление которых предполагается в термоядерных реакторах, изменяют характер гидродинамических и теплообменных процессов внутри течения жидкого металла. Одно из интересных явлений, которое может оказать негативное влияние на работоспособность проектируемых установок, – возникновение высоких по амплитуде низкочастотных температурных пульсаций. Их появление обусловлено совместным воздействием сил плавучести и поперечного магнитного поля. Изучение подобных эффектов необходимо для разработки и проектирования бланкетов и диверторов термоядерных реакторов [2].

В 2011 г. [3] экспериментально были обнаружены аномально высокие квазипериодические пульсации температуры ртути при смешанной турбулентной конвекции и воздействии поперечного магнитного поля в горизонтальной трубе, подогреваемой снизу. Эксперименты проводились в следующей конфигурации режимных параметров: $Re = 10^4$, $Gr = 3{,}5 \cdot 10^7$, $Ha = 0–300$. В отсутствие влияния магнитного поля температурные пульсации внутри потока ртути аналогичны развитому турбулентному течению с учетом особенностей влияния смешанной конвекции. Повышение индукции магнитного поля до значения $Ha = 100$ приводит к ламинаризации потока и почти полному подавлению пульсаций. Дальнейшее увеличении до $Ha = 300$ изменяет структуру потока таким образом, что амплитуда пульсаций резко увеличивается до высоких значений, генерируемая на уединенной частоте. В работе [4] приведено подробное исследование при режимных параметрах $Re = 10^4$, $Gr = 4{,}4 \cdot 10^7$, $Ha = 0–300$, где также были обнаружены аномальные пульсации внутри ртути при смешанной конвекции в поперечном магнитном поле.

© Бердюгин Д. А., Листратов Я. И., Беляев И. А., 2025

Моделирование подобной задачи при помощи метода DNS (Direct numerical solution) проводилось в нескольких работах [5], где дается более обширное понимание того, каким образом возникают пульсации температуры по мере перестроения структуры течения. В настоящей работе проводится прямое численное моделирование смешанной конвекции ртути в горизонтальной трубе с неоднородным обогревом в поперечном магнитном поле. Отличие данного исследования заключается в увеличенной по длине области влияния магнитного поля, что меняет задачу и приводит к дополнительным эффектам, ранее необнаруженных в [4]. На рис. 1 показана конфигурация рассматриваемой задачи.

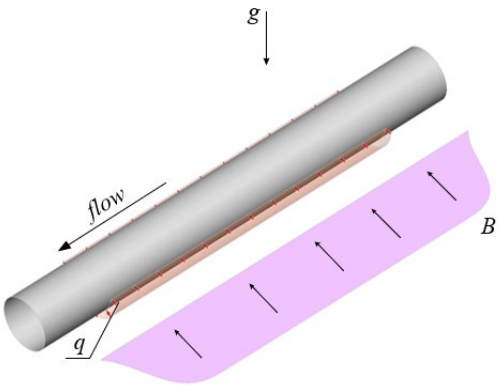


Рис. 1. Конфигурация рассматриваемой задачи

Результаты были сопоставлены с результатами последних экспериментов, выполненных в расширенном диапазоне режимных параметров [6], откуда и была взята конфигурация для расчетной модели. Режимные параметры были выбраны следующие: Re = 7000–15000, Gr = 3–9 · 10^7, Ha = 0–1000. На рис. 2 изображена осциллограмма и спектр пульсаций температуры в сечении трубы, равном 37d, в точке детектирования максимума интенсивности пульсаций в режиме Re = 10 000, Gr = 8,67 · 10^7, Ha = 700. Также были обработаны и нанесены данные из эксперимента [6]. Результаты расчета с удовлетворительной точностью совпадают с экспериментальными данными.

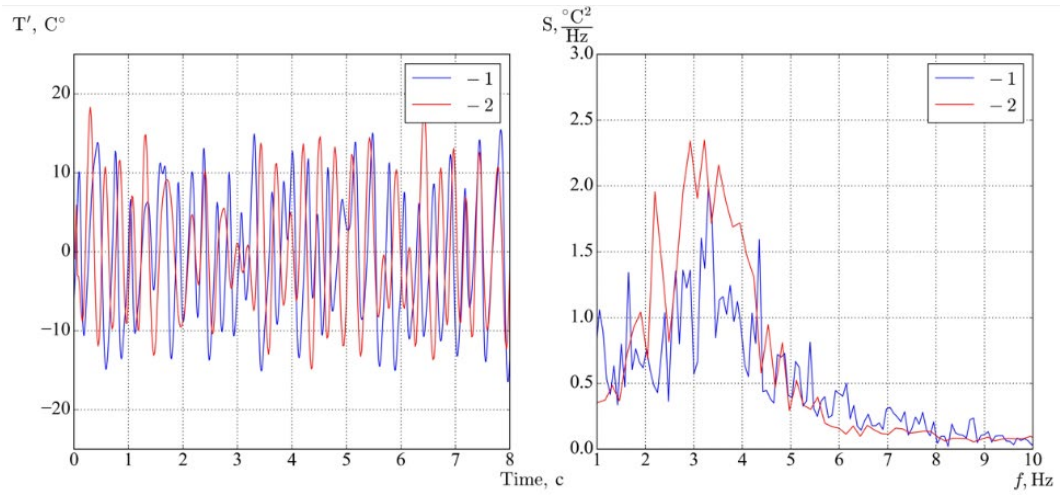


Рис. 2. Осциллограмма и спектр пульсаций температуры в сечении трубы, равном 37d, в точке детектирования максимума в режиме Re = 10 000, Gr = 8,67 · 10^7, Ha = 700: *1* – эксперимент; *2* – DNS

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2023-0017 (соглашение № 075-03-2023-383 от 18.01.2023) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

Список источников

1. Smolentsev S. Physical background, computations and practical issues of the magnetohydrodynamic pressure drop in a fusion liquid metal blanket // Fluids. 2021. V. 6. N 3. P. 110.

2. Lorenzetto P. et al. EU contribution to the procurement of blanket first wall and divertor components for ITER // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 136. P. 975–982.

3. Genin L. G. et al. Temperature fluctuations in a heated horizontal tube affected by transverse magnetic field // Proc. 8th PAMIR Conf. Fund. Appl. MHD, Borgo, Corsica, France. 2011. V. 37.

4. Беляев И. А. и др. Пульсации температуры в МГД-потоке жидкого металла в горизонтальной неоднородно обогреваемой трубе // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 5. С. 773–781.

5. Zikanov O. et al. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // Applied Mechanics Reviews. 2021. Vol. 73, N 1. P. 010801.

6. Рознин И. М. Пульсации температуры в МГД потоке жидкого металла в горизонтальных неоднородно обогреваемых каналах // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2020. С. 815–815.

ПОДХОДЫ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МНОГОФАЗНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКАХ В ТРЕХМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ВО ВРЕМЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

В. И. Чухно*, Э. В. Усов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирский филиал
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** chukhno@ibrae.ac.ru*

В работе представлена трехмерная многокомпонентная модель для численного исследования процессов, протекающих в реакторных установках с жидкометаллическим теплоносителем. Модель позволяет рассчитывать широкий спектр явлений, которые могут возникать в реакторных установках с жидкометаллическим охлаждением во время тяжелой аварии с разрушением активной зоны. Одной из ключевых возможностей модели является ее способность моделировать фазовые переходы как жидкометаллического теплоносителя, так и топлива и конструкционных материалов.

На данный момент ядерная энергетика играет значительную роль в обеспечении спроса на энергию и решении экологических проблем. Обоснование безопасности реакторных установок является критически важным этапом их разработки. Проведение физических экспериментов на действующих реакторных установках (РУ) зачастую невозможно по причинам безопасности, финансовым и временным затратам. Поэтому математическое моделирование является основным инструментом для анализа аварийных ситуаций. В большинстве случаев основные процессы в РУ моделируются в одномерном приближении. Одномерные модели позволяют проанализировать общие закономерности в РУ на этапе аварии, при этом значительно сокращая вычислительные затраты. Основными недостатками одномерных моделей являются их относительно невысокая точность и большое число используемых эмпирических корреляций. В тех случаях, когда неучет пространственных эффектов приводит к большим погрешностям, общей тенденцией становится развитие и использование трехмерных моделей.

В работе будет представлена трехмерная многокомпонентная модель для расчета процессов, наблюдаемых на этапе тяжелой аварии, в реакторных установках с жидкометаллическим теплоносителем. Стоит отметить возможность моделировать кипение/конденсацию жидкометаллического теплоносителя и более поздние этапы аварии с переносом расплава топлива, структурных компонентов, также их дальнейшее затвердевание.

Для расчета процессов в многофазном многокомпонентном потоке предлагается использовать трехмерную многожидкостную модель [1].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_k\rho_k) + div(\varphi_k\rho_k u_k) = R_k^+ - R_k^-;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_k\rho_k h_k) + div(\varphi_k\rho_k h_k u_k) - \varphi_k\frac{dp}{dt} = Q_{k,ext} + (R_k^+ - R_k^-)h_k + \sum_i Q_{ik};$$

$$\varphi_k\rho_k\left(\frac{\partial u_{zk}}{\partial t} + u_{zk}\frac{\partial u_{zk}}{\partial z} + u_{rk}\frac{\partial u_{zk}}{\partial r} + \frac{u_{\theta k}}{r}\frac{\partial u_{zk}}{\partial \theta}\right) + \varphi_k\frac{\partial p}{\partial z} = -\varphi_k\rho_k g + \sum_i \tau_{ik}^z + \sum_i \tau_{wk}^z;$$

© Чухно В. И., Усов Э. В., 2025

$$\varphi_k \rho_k \left(\frac{\partial u_{rk}}{\partial t} + u_{zk} \frac{\partial u_{rk}}{\partial z} + u_{rk} \frac{\partial u_{rk}}{\partial r} + \frac{u_{\theta k}}{r} \frac{\partial u_{rk}}{\partial \theta} \right) + \varphi_k \frac{\partial p}{\partial r} = \sum_i \tau_{ik}^r + \sum_i \tau_{wk}^r;$$

$$\varphi_k \rho_k \left(\frac{\partial u_{\theta k}}{\partial t} + u_{zk} \frac{\partial u_{\theta k}}{\partial z} + u_{rk} \frac{\partial u_{\theta k}}{\partial r} + \frac{u_{\theta k}}{r} \frac{\partial u_{\theta k}}{\partial \theta} \right) + \frac{\varphi_k}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \sum_i \tau_{ik}^\theta + \sum_i \tau_{wk}^\theta;$$

$$\sum_k \varphi_k = 1.$$

Верификация и валидация предложенных подходов демонстрируется на базе аналитических тестов и известных экспериментальных данных.

Исследование выполнено в рамках государственного контракта № Н.4о.241.19.24.1035 на выполнение НИР «Развитие интегрированной системы кодов нового поколения для разработки, обоснования безопасности, оптимизации и проведения виртуальных испытаний технологий и установок ПЭК. Этап 2024–2026 годов».

Список источников

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М. : Наука, 1987.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОНВЕРСИИ ОБЕДНЕННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА ПРИ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И КИСЛОРОДОМ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Д. С. Пашкевич[1, 2], Т. А. Федорова [1*], А. Р. Зимин[1], Д. А. Баженов[3,4], П. С. Камбур[1, 2, 5], Ю. И. Алексеев[2], В. Б. Петров[2, 5], Д. А. Мухортов [2], В. В. Капустин[1, 2, 5], П. А. Смолкин[3], П. А. Попов[6]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
[2] ООО «Новые химические продукты»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 11а
[3] АО «Сибирский химический комбинат»
636039, Российская Федерация, Северск, ул. Курчатова, д. 1
[4] ООО «Центротех-Инжиниринг»
198097, Российская Федерация, Санкт-Петербург, пр. Стачек, д.47л
[5] АО «РНЦ "Прикладная химия"»
193232, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул Крыленко, д. 26а
[6] Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе
194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
** fyodorova_ta@mail.ru*

Предложен способ переработки обедненного гексафторида урана при его взаимодействии с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения с получением коммерчески значимых продуктов – фторида водорода и оксидов урана. Расчетами показано, в термодинамически равновесной смеси при температуре выше 1150 К основным ураносодержащим продуктом является диоксид урана, а основным фторсодержащим – фторид водорода. Экспериментами на пилотной установке с реактором типа «туннельная горелка» диаметром 142 мм установлено, что фронт пламени в исследуемой системе надежно формируется и стабильно горит, а основными продуктами пламенного процесса являются UO2, U3O8 и HF. Разработана и верифицирована на основе экспериментальных данных математическая модель процесса, позволяющая по принципу подобия полей параметров масштабировать промышленный реактор для реконверсии обедненного гексафторида урана.

При изотопном обогащении природного урана в качестве побочного продукта образуется гексафторид урана, обедненный по U-235 (ОГФУ), который направляют на длительное хранение в стальных контейнерах на открытых площадках. В России накоплено порядка 1 млн т ОГФУ, и ежегодно эта цифра увеличивается примерно на 50 тыс. т. ОГФУ является веществом первого класса опасности, в его составе присутствуют: ядерно-чистый уран, который может быть использован при производстве МОКС-топлива, и фтор, необходимый при производстве гексафторида природного урана. Поэтому целесообразно разработать конкурентоспособную технологию переработки UF_6, при внедрении которой будет возможно не только уменьшить количество накопленного ОГФУ, но и получить HF, что позволит замкнуть ядерный топливный цикл по фтору.

Взаимодействие ОГФУ с водородсодержащими веществами и кислородом в режиме горения является одним из разрабатываемых методов его реконверсии [1]:

$$UF_{6_{\text{газ}}} + x_1 C_m H_n O_k N_{l_{\text{газ}}} + x_2 O_{2_{\text{газ}}} \rightarrow UO_{w_{\text{тв}}} + 6HF_{\text{газ}} + y_1 CO_{z_{\text{газ}}} + y_2 N_{2_{\text{газ}}} - Q, \quad (1)$$

© Пашкевич Д. С., Федорова Т. А., Зимин А. Р., Баженов Д. А., Камбур П. С., Алексеев Ю. И., Петров В. Б., Мухортов Д. А., Капустин В. В., Смолкин П. А., Попов П. А., 2025

где $C_mH_nO_kN_l$ – летучее водородсодержащее вещество; $n > 0, m \geq 0, k \geq 0, l \geq 0, nx_1 \geq 6, x_2 > 2, z = 1{,}2$.

В данном методе в качестве водородсодержащих веществ предлагается использовать водород или метан, наиболее коммерчески доступные носители водорода. Расчетами термодинамически равновесных составов для систем элементов U-H-O-F и U-H-F-O-C показано, что при температуре выше 1150 К основным фторсодержащим веществом является HF, а основным урансодержащим – UO_2:

$$UF_{6_{\text{газ}}} + 1{,}5\ CH_{4_{\text{газ}}} + 2{,}5\ O_{2_{\text{газ}}} \rightarrow$$
$$\rightarrow UO_{2_{\text{тв}}} + 6HF_{\text{газ}} + 1{,}5\ CO_{2_{\text{газ}}} - 1056\ \text{кДж},\ T_{ad} = 3281\text{К}, \quad (2)$$

$$UF_{6_{\text{газ}}} + 3H_{2_{\text{газ}}} + O_{2_{\text{газ}}} \rightarrow UO_{2_{\text{тв}}} + 6HF_{\text{газ}} - 583\ \text{кДж}, T_{ad} = 2542\ \text{К}. \quad (3)$$

В процессах (2) и (3) высоко тепловыделение, есть возможность проводить их в режиме горения. Таким образом, температура, необходимая, для полного извлечения фтора в виде HF из фторидов урана, достигается за счет распределенных источников энергии, а не нагревом зоны реакции от стенки оборудования. Стенка реактора может иметь низкую температуру (порядка 100 °С) для исключения конденсации HF и плавиковой кислоты. Продукты процессов (2) и (3) нужно достаточно быстро охлаждать до разделения газовой и твердой фазы, чтобы снизить глубину протекания реакции фторирования оксидов урана HF при температуре ниже 1150 К.

В ходе экспериментального исследования на пилотной установке с вертикальным реактором типа «туннельная горелка» внутренним диаметром 142 мм с термостатированной при 90 °С стенкой и с двухкомпонентной коаксиальной цилиндрической форсункой в верхней части показано, что при взаимодействии UF_6 (до 7 г/с) с CH_4 или H_2 и O_2 в режиме горения состав продуктов близок к термодинамически равновесному – основными компонентами являются HF, UO_2 и U_3O_8. Степень извлечения фтора в виде HF в режимах, близких к оптимальным, составила 99,5 % при разделении твердой и газовой фаз при температуре порядка 100 °С и времени охлаждения порядка 1 с.

Для масштабирования промышленного реактора типа «туннельная горелка» была построена математическая модель процессов (2) и (3), основанная на дифференциальных уравнениях движения, неразрывности, переноса кинетической энергии турбулентности, переноса удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, диффузии, переноса теплового излучения, энергии. Для расчета скорости химической реакции использована модель дробления вихрей (диффузионная кинетика). Движущаяся сплошная среда предполагается несжимаемой – число Маха менее 0,3. Частицы оксидов урана, размер которых в опытах, на основе которых проводилась верификация модели, составил величину порядка 1 мкм, предполагаются «вмороженными» в поток. Модель реализована в программном комплексе «Ansys Fluent 2019 R3».

Математическая модель позволяет масштабировать промышленный реактор методом подобия полей параметров, при которых на пилотном реакторе процесс горения был стабильным, а состав его продуктов – близким к термодинамически равновесному при температуре выше 1150 К. В качестве основных параметров при масштабировании используют следующие:

– максимальная скорость потока, при которой фронт турбулентного диффузионного горения стабилен;

– максимальная температура в зоне реакции – основной параметр, характеризующий возможность достижения состава продуктов процесса, близкого к термодинамически равновесному;

– продольная координата сечения реактора, в котором среднемассовая температура потока снижается до 1000 К $x_{T=1000}$ ($\Delta G(T) = 0$ для реакции фторирования UO_2 фторидом водорода), рекомендуемая координата разделения твердой фазы (UO_2) и газового потока (HF);

– характерный размер рециркуляционных течений в прикорневой области факела;

– глубина конверсии ОГФУ;

– удельная производительность реактора и др.

Расчеты с использованием построенной модели показали, что максимальная температура в зоне реакции для (2) составляет величину 2065–2214 К при изменении расхода ОГФУ от 1 до 6 г/с. Эти значения хорошо совпадают со значениями адиабатической температуры с поправкой на тепловое излучение, полученными при термодинамических расчетах без учета диссоциации веществ, которые составили 2082 К и 1667 К для процессов (2) и (3) соответственно.

Список источников

1. Пашкевич Д. С., Зимин А. Р., Алексеев Ю. И. и др. Получение фторида водорода при взаимодействии гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 1. С. 154–162.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ АЭС

Ю. К. Петреня, В. Д. Лычаков*, А. С. Матяш

Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И. И. Ползунова
191167, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6
** LychakovVD@ckti.ru*

Выполнен расчетно-экспериментальный анализ работы термосифонов с водяным заполнением при абсолютном давлении от 5,6 до 71,3 кПа. Показана возможность и сформулированы требования для применения термосифонов в системах отвода низкопотенциального тепла на АЭС, например, в системе охлаждения бассейна выдержки, что значительно повышает безопасность данной системы. Впервые получены значения коэффициента теплоотдачи при кипении воды при давлении ниже атмосферного в вертикальном канале, превышающие рассчитанные по общепринятым рекомендациям до 18 раз. Предложено соотношение для расчета теплоотдачи при кипении в вертикальных каналах при давлении ниже атмосферного и наличии естественной циркуляции.

Опыты проведены на модели термосифонов (ТС), которая представляла собой вертикальную трубу 89 × 3 мм длиной 5 м. Нижняя (нагреваемая) часть ТС была помещена в модель открытого обогреваемого бассейна высотой 4,5 м. Внутри ТС на расстоянии 0,25 м от донышка поочередно устанавливались циркуляционные вставки, изготовленные из трубы 60 × 2 мм, длиной 4,49 м или трубы 48 × 2 мм, длиной 0,72 м. Охлаждение верхней части ТС осуществлялось проточной водой. При проведении опытов измерялись:

– по контуру охлаждающей воды: температуры на входе и выходе, расход, давление;

– внутри ТС: абсолютное давление на уровне верхней крышки, температуры среды на различных высотах;

– в модели бассейна: температуры на различных высотах, подводимая электрическая мощность.

Вода в нижней части зоны нагрева ТС, за счет влияния давления столба воды, не вскипает, так как имеет более высокое давление. При этом температура некипящей воды может превышать температуру насыщения кипящей воды в более высоких слоях зоны нагрева. При достижении вертикальной координаты, где давление воды становится ниже значения насыщения при имеющейся температуре воды в рассматриваемом сечении происходит вскипание воды на внутренней поверхности ТС.

При проведении обработки полученных данных был выполнен расчет коэффициентов теплоотдачи от греющей воды модели бассейна к наружной поверхности зоны нагрева ТС и от внутренней поверхности зоны нагрева к воде внутри ТС ниже уровня ее вскипания. Коэффициенты теплоотдачи при этом определялись по общепринятому соотношению: $Nu = 0{,}135\ (GrPr)^{1/3}$.

На основе полученных результатов были вычислены экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи ($\alpha_э$) при кипении в верхней части зоны нагрева ТС.

При расчете коэффициента теплоотдачи при кипении в каналах при давлениях ниже атмосферного следует учитывать существенное изменение практически всех теплофизических свойств воды и пара, уменьшение плотности центров парообразования, увеличение отрывного диаметра пузыря и времени его отрыва, изменение скорости ро-

© Петреня Ю. К., Лычаков В. Д., Матяш А. С., 2025

ста сухих пятен в основании паровых пузырей. Следовательно, существуют факторы, как уменьшающие, так и увеличивающие величину коэффициента теплоотдачи, относительно общепринятых рекомендаций [1–3]. Это подтвердило сопоставление значений $\alpha_э$ со значениями коэффициента теплоотдачи, рассчитанными по [1–3] ($\alpha_р$). При этом была обнаружена четкая зависимость (рис. 1) отношения $\alpha_э/\alpha_р$ от температурного напора (ΔT) и от плотности теплового потока (q).

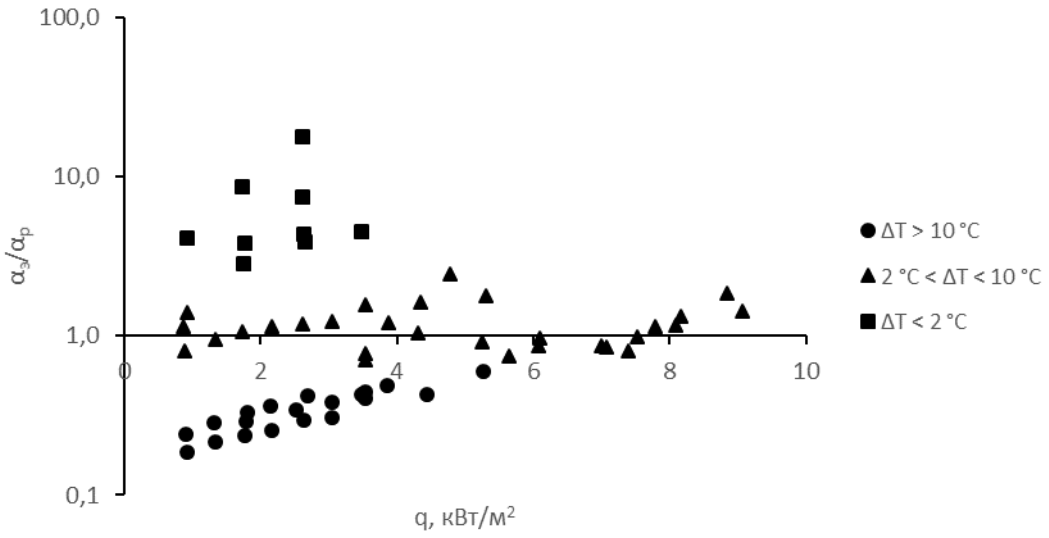


Рис. 1. Зависимость отношения экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи от рассчитанных по рекомендациям [2] от q для различных значений ΔT

Полученные результаты объясняются тем, что при относительно высоких значениях ΔT наступает кризис кипения первого рода, смачивание нагреваемой поверхности ухудшается и значения коэффициента теплоотдачи резко падают. Превышение же экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи над расчетными можно объяснить вертикальным положением греющей поверхности, наличием циркуляционной вставки, интенсифицировавшей процесс кипения за счет подвода в зону кипения перегретой жидкости из нижней части ТС и ускорявшей отвод паровых пузырей и наличием дополнительных токов естественной циркуляции в кольцевом канале, вызываемых стекающей из зоны конденсации водой. Необходимо обратить особое внимание на то, что зазор между внутренней поверхностью наружной трубы и циркуляционной вставкой составлял 11,5 и 17,5 мм, что сопоставимо с отрывным диаметром пузыря [4] при исследованных давлениях. В то время как в подробно изученных парогенерирующих каналах оборудования АЭС, работающих при избыточных давлениях, диаметр трубок или эквивалентный диаметр каналов сложной формы в большинстве случаев составляет не менее 8–12 мм. В большинстве существующих аппаратов кипение происходит в объеме, существенно превышающем по своему характерному размеру отрывной диаметр паровых пузырей, равный примерно 0,5–1 мм и менее. Это является причиной того, что общепринятые соотношения для расчета теплоотдачи при кипении не могут использоваться напрямую для обобщения полученных в настоящей работе данных.

В результате выполненной работы показана эффективность применения ТС исследованной конструкции для отвода тепла от низкопотенциальных источников, таких как бассейн выдержки отработанного ядерного топлива.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении в вертикальных каналах при давлении ниже атмосферного и наличии естественной циркуляции использование

общепринятых соотношений не обосновано, необходимо внесение в расчетные соотношения дополнительного сомножителя, имеющего вид $(4\ q^{0,3}\Delta T^{-1})$, при этом отличие $\alpha_э$ от $\alpha_р$ не превышает 16 %.

Список источников

1. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. М. : Атомиздат, 1979.
2. Лабунцов Д. А. Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1972. № 9. С. 14.
3. Ягов В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М. : Издательский дом МЭИ, 2014.
4. Сердюков В. С. Экспериментальное исследование микрохарактеристик и теплообмена при кипении жидкостей в условиях различных давлений : дис. … канд. техн. наук. Новосибирск : ИТ СО РАН, 2020.

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ФАКЕЛА ВЫБРОСА ИЗ МАЧТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ АТОМНОГО ОБЪЕКТА МОРСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Н. Сыралёва*, И. В. Кудинович, Д. В. Багаев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44
** m_syralyova@ksrc.ru*

Для атомных объектов морской техники высота мачты специальной вентиляции с шахтой выброса и скорость выброса определяют условия рассеяния удаляемых газообразных радиоактивных веществ. Увеличение высоты шахты и скорости выброса способствуют эффективному перемешиванию удаляемого воздуха в атмосфере и, следовательно, снижения концентрации радиоактивных веществ на поверхности атомного объекта морской техники и прилегающей зоне. По результатам CFD-моделирования определялось пространственное распределение безразмерной осредненной по времени массовой концентрации примесей в выбрасываемом воздухе на поверхности и вблизи объекта в зависимости от высоты вентиляционной мачты и скорости выбрасываемого воздуха. При обосновании эффективной высоты факела выброса в качестве критерия радиационной безопасности принималось условие отсутствия касания факелом выброса палубы и надстроек, что обеспечивает непревышение допустимых концентраций радиоактивных веществ в воздухе около поверхности атомного объекта морской техники и предотвращает поступление воздуха, выходящего из системы специальной вентиляции, в воздухозаборники общесудовой вентиляции.

На основании нормативных документов (НД № 2-020101-169, СП 2.6.1.45-03, СП-САТО-2001, НП-041-22, СанПиН 2.6.1.2523-09) сформулированы требования, предъявляемые к радиационной безопасности при выбросе воздуха из помещений контролируемой зоны атомных объектов морской техники (АОМТ):

– выброс воздуха из помещений контролируемой зоны должен осуществляться через специальную вентиляционную мачту, конструктивная высота которой должна быть не менее 3 м над надстройками;

– высота выброса воздуха из системы спецвентиляции должна обеспечивать снижение объемной активности радиоактивных веществ в атмосферном воздухе в месте приземления факела до значений, обеспечивающих непревышение установленной квоты предела дозы для населения;

– конструкция вентиляционной мачты должна обеспечивать возможно большую эффективную высоту выброса (не менее 5 м при нормальных условиях эксплуатации и не менее 10 м при тяжелых аварийных ситуациях).

Моделирование распространения выброса газовоздушной смеси из шахты с учетом атмосферного переноса производилось в CFD-пакете. Моделирование турбулентного течения производилось с использованием DES-подхода. Для замыкания использовалась SST k-ω модель турбулентности. Моделирование газовоздушной смеси при выбросе осуществлялось в рамках модели многокомпонентной смеси.

Для оценки отсутствие касания факелом выброса палубы и надстроек АОМТ используются значения безразмерной осредненной по времени массовой концентрации примесей в точках мониторинга (рис. 1).

© Сыралёва М. Н., Кудинович И. В., Багаев Д. В., 2025

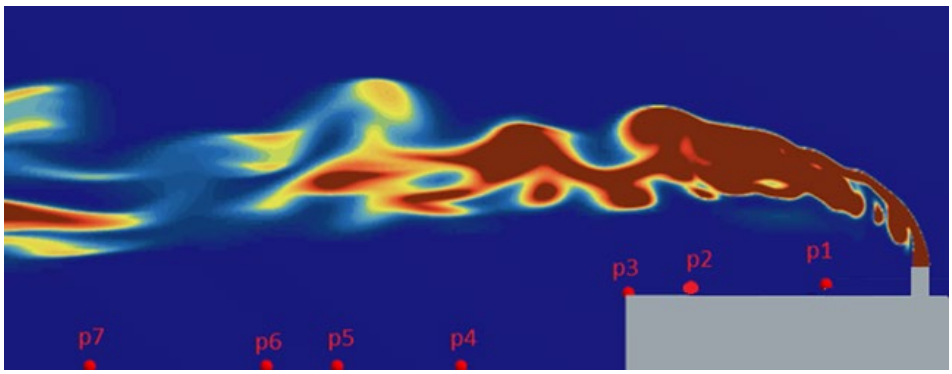


Рис. 1. Мгновенное поле массовой концентрации примесей

Для определения высоты подъема факела над срезом трубы в [2] предложены две эмпирические формулы:

$$h = 4{,}2 \cdot d_{\text{т}} \left(\frac{V_{\text{т}}}{V_{\text{в}}} - 0{,}7\right)^{0{,}63}, \tag{1}$$

где $d_{\text{т}}$ – диаметр выходного отверстия трубы, м; $V_{\text{т}}$ – скорость воздуха на выходе трубы, м/с; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра на высоте точки выброса, м/с;

$$h = \frac{1{,}88 \cdot V_{\text{т}} \cdot d_{\text{т}}}{V_{\text{в}}} + \frac{1{,}6 \cdot g \cdot Q_{\text{об}} \cdot \Delta T}{T_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}}^{3}} \tag{2}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; $Q_{\text{об}}$ – объемный расход, м^3/с; ΔT – перегрев выброса относительно окружающего воздуха, К; $T_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, К.

Сравнение значений высоты подъема факела над срезом трубы, рассчитанных по эмпирическим формулам (1), (2) и с использованием CFD-кода, представлено на рис. 2.

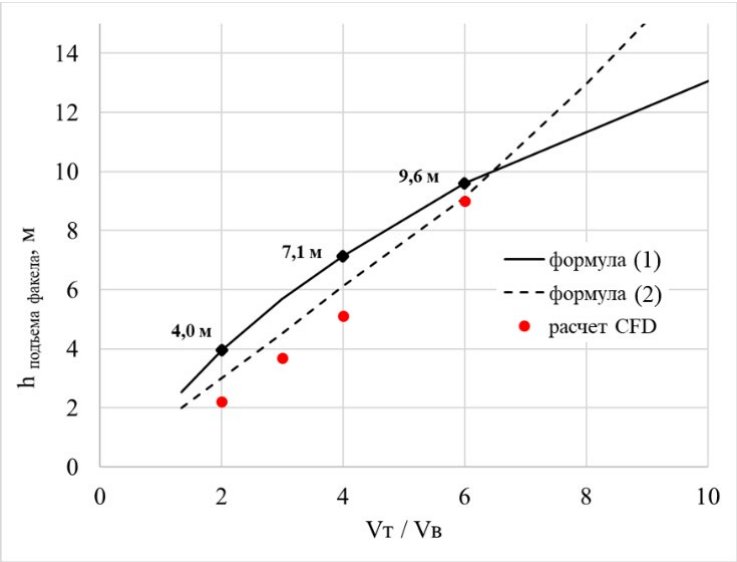


Рис. 2. Высота подъема факела над срезом трубы

Различие полученных результатов падает при увеличении отношения скоростей $V_{\text{т}}/V_{\text{в}}$, что связано с уменьшением влияния пристенного слоя на подъем факела. При от-

ношении скоростей $V_т/V_в > 6$ наблюдается преобладание теплового подъема факела, учет которого отсутствует в формуле (2).

Для отношения скоростей $V_т/V_в < 2$ рассматривать подъем факела не имеет смысла, так как струю «прибивает» к поверхности набегающим ветром, избежать попадания выбросов радиоактивных веществ на поверхность АОМТ не представляется возможным.

Результаты расчетов показали, что с ростом высоты трубы концентрация примеси в точках мониторинга падает. Максимальное значение средней концентрации примесей при высоте труб (над надстройкой АОМТ) до 6 м наблюдается в точках р1-р3, что соответствует поверхности АОМТ. При высотах трубы выброса более 6 м зона максимальной концентрации смещается (точки р6, р7) на расстояние 100–150 м от места размещения АОМТ. Для трубы высотой 6 м максимальная концентрация падает в 7 раз, для трубы высотой 15 м – в 92 раза по сравнению с трубой минимальной высоты 3 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что при высоте трубы более 6 м (над надстройкой) факел выброса не касается поверхности АОМТ.

Список источников

1. Клюгин С. А., Определение ширины защитных зон, высоты выбросных труб и степени очистки газов, поступающих в атмосферу // Очистка промышленных выбросов / под ред. Т. Е. Болдырева. Вып. 1. М. : Медгиз, 1953.

ОЦЕНКИ ОБЛАСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

В. В. Лукашов, А. В. Тупикин, В. А. Федоренко*

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** vitya.fedorenko.335@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия импактной водородно-воздушной струи с плоской каталитической поверхностью при числах Рейнольдса <2000. Основное внимание уделено оценке полноты сгорания на каталитической поверхности в ламинарных режимах течения. Предложена аналитическая зависимость для оценки зоны каталитической реакции, которая была подтверждена экспериментально.

Задачи, связанные с нейтрализацией нежелательных компонент газовой смеси, достаточно широко распространены в различных технических приложениях: теплоэнергетике, в области автомобильной и атомной промышленности. В крупнейших зарегистрированных авариях, которыми были ТриМайл-Айленд (1979 г.), Чернобыль (1986 г.) и Фукусима (2011 г.), происходило расплавление активной зоны реактора. При повышенных температурах (>1200 °C) материал оболочки реакторного топлива циркалой (сплав циркония с оловом с содержанием циркония >97 %) выделяет газообразный водород в результате реакции окисления водяным паром. Во избегании взрывоопасных последствий, необходимо удаление избыточного количества H_2 [1], что делает исследования в этой области атомной промышленности крайне актуальными.

Цель данной работы заключалась в изучении теплофизических процессов при каталитическом окислении в ламинарном режиме натекания водородно-воздушной струи на плоскую преграду с каталитической поверхностью. Одной из решаемых задач было определение размеров области каталитической активности, которую можно интерпретировать как зону нейтрализации нежелательных компонент газовой смеси.

В работе исследовались ламинарные режимы течения в диапазоне чисел Рейнольдса (Re <2000), схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Рис. 1. Схема эксперимента: *1*– генератор газовых смесей УФПГС-2; *2*– нагреваемая пластина с каталитической поверхностью; *3* – управление электрическим нагревателем; *4* – трубка подачи газообразного топлива; *5* – тепловизор, *6* – координатное устройство, *7* – компьютер

© Лукашов В. В., Тупикин А. В., Федоренко В. А., 2025

В эксперименте на нагретую электрическим нагревателем с автоматической поддержкой заданной температуры (3) пластину (2), выполненную из нержавеющей стали, из трубки (4) под углом 90° натекает импактная струя топлива, параметры которой задаются с помощью генератора топливной смеси (1). Длина трубки (4) l = 1 м, внутренний диаметр d = 3мм. Толщина пластины Δ = 3 мм, диаметр D = 100 мм, покрыта катализатором, представляющим собой гамма-оксид алюминия, модифицированный редкоземельными металлами и содержащий активный каталитический компонент палладий, имеющий состав: 2 %Pd/10 %$CeO_{0,4}ZrO_{0,4}LaO_{0,2}/Al_2O_3$. Распределение температуры на поверхности пластины регистрируется с помощью тепловизионной камеры Testo 890-2 (5). Расстояние от трубки до преграды h = 45 мм (h/d = 15), температура окружающей среды T_0 = 25 ºС, на стенке T_W = 110 ºС, что является минимальной температурой, необходимой для запуска каталитической реакции на используемом катализаторе. Замечено, что увеличение T_W на 150 ºС не влияет на вид распределения температуры по поверхности катализатора.

В работе [2], применяя закон Ньютона – Рихмана ($q = \alpha \cdot [T_W - T_0]$, α – коэффициент теплоотдачи с поверхности) и используя формулу (1), была оценена зависимость влияния каталитического окисления водорода на теплоотдачу при изменении процентного соотношения по водороду (рис. 2, *а*)

$$\tilde{q} = \left(\frac{\tilde{q}_{mix}}{\tilde{q}_{air}} - 1\right), \tag{1}$$

где $\tilde{q}_{mix}$ – плотность теплового потока при натекании смеси, $\tilde{q}_{air}$ – при натекании воздушного потока, в случае ламинарного натекания на преграду $\alpha_{mix}/\alpha_{air} \approx 1{,}02$, α_{mix} – для смеси, α_{air} – для воздуха. Если $\tilde{q}$~0, то $\tilde{q}_{mix} = \tilde{q}_{air}$, следовательно реакции более не протекают, и взрывоопасное состояние смеси «нейтрализовано».

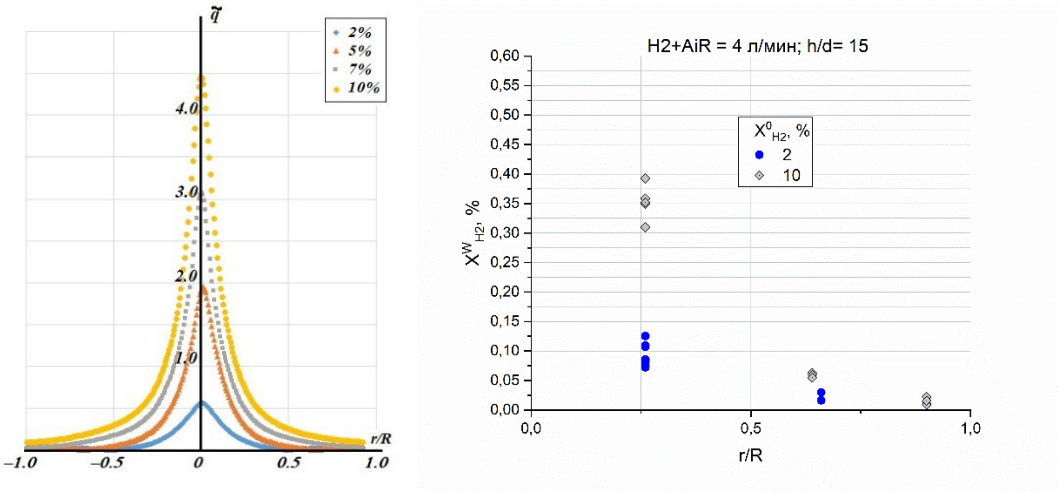


Рис. 2. Влияние каталитического окисления водорода на теплоотдачу в зависимости от количества водорода в смеси по плотности теплового потока (*а*); изменения процентного количества водорода (*б*)

На рис. 2, *б,* показаны результаты исследований изменения процентного количества H_2, полученные с помощью хроматографа, при тех же заданных начальных условиях, что и на рис. 2, *а*, для 2 и 10 % водорода. Наблюдается уменьшение процентного содержания H_2 к краю по радиусу пластины, что коррелирует с аналитическими оценками на (рис. 2, *а*). Описанный метод дает возможность оценить количество водорода,

а также область с безопасным содержанием H_2 в смеси и, следовательно, подобрать размеры катализатора для нейтрализации нежелательных веществ.

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

Список источников

1. Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Alymov M. I. Initiation and flame propagation in combustion of gases and pyrophoric metal nanostructures // Berlin/Heidelberg : Springer, 2021.

2. Лукашов В. В., Леманов В. В., Тупикин А. В., Федоренко В. А., Шаров К. А. Гидродинамика и теплообмен при натекании импактной ламинарной струи на каталитическую поверхность // Теплофизика и аэромеханика. 2025.

Секция 10
Микро- и нанотехнологии в теплофизике и энергетике

ВЯЗКОСТЬ И РЕОЛОГИЯ ПРОСТЫХ ЖИДКОСТЕЙ И НАНОЖИДКОСТЕЙ. АНАЛИЗ И ДИАГНОЗ

В. Я. Рудяк[1, 2]

[1]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*
630008, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113
[2]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
valery.rudyak@mail.ru

В докладе анализируется понятие вязкости и реологии. Рассматриваются слабо и сильно неравновесные среды. Показано, что только в первом случае удается ввести обычно используемое понятие коэффициента вязкости. Во всех остальных случаях вводится эффективный коэффициент вязкости, зависящий от скорости сдвига. Характер таких неньютоновских жидкостей иллюстрируется примерами реологии наножидкостей как с обычными наночастицами, так и с углеродными нанотрубками. Закономерности изменения получаемых определяющих соотношений с ростом скорости сдвига течений исследуются методом молекулярной динамики.

Обычно на практике при изучении тех или иных течений ограничиваются рассмотрением слабо неравновесных процессов переноса, когда диссипативные потоки пропорциональны градиентам соответствующих макроскопических переменных. Именно в этом случае удается ввести коэффициент вязкости, и такую жидкость называют ньютоновской. Коэффициент вязкости тогда определяется флуктуационно-диссипационной теоремой (ФДТ), согласно которой он является интегралом по времени от двухвременной корреляционной функции микроскопического тензора напряжений [1]. Строго показано, что в этом случае коэффициент вязкости определяется лишь динамикой равновесных микроскопических флуктуаций импульса частиц системы и не зависит от типа течения.

В случае сильно неравновесных процессов обычная ФДТ уже не работает. Связь диссипативных потоков с градиентами макроскопических наблюдаемых становится нелинейной. В простейшем случае сдвиговых изотермических течений, например, тензор напряжений является нелинейной функцией от скорости сдвига. Желание представить его в обычном ньютоновском виде приводит к тому, что вводится эффективный коэффициент вязкости, зависящий от скорости сдвига. Примечательно, что в дисперсных средах, в частности в наножидкостях, это наблюдается при достаточно малых скоростях сдвига, а сами наножидкости являются псевдо- или вязкопластичными [2–6].

Экспериментально реология наножидкостей достаточно хорошо изучена, выявлены параметры, от которых она зависит. Вместе с тем эксперимент не дает возможности ответить на вопрос, чем обусловлено изменение реологии? Цель данного доклада состоит в последовательном описании и анализе реологии простых жидкостей и наножидкостей как с обычными сферическими частицами, так и с углеродными нанотрубками. Для изучения механизмов возможной трансформации реологии и выяснения ее причин используется метод молекулярной динамики [7–9]. В этой связи необходимо отметить, что слабо неравновесные процессы фактически являются предикатом закрытой системы. В открытой системе необходимо учитывать связи, накладываемые на систему. В этом смысле просто система уравнений Ньютона уже не описывает ее эволюцию. Это требует соответствующей трансформации метода молекулярной динамики.

© Рудяк В. Я., 2025

В частности, в докладе последовательно излагаются:

– экспериментальные данные изучения реологии наножидкостей с обычными наночастицами и условия возможного ее изменения;

– экспериментальные данные изучения реологии наножидкостей с одностенными и многостенными нанотрубками и их сопоставление;

– данные молекулярно-динамического изучения изменения реологии простой жидкости (бензола) с ростом скорости сдвига;

– данные молекулярно-динамического изучения изменения реологии наножидкостей с обычными сферическими наночастицами меди и алюминия;

– данные молекулярно-динамического изучения изменения реологии наножидкостей с углеродными нанотрубками.

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 23-79-30022.

Список источников

1. Rudyak V. Ya. Fluctuation-Dissipation Theorems and Transport Coefficients of the Gases, Liquids and Nanofluids // J. Phys.: Conf. Series. 2020. Vol. 1560. P. 012002.

2. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Rheological Behavior of Water and Ethylene Glycol Nanofluids with Oxide Nanoparticles // Colloids and Surfaces A: PhysicoChem. and Eng. Aspects. 2018. Vol. 554. Pp. 279–285.

3. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids // Heat Transfer Eng. 2020. Vol. 41, no. 5. Pp. 457–460.

4. Rudyak V. Ya., Tret′yakov D. S. Rheological Properties of Water- and Ethelene Glycol-Based Nanofluids with Single Wall Carbon Nanotubes // J. Eng. Phys. Thermophysics. 2021. Vol. 94, no. 5. Pp. 1208–1216.

5. Rudyak V., Minakov A., Pryazhnikov M. Preparation, Characterization, and Viscosity Studding the Single-Walled Carbon Nanotube Nanofluid // J. Mol. Liquids. 2021. Vol. 329. No. 1. Pp. 115517.

6. Rudyak V.Ya., Dashapilov G. R., Minakov A. V., Pryazhnikov M. I. Comparative Characteristics of Viscosity and Rheology of Nanofluids with Multi-Walled and Single-Walled Carbon Nanotubes // Diamond & Related Mat. 2023. Vol. 132. P. 109616.

7. Rudyak V. Ya., Belkin A. A., Rafalskaya T. A. Molecular Dynamics Modeling Rheology of Nanofluids // Tech. Phys. Lett., vol. 49, no. 10, pp. 1–4, 2023.

8. Rudyak V., Rafalskaya T. Molecular Dynamics Simulation of Viscosity and Rheology of Nanofluids with Single Wall Carbon Nanotubes // E3S Web of Conf. 2024. Vol. 578. P. 01032.

9. Rudyak V. Ya., Belkin A. A., Rafalskaya T. A. Molecular Dynamics Study of the Rheology of Benzene-Based Nanofluids with Metal Particles // J. Mol. Liquids. 2024. Vol. 403. P. 124805.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. А. Андрющенко

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
vladimir.andryushchenko@gmail.com

В работе обсуждаются особенности молекулярно-динамического моделирования смачиваемости. Рассматриваются различные алгоритмы оценки смачиваемости поверхностей, основанные как на непосредственном анализе динамики частиц смачивающих жидкостей, так и на обработке изображений капель, смачивающих различные поверхности. Предложены рекомендации по использованию существующих алгоритмов определения смачиваемости для поверхностей с существенно различающимися морфологиями.

Процессы, происходящие на микро- и наномасштабах, привлекают значительное внимание, что обусловлено совершенствованием микро- и наноустройств, а также расширением области их применения. Одной из актуальнейших задач в данной области является управление смачиваемостью поверхностей таких устройств [1; 2]. Для совершенствования процесса создания поверхностей с заданными лиофильными свойствами необходимо понимание молекулярных механизмов, определяющих особенности межфазного взаимодействия. Данное понимание можно достигнуть с помощью проведения моделирования систем на молекулярном уровне.

Существующие алгоритмы определения смачиваемости, применяемые при анализе данных атомистического моделирования, как правило, основаны на определении контактных углов капель жидкости, растекающихся на различных поверхностях. Причем на сегодняшний день наибольшее распространение получили алгоритмы, основанные на сферической аппроксимации капель. Данный класс алгоритмов хорошо себя зарекомендовал при изучении смачиваемости гладких поверхностей. Однако на практике возникает необходимость изучения поверхностей с более сложной морфологией или сложных по составу жидкостей, например, ионных. В этом случае могут возникать существенные деформации форм и контактных линий капель, что делает вышеуказанный класс алгоритмов неприменимым. Данная ситуация требует проведения оценки применимости существующих алгоритмов определения смачиваемости поверхностей.

В работе производится оценка применимости алгоритмов определения смачиваемости для существенно различных по лиофильным свойствам поверхностей. Так, рассматриваются различные материалы, в т. ч. с различной ориентацией кристаллов. Кроме того, рассматриваются дополнительные изменения лиофильных свойств, достигаемые путем создания на поверхностях текстур с различной формой, глубиной и регулярностью, а также путем нанесения на поверхность графеновых покрытий с различной толщиной и степенью прилегания к поверхности.

При исследовании смачиваемости вычисляются геометрические характеристики капель жидкостей: форма, высота, положение контактной линии, стационарные контактные углы. По результатам исследований оценена точность существующих алгоритмов определения смачиваемости, а также предложены рекомендации для их использования для различных систем. Также обсуждаются особенности молекулярно-динамического моделирования смачиваемости.

© Андрющенко В. А., 2025

Список источников

1. Jothi Prakash C. G., Prasanth R. Approaches to design a surface with tunable wettability: a review on surface properties // J. Mater. Sci. 2021. Vol. 56. Pp. 108–135.

2. Bai X. et al. A review of smart superwetting surfaces based on shape-memory micro/nanostructures // Small. 2023. Vol. 19 (15). Pp. 2206463.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ ФРЕОНОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ С СЕТОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ С НАНОРЕЛЬЕФОМ, СОЗДАННЫМ ХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ

О. А. Володин*, Н. И. Печеркин,
С. В. Конев, А. Н. Павленко

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** volodin_o@mail.ru*

В работе были получены опытные данные по интенсификации теплообмена в стекающей пленке смеси фреонов R114/R21 на вертикальном цилиндре с модифицированным базовым сеточным покрытием (отобранном ранее и имеющим наиболее эффективные с точки зрения теплообмена при кипении характеристики: апертура – 240 мкм, диаметр проволоки – 80 мкм). Модификация заключалась в создании на поверхности сетки наноструктуры, обеспечивающей дополнительную интенсификацию парообразования, для чего было применено химическое травление раствором гидроксида натрия и надсернокислого аммония. Показано, что наномодифицированное сеточное покрытие более эффективно, чем аналогичное покрытие без модификации: увеличение коэффициента теплоотдачи составило 10–35 % в исследованном диапазоне тепловых потоков (0,1–5 Вт/см^2).

Одним из ключевых методов повышения коэффициента теплоотдачи (КТО) от тепловыделяющей стенки к пленке жидкости в режимах испарения и кипения пленки является модификация поверхности стенки. В рамках данного исследования рассматривалась интенсификация теплообмена в режимах испарения и кипения пленки жидкости в первую очередь за счет применения сеточных покрытий, поскольку данная технология в последние годы переживает заметное развитие – появляются современные исследования с использованием так называемых «градиентных» сеточных покрытий; комбинаций сеточного покрытия с другими видами модификации поверхности (включая наномодификацию) или применением аддитивных технологий (3D-печать) для нанесения на тепловыделяющую поверхность сетчатых паттернов [1]. Использование сеточных покрытий обладает такими преимуществами как простота монтажа на тепловыделяющую поверхность, низкая стоимость производства, а также доступность микросеток с различными геометрическими характеристиками и свойствами материала.

В проведенных ранее исследованиях авторов при варьировании геометрических параметров сеточных покрытий было показано, что наиболее эффективными для интенсификации теплообмена при кипении стекающей пленки смеси фреонов R114/R21 являются медные микросетки с апертурой 240 мкм и диаметром проволоки 80 мкм (mesh 80) [2]. В данном исследовании была проведена дальнейшая модификация наиболее эффективного сеточного покрытия, которая заключалась в создании на поверхности сетки mesh 80 наноструктуры, способной обеспечить дополнительную интенсификацию процесса парообразования, для чего было применено химическое травление (раствором гидроксида натрия и надсернокислого аммония).

Сравнение опытных данных по КТО на исследуемой поверхности для диапазона чисел Рейнольдса от 400 до 1300 представлено на рис. 1. Наноструктурированная поверхность медной сетки (натянутой вокруг тепловыделяющего цилиндра с помощью пружинного крепежа), демонстрирует повышение КТО до 1,5 раз по сравнению с гладким эталонным цилиндрическим нагревателем при значениях плотности теплового по-

© Володин О. А., Печеркин Н. И., Конев С. В., Павленко А. Н., 2025

тока q: 2-5 Вт/см^2. Также видно, что наномодифицированное сеточное покрытие более эффективно, чем аналогичное сеточное покрытие без наномодификации: увеличение коэффициента теплоотдачи составило 10–35 % в исследованном диапазоне тепловых потоков (0,1–5 Вт/см^2). В то же время исследуемое сеточное покрытие с нанотекстурой все же уступает по тепловым характеристикам аналогичному сеточному покрытию (без нанорельефа), припаянному к поверхности низкотемпературным припоем (сплавом Вуда), данные по КТО для которого были получены ранее. Это подчеркивает роль правильного выбора метода монтажа сеточных покрытий, а также говорит о том, что между сеткой с нанопокрытием и поверхностью стенки при использовании пружинного крепежа остались микронные зазоры (достигающие значений в десятки микрон), ухудшающие теплоотдачу. Однако стоит подчеркнуть невозможность использования пайки при монтаже сетки с нанопокрытием (представляющим собой оксид алюминия).

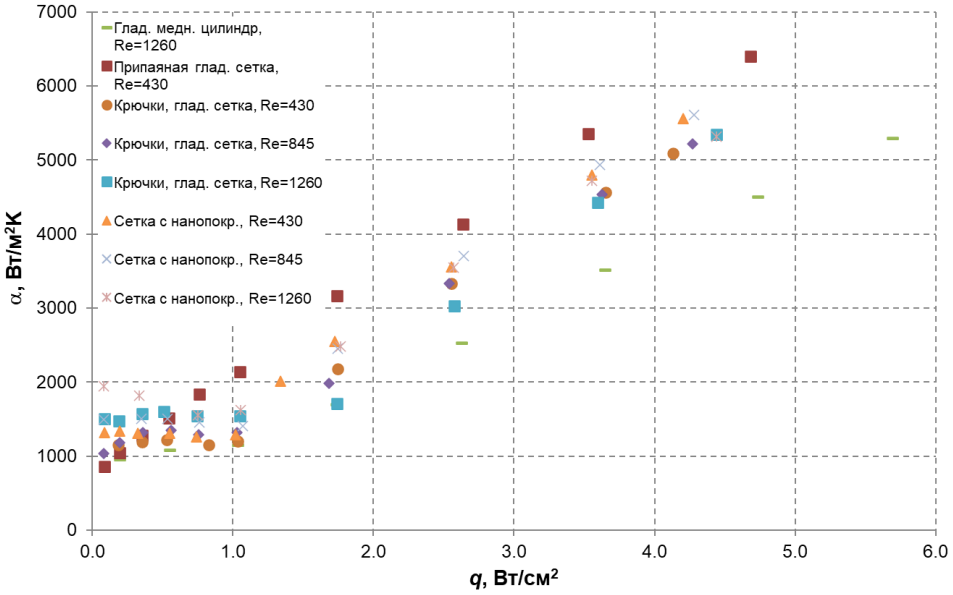


Рис. 1. Зависимость КТО от плотности теплового потока
для исследованных сеточных покрытий

Таким образом, подтверждена эффективность создания нанорельефа сеточного покрытия для дополнительной (по сравнению с сеточным покрытием с технически-гладкой поверхностью проволоки) интенсификации теплообмена при кипении смеси хладонов в диапазоне умеренных значений плотности теплового потока 2–5 Вт/см^2. Характеристики и СЭМ-изображение наномодифицированной структуры сеточного покрытия будут приведены в докладе.

Исследование выполнено в рамках гранта № 075-15-2025-007 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список источников

1. Volodin O. A., Pavlenko A. N., Pecherkin N. I. Heat Transfer Enhancement on Multilayer Wire Mesh Coatings and Wire Mesh Coatings Combined with Other Surface Modifications–A Review // J. Eng. Thermophys. 2021. Vol. 30 (4). Pp. 563–596.

2. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A. Combining Microstructured Surface and Mesh Covering for Heat Transfer Enhancement in Falling Films of Refrigerant Mixture // Energies. 2023. Vol. 16 (2). P. 782.

РОСТ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ОЛОВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ, НА ГРАФЕНЕ

Т. И. Гареев[1, 2*], Д. В. Смовж[2], О. В. Зайцев[1, 2]

[1]Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** t.gareev@g.nsu.ru*

Рассматривается возможность использования магнетронной распылительной системы для напыления наночастиц и создания композитов на основе частиц олова и графена. Рассматривается влияние времени процесса напыления, материала подложки. Обсуждаются структурные, сенсорные и электропроводящие свойства композитов.

Интерес исследований в направлении применимости графена в различных технологиях вызван его уникальными свойствами, такими как высокая теплопроводность и проводимость. Активно растущим направлением исследований является использование графена в качестве основы газоанализаторов [1]. Для изменения и улучшения сенсорных свойств поверхность графена возможно функционализировать, например, наночастицами оксида олова [2]. Выбор метода создания графена и модификации графеновой поверхности во многом определяет итоговые свойства композита, в частности, процесс создания наночастиц на графене меняет его изначальные свойства. Одним из перспективных способов создания композита из графена и наночастиц является метод магнетронного распыления, поскольку широкий набор параметров напыления позволяет контролировать размер и морфологию покрытия из наночастиц. Немаловажным преимуществом является и принципиальная масштабируемость всего процесса создания композитов, необходимая для массового производства.

Графен получен методом CVD и методом электродугового синтеза. Для получения наночастиц на графене использовалось магнетронное распыление оловянной мишени. Получены композиты с варьированием времени напыления и, соответственно, среднемассовой толщины покрытия от 3 до 16 нм при постоянных мощности, давлении рабочего газа и расстоянии от оловянной мишени до подложки с графеном. Для исследования полученных образцов использовались СЭМ, РФА и метод комбинационного рассеяния света.

В работе обсуждается образование наночастиц оксида олова, полученных методом магнетронного распыления, на графене и кремнии, а также влияние процесса напыления частиц на структурные и сенсорные свойства графена. По снимкам поверхности, полученным СЭМ, определен сценарий роста наночастиц на поверхности графена и кремния, а также средние размеры частиц и распределение по размеру. Для 3 и 5 нм среднемассовой толщины средний размер составил 11 нм, для 16 нм – 58 нм (рис. 1). На кремнии обнаружена сплошная пленка.

Таким образом, в начале роста олово представляет собой образование зародышей, растущих перпендикулярно поверхности подложки с увеличением материала на поверхности. При достижении критической массы зародыши начинают коагулировать в более крупные островки различной формы. От поверхности зависит и структура пленки. Так, на оксиде кремния пленка олова образует сплошное покрытие, что свидетельствует о том, что атомы олова сильнее взаимодействуют с атомами подложки, чем друг с другом. РФА позволил определить наличие фазы SnO в полученных образцах.

© Гареев Т. И., Смовж Д. В., Зайцев О. В., 2025

По спектрам КР проведен анализ влияния процесса магнетронного распыления на структурные свойства графена (рис. 2).

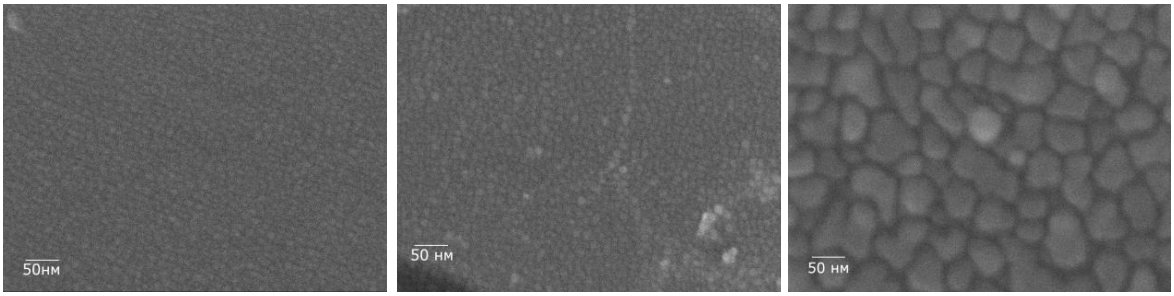


Рис. 1. SEM Gr+SnO на SiO_2. Время синтеза 5, 10 и 30 с

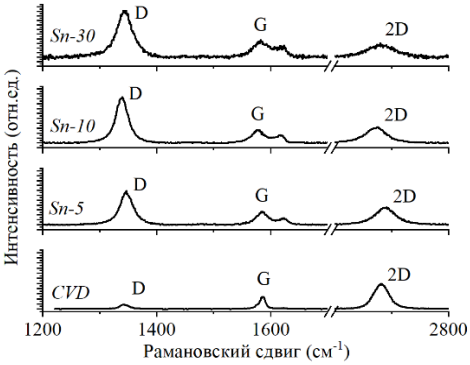


Рис. 2. Спектр КР образцов. Длина волны излучения 512 нм

На всех спектрах наблюдается 2D пик, соответствующий графеновой структуре, а по отношению интенсивности пиков 2D/G можно говорить о том, что начальный графен имеет 1–2 слоя. После напыления олова и с увеличением времени напыления 2D пик уширяется, происходит увеличение отношения интенсивностей линий D/G, что говорит об увеличении концентрации дефектов в структуре. Тем не менее добавление олова на поверхность графена улучшает его сенсорные свойства. На рис. 3 представлены кривые отклика и восстановления в газе NO_2, схема определения которых описана в [3]. Образцы с оловом показывают меньшее характерное время отклика и восстановления в сравнении с чистым графеном – снижение $t_{отк.}$ в 6,7 раз и $t_{вост.}$ в 2,3 раза. Определение этих величин проводилось с помощью аппроксимации по модели адсорбции Ленгмюра.

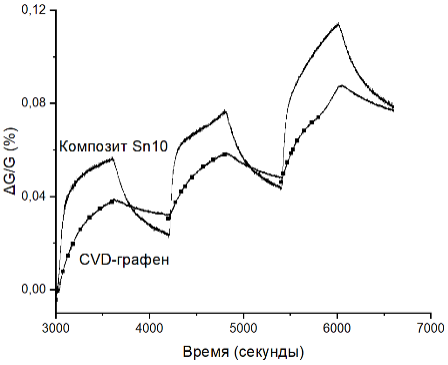


Рис. 3. Кривые отклика образцов на газ NO_2. Пунктиром отмечена аппроксимационная кривая

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00357 (https://rscf.ru/project/24-19-00357).

Список источников

1. Varghese S. S. et al. Recent advances in graphene based gas sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2015. Vol. 218. Pp. 160–183.

2. Zhang D. et al. Fabrication and characterization of an ultrasensitive humidity sensor based on metal oxide/graphene hybrid nanocomposite // Sensors and Actuators B: Chemical. 2016. Vol. 225. P. 233–240.

3. Bannov A. G. et al. Room-temperature NO_2 gas sensors based on granulated carbon nanofiber material // Chemosensors. 2022. Vol. 10 (12). P. 525.

СИНТЕЗ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГО ЭЛЕКТРОДА И ПОСЛЕДУЮЩИМ ОТЖИГОМ

О. В. Зайцев[1, 2*], Т. И. Гареев[1, 2], Д. В. Смовж[1]

[1]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[2]Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1
** o.zaitsev@g.nsu.ru*

Пленки диоксида титана были получены методом HiPIMS с использованием дополнительного малого электрода и последующим отжигом в азоте и на воздухе. По результатам эксперимента были получены пленки анатаза – метастабильного состояния диоксида титана с наиболее выраженными фотокаталитическими свойствами. Использование анода в процессе напыления позволило добиться меньшей плотности пленок, по сравнению с пленками, синтезированными с использованием катода или без использования электрода, что улучшает фотокаталитические свойства получаемых пленок.

Магнетронное распыление – метод синтеза субмикронных покрытий, основанный на распылении катода в газовом разряде вследствие ионной бомбардировки. Метод позволяет получать пленки, наночастицы, а также модифицировать поверхность структур (микросферы, сажа, двумерные материалы и т. д.) путем напыления различных материалов. Использование высокомощных импульсных источников питания позволяет не только увеличить степень ионизации плазмы, но также, при правильном подборе параметров, позволяет производить распыление в реактивной атмосфере. Особый интерес представляют пленки анатаза диоксида титана, ввиду их фотокаталитических, биологических и полупроводниковых свойств. Анатаз является метастабильным состоянием диоксида титана, не содержащимся в свободной форме в природных рудах. Благодаря своим свойствам пленки рутила используются в биосовместимых устройствах, МОП-транзисторах, в антибактериальных покрытиях и «умных» окнах. В данной работе распыление производилось с помощью магнетрона с титановым катодом в атмосфере аргона с кислородом. Полученные пленки отжигались в атмосфере азота и кислорода.

Экспериментальная установка представляла собой металлическую вакуумную камеру объемом 100 л, внутри расположены: вращающийся подложкодержатель, вблизи которого находился малый электрод; магнетрон с кольцевым анодом и ионный источник. Камера оснащена турбомолекулярной насосно-откачной системой, системой подачи газа на основе регуляторов расхода. Питание магнетрона осуществлялось от импульсного высокомощного источника тока.

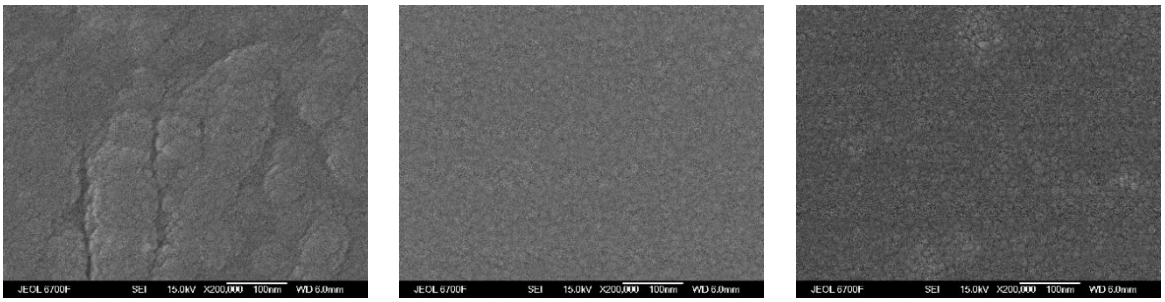
Перед помещением в вакуумную камеру все подложки из монокристаллического кремния проходили чистку в ультразвуковой бане. Вакуумная камера перед напылением откачивалась до высокого вакуума с выдержкой для дегазации. Подложки перед напылением проходили очистку источником ионов для снятия поверхностного слоя. Были подобраны параметры частоты и импульса, обеспечивающие максимально доступную скорость напыления. Было произведено три серии синтеза: при положительном (относительно стенок камеры) напряжении (анод) на электроде, отрицательном (катод) и нулевом (без электрода). Остальные параметры были одинаковыми для всех синтезов: давление 0,35 Па, $Ar:O_2 = 8:2$. Отжиг производился при атмосферном давлении и температуре 500 °C в атмосферах азота и воздуха в течение 2 ч. Полученные об-

© Зайцев О. В., Гареев Т. И., Смовж Д. В., 2025

разцы были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), спектрофотометрии (СФ), рентгенофазового анализа (РФА). По полученной спектральной зависимости коэффициента пропускания была определена ширина запрещенной зоны.

Анализ вольт-амперной характеристики магнетрона показал, что разряд магнетрона горит в области аномального тлеющего разряда. Результаты РФА показали, что пленки всех серий до отжига рентгеноаморфны, а после имеют фазу анатаза. По результатам СЭМ пленки, синтезированные с использованием анода (ПА), показали различия в морфологии, по сравнению с пленками, синтезированными с использованием катода (ПК) и без использования электрода (ПБЭ), что видно по снимкам СЭМ (рис. 1).

Полученные результаты свидетельствуют о меньшей плотности ПА, по сравнению с ПБЭ и ПК. Согласно литературе, данный эффект позволяет улучшать фотокаталитические свойства получаемых пленок [1]. Полученные режимы напыления титановых наноструктур могут быть применены для создания систем ядро – оболочка с использованием композитных металл-углеродных саж, полученных электродуговым методом.



а *б* *в*

Рис. 1. Снимки СЭМ пленок диоксида титана. *а* – ПА; *б* – ПБЭ; *в* – ПК

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00357 (https://rscf.ru/project/24-19-00357).

Список источников

1. Sato Y. et al. High rate deposition of photocatalytic TiO2 films by dc magnetron sputtering using a TiO2−x target // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2008. Vol. 26, N 4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА НА ПОДЛОЖКЕ КОМПОЗИТА ИЗ СМЕСИ ПОРОШКОВ Ti-Al-CuO

А. Г. Князева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
anna-knyazeva@mail.ru

Представлена двумерная модель управляемого синтеза композита из смеси порошков Ti-Al-CuO, в которой учитываются основные суммарные стадии химических реакций. Инициирование реакций и управление ими осуществляется лазерным излучением. При численном исследовании выявлен двухэтапный режим синтеза. Результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.

Синтез композитных покрытий и изделий в современных 3D-технологиях привлекает внимание в связи с возможностью сочетать в едином цикле особенности разных технологий – селективного лазерного плавления и СВС. Свойства получаемых при этом материалов в значительной степени зависят от структуры и фазового состава формируемого материала (которые определяются элементным и химическим составом исходного порошкового материала), состава окружающей среды и термических условий, зависящих от режимов лазерного воздействия. Известные в литературе модели поверхностной обработки и создания изделий в лазерных 3D-технологиях, как правило, не учитывают деталей физико-химических превращений. Попытки использовать для этой цели так называемый метод фазового поля представляют собой способ рисования, чем моделирование реального процесса. Наиболее подходящим для моделирования эволюции состава в этом случае является макрокинетический подход, учитывающий основные кинетические стадии. В настоящей работе этот подход используется для моделирования синтеза композита из смеси порошков Ti-Al-CuO, расположенной на подложке.

Смесь Ti-Al-CuO – типичный представитель экзотермических смесей, в которой возможны как реакции замещения (восстановления меди из оксида титаном и/или алюминием), так и реакции образования интерметаллидов. Все реакции экзотермические.

В отличие от систем вида [1] $Al+Cr2O_3+Ti$ и $Al+Fe_2O_3+N$, где возможны только по одной реакции восстановления хрома и железа алюминием, в нашей системе возможно образование по крайней мере двух оксидов TiO_2 и Al_2O_3. Кроме того, возможно частичное разложение оксида меди, начинающееся еще в твердой фазе. Редуцированная схема суммарных реакций в этой системе может быть представлена в виде

$$2CuO \rightarrow Cu_2O+O;$$

$$Ti+CuO+Cu_2O \rightarrow TiO_2+3Cu;$$

$$2Al+2CuO+Cu_2O \rightarrow Al_2O_3+4Cu;$$

$$Ti+Al+Cu \rightarrow M.$$

Последняя «реакция» дает сложный состав матрицы и при желании может быть конкретизирована.

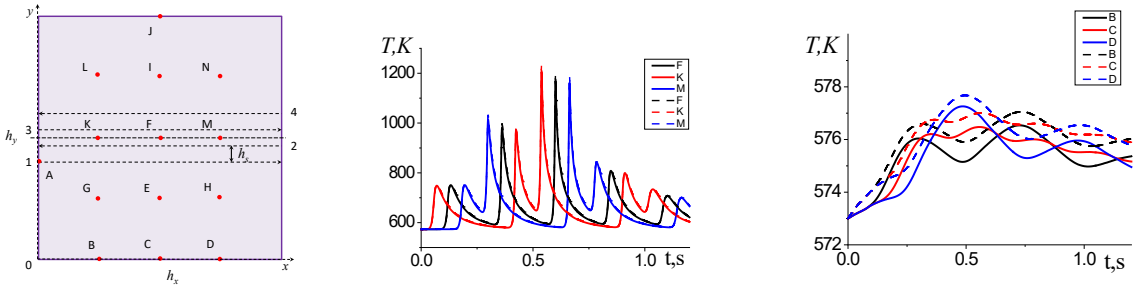
Двумерная математическая модель включает уравнение теплопроводности, осредненное по толщинам подложки и порошкового слоя, аналогично [2; 3]. Кинетиче-

© Князева А. Г., 2025

ски уравнения для компонентов учитывают их источники и стоки в реакциях. Скорости реакций зависят от температуры по закону Аррениуса, а от концентраций – в соответствии с законом действующих масс. При описании плавления вводится интервал температур, в котором изменяется доля жидкой фазы, что позволяет определять положение ванны расплава, двухфазной зоны и твердого материала. Гидродинамика возможного расплава в этом приближении не учитывается.

Сформулированная модель реализована численно.

Пример поведения температуры во времени для разных точек на поверхности плоского образца, показанных на рис. 1, *а*, представлен на рис. 1, *б*, *в*. В расчете не учитывались химические реакции. Если в точках, близких к траекториям движения лазера (пунктир на рис. 1, *а*), температуры порошковых слоев разных составов отличаются слабо (рис. 1, *б*), то вдали от этих траекторий вследствие разной теплопроводности составов различия более заметны (рис. 1, *в*).

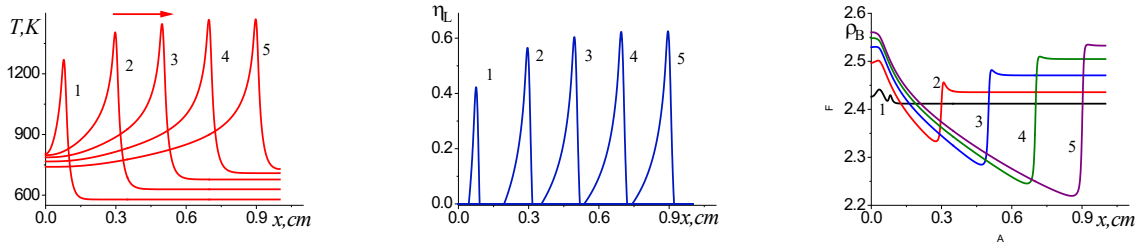


а *б* *в*

Рис. 1. Расчетная область (*а*) и зависимость температуры от времени (*б*, *в*) в выделенных точках для инертных материалов разного состава: *1* – сплошные линии; *2* – пунктир

При учете химических реакций картина становится более сложной.

Анализ результатов, полученных для разных начальных составов смеси и разных условий управления процессом с помощью лазера, позволил установить, что формирование состава происходит в два этапа. Сначала идет частичное разложение оксида меди, причем реакция опережает внешний источник тепла и быстро распространяется по предварительно нагретой поверхности. Затем – постепенное образование оксидов и матрицы. Поскольку нагрев неоднородный, в результате формируется неоднородный состав в слое, зависящий от скорости перемещения лазерного луча, ширины сканирования и мощности лазерного излучения. В связи с изменением состава, изменяются и свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность). Вследствие неоднородного температурного поля свойства изменяются также неоднородно (рис. 2).



а *б* *в*

Рис. 2. Динамика температуры (*а*), доли жидкой фазы (*б*) и эффективной плотности слоя, где идут химические реакции (*в*), для состава *1* и первого прохода лазерного луча

Получаемые численно результаты качественно согласуются с данными эксперимента [4] для тех же составов. Для получения однородного состава управляющие параметры должны быть оптимизированы.

Список источников

1. Knyazeva A. G., Kryukova O. N. The synthesis of composites with reinforcing particles on a thin substrate // Materials Physics and Mechanics. 2021. Vol. 47. Pp. 254–265.

2. Князева А. Г. Термомеханическая связанная модель синтеза покрытия на подложке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2024. № 1. С. 58–74.

3. Князева А. Г., Крюкова О. Н. Особенности инициирования подвижным источником энергии реакций в плоском слое, расположенном на подложке // Химическая физика и мезоскопия. 2024. Т. 26 (1). С. 5–21.

4. Knyazeva A. G., Krinitcyn M. G. Reaction initiation by laser in Ti-Al-CuO-powder mixture // Journal of SHS. 2025. N 1.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ КАРБИДОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Д. С. Никитин*, А. Насырбаев,
И. И. Шаненков, А. А. Сивков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** nikitindmsr@yandex.ru*

Различные сверхтвердые карбиды в наноразмерном состоянии, а также металломатричные композиты на их основе находят широкое применение в передовых инженерных приложениях, связанных с экстремальными механическими нагрузками и повышенными тепловыми потоками. В работе представлены результаты экспериментальных исследований в области плазмохимического синтеза карбидов и композитов на их основе. Рассматриваемый метод плазмодинамического синтеза базируется на применении плазмы дугового разряда. Метод является универсальным для получения различных типов функциональных и конструкционных материалов. Так, экспериментальная система с металлическими электродами позволяет производить металломатричные (медные или алюминиевые) композиты, армированные наночастицами сверхтвердых карбидов (SiC, WC, B_4C, TiC), с использованием подхода *in situ*, когда одновременно нарабатывается путем электроэрозии материал медной матрицы и происходит его армирование карбидным компонентов на микро- и наноуровне. Все указанные особенности применяемых технологий обеспечивают более высокий уровень физико-механических и теплофизических свойств конечного композиционного изделия, получаемого из синтезируемого порошка путем искрового плазменного спекания.

Наноразмерные сверхтвердые карбиды считаются одними из наиболее перспективных материалов, способных противостоять широкому спектру внешних воздействий, включая температурные, радиационные и механические нагрузки. К таким веществам относятся карбиды кремния, бора, вольфрама, титана и других переходных металлов IV и V групп, а также многокомпонентные и высокоэнтропийные карбидные соединения [1]. Эти материалы используются как в качестве самостоятельных функциональных веществ, так и в составе композиционных изделий.

Медь и алюминий на сегодня одни из наиболее важных металлов. Для повышения качества металлических изделий на их основе могут применяться композиты с металлической матрицей (metal matrix composites – MMCs), армированные частицами карбидов, что позволяет достичь высокой прочности, твердости и износостойкости изделия при сохранении хорошей пластичности, низкой плотности и коррозионной стойкости [2]. Однако высокая стоимость производства, сложности с сертификацией, несовершенство состава и структуры, а также сложный характер зависимости механических свойств от условий эксплуатации требуют поиска новых решений в области создания композитов [3]. В данной работе предложен инновационный подход к решению этих проблем, основанный на использовании нескольких методов.

Во-первых, разработан метод плазмодинамического синтеза, основанный на походе *in situ*, где процесс внедрения армирующих карбидных частиц в металлическую матрицу осуществляется непосредственно в ходе получения этих компонентов. Метод заключается в обработке исходных материалов высокоэнергетичной и высокоскоростной плазмой, создаваемой с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя, после чего материал подвергается распылению и кристаллизации в виде нано- и субмикронных частиц. Основной принцип разработанного метода армирования металлической матрицы карбидами представлен ниже (рис. 1).

© Никитин Д. С., Насырбаев А., Шаненков И. И., Сивков А. А., 2025

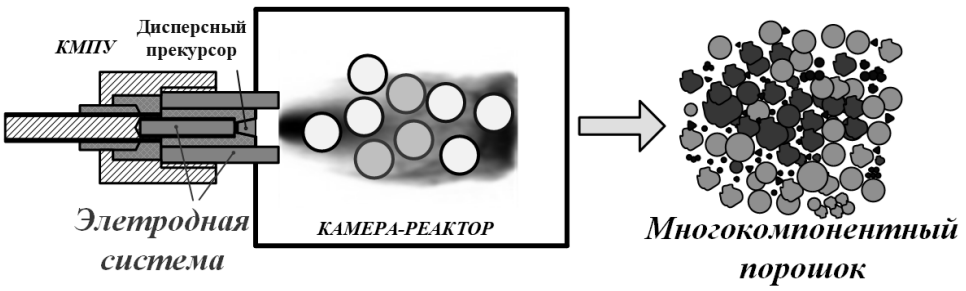


Рис. 1. Принципиальная схема получения дисперсного композита

Во-вторых, для формирования объемных образцов используется метод искрового плазменного спекания (SPS – spark plasma sintering), который считается одним из наиболее эффективных способов получения плотной бескислородной керамики. Выбор SPS обусловлен такими особенностями, как ускоренная кинетика спекания, сокращенное время цикла, пониженные температура процесса и общая потребляемая энергия, что чрезвычайно привлекательно с практической точки зрения. Это позволяет избежать значительной рекристаллизации зерен, достигнуть высокой степени уплотнения, в т. ч. для плохо спекаемых химических систем, преимущественно сохранить исходные состав и структуру продукта и проявить уникальные особенности дисперсного материала в объемном изделии.

Все указанные особенности применяемых технологий обеспечивают более высокий уровень физико-механических и теплофизических свойств конечного композиционного материала. Так, уникальная структура получаемых порошковых материалов в системах Al-WC/Al-SiC/Al-B_4C стала ключевым фактором в достижении высокой степени уплотнения (до 99 %) и улучшенных физико-механических свойств (103–215 HV) объемных изделий в сравнении со стандартными объемными образцами (47–62 HV). Для металломатричных материалов на основе меди, армированных WC, B_4C или TiC, положительный эффект от использования процесса *in-situ* проявляется в том, что из синтезированных порошков формируются изделия с более высокоплотной структурой (до 84–95 %) за счет предварительного сцепления в плазменном процессе материалов матрицы и армирующего компонента. Образующаяся уникальная структура непосредственным образом обуславливает повышенные механические и теплофизические свойства конечных изделий Cu-MMCs (92–131 HV, 152 W/m·K).

Результаты исследования могут быть актуальны в технологиях порошковой металлургии при получении металломатричных композитов в качестве конструкционных элементов, в т. ч. для авиакосмической и автомобильной сфер. Применение указанных принципов в производстве способно повысить надежность изготовляемых композиционных элементов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-73-01203 (https://rscf.ru/project/23-73-01203).

Список источников

1. Rasaki S. A. et al. Synthesis and application of nano-structured metal nitrides and carbides: A review // Progress in Solid State Chemistry. 2018. Vol. 50. Pp. 1–15.

2. Kotteda T. K. et al. Metal matrix nanocomposites: future scope in the fabrication and machining techniques // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Pp. 1–19.

3. Sharma D. K., Mahant D., Upadhyay G. Manufacturing of metal matrix composites: A state of review // Mater. Today Proc. 2020. Vol. 26. Pp. 506–519.

СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ CVD-ГРАФЕНА И ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ САЖИ

А. И. Богомолова[1, 2*], Д. В. Смовж[2], А. Г. Баннов[3]

[1]Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
[3]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20
** a.bogomolova1@g.nsu.ru*

Представлен способ улучшения газочувствительности CVD-графена, основанный на модификации поверхности графена электродуговой сажей с металлическими добавками Al, Mn и Sn. Функционализированные графеновые газовые датчики обладают потенциалом для создания портативных устройств, которые могут быть интегрированы в различные устройства микроэлектроники.

Графен – двумерный материал, состоящий из моноатомного слоя углерода. Благодаря структуре, а также выдающимся тепло- и электропроводящим свойствам, графен имеет широкие перспективы в области сенсорных технологий [1]. Принцип работы сенсоров основан на взаимодействии сенсорных матриц с веществом и последующем изменении проводящих, емкостных, оптических свойств этих матриц. Основными требованиями к таким системам являются высокая чувствительность, селективность и быстрое время реагирования на изменение концентрации газов в окружающей среде. Идеальный графеновый слой характеризуется низкой поглощательной способностью, однако присутствие примесей на поверхности и структурные дефекты могут существенно изменять энергию взаимодействия с газовыми молекулами, меняя его сенсорные характеристики [2]. Одним из возможных вариантов является модификация графена газочувствительной углеродной сажей, что способно повысить его чувствительность, селективность в определении наличия опасных газов, таких как NO_2 в атмосфере [3].

В этой работе исследуются свойства композитов на основе CVD-графена и углеродной сажи. Были определены газочувствительные свойства композитов в реакции с NO_2. Для анализа полученных материалов получены спектры дифракции рентгеновского излучения и комбинационного рассеяния света, а также изображения поверхности с использованием SEM.

Синтез графена проводился методом термического осаждения из газовой фазы. В качестве подложек для графеновых чипов использовались монокристаллические пластины кремния толщиной 300 микрон и ориентацией 100 с естественным оксидным слоем 5 нм. Перенос графена, выращенного на медной подложке, производился через жидкость, травление подложки – в персульфате аммония ($(NH_4)_2S_2O_8$ с концентрацией 0,044 г/моль). Нанесение контактов на графеновый чип производилось методом магнетронного напыления, с использованием маски, последовательно наносились слои титана 1 нм и меди 200 нм. Электродуговой синтез сажи осуществлялся в среде гелия при давлении 25 торр, при токе разряда 100 А. В качестве распыляемого анода использовался графитовый стержень (чистота 99,99, плотность 1,8 г/см^3) диаметром 7 мм. При синтезе композитов в аноде изготавливали отверстие по оси (диаметр 4,2 мм), которое заполнялось металл-графитовым порошком в за-

© Богомолова А. И., Смовж Д. В., Баннов А. Г., 2025

данном весовом соотношении. Пленки сажи получали методом аэрозольного напыления электродуговой сажи на графеновый чип. Использовался аэрограф HD-119. Суспензия из 10 мг сажи и 10 мл этилового спирта диспергировалась в ультразвуковой ванне УЗВ3/200 мощностью 85 Вт при частоте 22 кГц в течение 20 минут. Пленка, частично покрывавшая медные контакты, наносилась на предварительно разогретую до 60 °С подложку с использованием маски.

Сенсорные свойства полученных датчиков исследовались на установке [4]. Установка включает в себя линии для подачи газа-носителя (синтетический воздух; смесь 21 об. % O_2, 79 об. % N_2) и аналита (смесь NO_2-синтетический воздух). Концентрация аналита в системе достигалась путем регулирования отношения расходов потоков газов. Газовый сенсор помещали в герметичную пластиковую камеру. Сопротивление сенсора измеряли по двухточечному методу между двумя электродами при комнатной температуре (25 ± 2 °С). Относительная влажность воздуха – 2 ± 0,5 %. Вначале проводилась запись базовой линии сенсорного отклика в течение 30 мин при продуве синтетического воздуха. Базовая линия аппроксимировалась линейной функцией R(τ) и вычиталась из относительной чувствительности. После съемки базовой линии 10-минутными циклами подавался аналит, с 10-минутными циклами продувки воздухом.

Исследования сенсорных свойств графен-сажевых композитов проводились на смесях синтетического воздуха с содержанием 10–40 ppm диоксида азота. Датчики на основе CVD-графена обладают малыми откликами по сравнению с электродуговыми композитами, но демонстрируют более высокие скорости насыщения и восстановления. Наличие графенового подслоя увеличивает максимальную чувствительность композитного датчика с 4 до 39 % при 10 ppm NO_2. Использовалась чистая углеродная сажа и композиты, содержащие 6 масс.% наночастиц металла (Mn, Sn, Al). Показано, что сенсорный отклик ΔR для композитов графен-сажа достигает 50 % и зависит от типа наночастиц в сажевом композите (рис. 1). Полученные графен-сажевые композиты имеют низкое сопротивление, соответствующее сопротивлению графена и высокий отклик, соответствующий электродуговой саже.

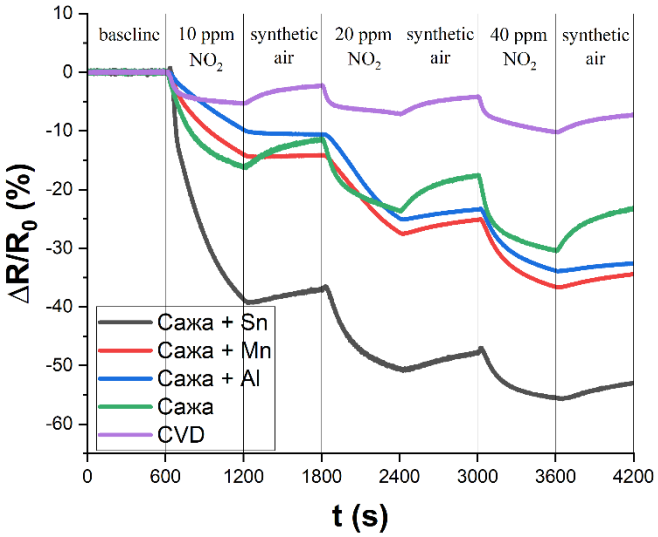


Рис. 1. Резистативный отклик композитов графен-сажа к NO_2
(температура окружающей среды 25 ± 2 °С, относительная влажность 2 ± 0,5 %)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00357 (https://rscf.ru/project/24-19-00357).

Список источников

1. Varghese S. S. et al. Recent advances in graphene based gas sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2015. Vol. 218. Pp. 160–183.

2. Tian W., Liu X., Yu W. Research progress of gas sensor based on graphene and its derivatives: A review // Applied Sciences. 2018. Vol. 8 (7). P. 1118.

3. Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots / ed. A.L. Rogach. NewYork: Springer WienNewYork, 2018. 372 p.

4. Bannov A. G. et al. Room-temperature NO_2 gas sensors based on granulated carbon nanofiber material // Chemosensors. 2022. Vol. 10 (12). P. 525.

ОБРАЗОВАНИЕ ФРОНТА РЕАКЦИИ ПРИ ТЕПЛОВОЙ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ КАРБОНАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Савин[1*], А. А. Моисеев[1], В. Л. Уголков[2]

[1]Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1
[2]Институт химии силикатов имени И. В. Гребенщикова РАН
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, наб. Адм. Макарова, д. 2
** savin_av@voenmeh.ru*

Исследуются теплофизические процессы декарбонизации природных карбонатных материалов (известняков, магнезитов). Установлено, что при интенсивном одностороннем подводе тепла образуется локализованная реакционная зона – фронт декарбонизации. Предложена математическая модель, описывающая образование фронта и критерии подобия, определяющие условия его формирования. Разработана методика экспериментального исследования карбонатных материалов на основе термогравиметрического анализа, результатом которой являются параметры кинетики декарбонизации в терминах скорости движения фронта реакции. Полученные результаты позволяют усовершенствовать методики численного моделирования, используемые для прогнозных расчетов процессов декарбонизации природных карбонатов.

Рассматриваются процессы, развивающиеся в зоне декарбонизации внутри карбонатного материала при одностороннем подводе тепла, включающие образование локализованной зоны активной декарбонизации. Необходимо корректно определить зависимость скорости фронта декарбонизации от температуры, которая используется в моделях типа [1] с локализованным фронтом. В литературе имеется информация по этому поводу [2], однако нет данных о том, в каких пределах может изменяться скорость декарбонизации для различных карбонатных материалов. Поскольку процесс декарбонизации сильно эндотермичен, даже небольшие погрешности в определении скорости фронта могут приводить к существенным изменениям в температурных полях и в итоге – к ошибкам в оценке времени декарбонизации. Возникают две связанных между собой задачи: определение условий, при которых можно использовать упрощенное представление о существовании поверхности фронта декарбонизации и разработка экспериментальной методики, позволяющей определить зависимость скорости фронта от температуры для любого карбонатного материала.

В качестве основы для экспериментальной методики использован метод термогравиметрических измерений [2], дающий информацию о локальном темпе декарбонизации самого карбонатного материала.

Измерения были выполнены с помощью установки комплексного термического анализа STA 429 CD фирмы NETZSCH (Германия). Скорость изменения температуры составляла dT/dt = 20°C/мин в интервале от 40 до 1100 °C и от 1100 до 400 °C. Типичная масса образцов – 20 мг. Для удаления газообразных продуктов разложения карбоната измерения проводились в динамической атмосфере воздуха (расход воздуха 50 см^3/мин).

Предполагается, что степень декарбонизации образца описывается уравнением:

$$\frac{dz}{dt} = w(T)(1 - z).$$

© Савин А. В., Моисеев А. А., Уголков В. Л., 2025

Пусть температурная зависимость скорости декарбонизации соответствует модели Аррениуса:

$$w(T) = A\left(\frac{T}{T_n}\right)^m exp\left(-\frac{T_0}{T}\right),$$

где T_n, T_0 – «нормальная» температура и температура активации.

Параметры модели Аррениуса подобраны методом наименьших квадратов по экспериментальным данным термогравиметрического анализа:

$$A = 3{,}0 \cdot 10^7 c^{-1};\ m = 1{,}5;\ \ T_0 = 2{,}44 \cdot 10^4\ K. \tag{1}$$

Конкретные значения этих параметров, видимо, специфичны для обжигаемого материала и не должны зависеть от формы образца. Однако, для того чтобы использовать параметры локальной кинетики декарбонизации материала (1) в моделях декарбонизации макроскопических гранул типа [1], необходимо разработать методику расчета параметров кинетики в терминах зависимости скорости движения фронта от температуры.

Уравнения, описывающие квазистационарную волну декарбонизации, связанную с тепловой волной:

$$\begin{gathered}\frac{d}{dx}\lambda y = -\rho c u y + \kappa w(T)(1-z)(\rho - \rho_\infty);\\ \frac{dT}{dx} = y;\\ -u\frac{dz}{dx} = w(T)(1-z),\end{gathered} \tag{2}$$

где u – скорость волны относительно материала, $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, $\rho(z)$ – плотность, ρ_∞ – плотность полностью декарбонизированного материала ($z = 1$), $\kappa(T)$ – удельная теплота декарбонизации.

Физически начальные условия для (2) заданы только при $x \to -\infty$. Однако с использованием асимптотического решения начальные условия можно поставить в любой конечной точке x_b, далекой от зоны декарбонизации, что обеспечивается достаточно малой задаваемой начальной температурой. При этом:

$$\begin{gathered}T(x = x_b) \equiv T_b = T_{-\infty} - \frac{\lambda}{\rho c u} y_b;\\ y(x = x_b) \equiv y_b;\\ z(x = x_b) = 0.\end{gathered} \tag{3}$$

Реальными параметрами задачи, определяющими вид решения уравнений (2), являются только исходная температура материала $T_{-\infty}$ и скорость волны u. Решая численно уравнения (2) с начальными условиями (3) при заданных параметрах скорости реакции (1) и различных значениях скорости волны u, можно исследовать распределение параметров в области волны декарбонизации конкретного карбонатного материала. Варьируя скорость тепловой волны и получая решения уравнений (2), можно построить зависимости скорости фронта и его ширины от температуры во фронте. Результаты моделирования показывают, что при увеличении температуры фронта примерно на 200° ширина фронта уменьшается на порядок, причем эта закономерность работает в широком диапазоне температур. Аппроксимация Аррениуса для скорости фронта

$$u(T_f) = A\left(\frac{T}{T_n}\right)^m exp\left(-\frac{T_0}{T}\right)$$

хорошо работает в широком диапазоне температур с параметрами:

$$A = 5{,}68 \cdot 10^5 \frac{\text{мкм}}{\text{с}};\ \ m = 1{,}5;\ \ T_0 = 1{,}32 \cdot 10^4\ K.$$

Результаты моделирования обобщаются с использованием двух параметров подобия: безразмерной ширины фронта и безразмерной теплоты декарбонизации:

$$\overline{\Delta_f} \equiv \frac{\rho_m c_m u \Delta_f}{\lambda_m};\ \bar{\kappa} \equiv \frac{\kappa(T_f)}{c_m(T_f - T_{-\infty})},$$

где T_f – температура фронта.

Список источников

1. Савин А. В., Моисеев А. А., Смирнов П. Г. Моделирование динамики обжига одиночной гранулы природного карбонатного минерала. ИФЖ. 2017. Т. 90, № 1. С. 64–72.

2. Шестак Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ. М. : Мир, 1987. 456 с.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

А. В. Савин[1, 2*], П. Г. Смирнов[2], А. А. Моисеев[2], Г. Т. Джгамадзе[1, 2]

[1] Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1
[2]АО «Лазерные системы»
198515, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
пос. Стрельна, ул. Связи, д. 28, корп. 2, стр. 1
** savin_av@voenmeh.ru*

Исследуются процессы при взаимодействии лазерного излучения с металлическим порошком в технологии SLM. На основе результатов численного моделирования установлено влияние сил на динамику течения. Проведено моделирование с измененной формой пятна лазерного излучения. Установлено, что двухлучевое пятно может повысить производительность установок SLM.

Рассматриваются процессы селективного лазерного сплавления, возникающие при взаимодействии излучения с металлическим порошком в ванне плавления: теплопередача (конвективная, кондуктивная, лучистая), фазовые переходы, вынужденная конвекция жидкого расплава, вызванная силами поверхностного натяжения, Марангони, паров металла и тяжестью. Математическая модель описывается системой гидродинамики сплошной среды с переменными свойствами. Численная модель реализована в пакете Ansys Fluent с использованием пользовательских функций. Для моделирования динамики течения традиционно используется подход VOF (Volume of Fluid) [1], для моделирования вылета частиц используется подход DPM (Discrete phase model). Подробное описание модели приведено в работах [2; 3].

Результаты численного моделирования показывают влияние сил на динамику течения расплавленного металла (рис. 1). Видно, что векторы скорости в центре пятна направлены вниз, происходит углубление ванны за счет влияния реактивной силы паров металла и силы Марангони, вызванной градиентом поверхностного натяжения. Также видно, что температурное поле относительно центра пятна несимметричное в связи с плохой теплопроводностью порошка по сравнению со сплошным материалом. Размер ванны плавления зависит от диаметра пятна, распределения интенсивности излучения и скорости сканирования. При малой скорости сканирования наблюдается более круглая область расплавленного металла, при увеличении скорости форма становится вытянутой в сторону, противоположную движению пучка.

Повышение производительности установок SLM может быть реализовано в том числе и модификацией источника излучения. Проведено моделирование двухлучевого пятна, включающего центральное пятно с типовыми параметрами и кольцевое пятно (рис. 2), радиус которого в 4,5 раза больше, а мощность увеличена в два раза.

В результате сравнения (рис. 3, табл. 1) установлено существенное увеличение ширина (размер «А») ванны плавления, что позволяет увеличить интервал между проходами лазерного излучения.

© Савин А. В., Смирнов П. Г., Моисеев А. А., Джгамадзе Г. Т., 2025

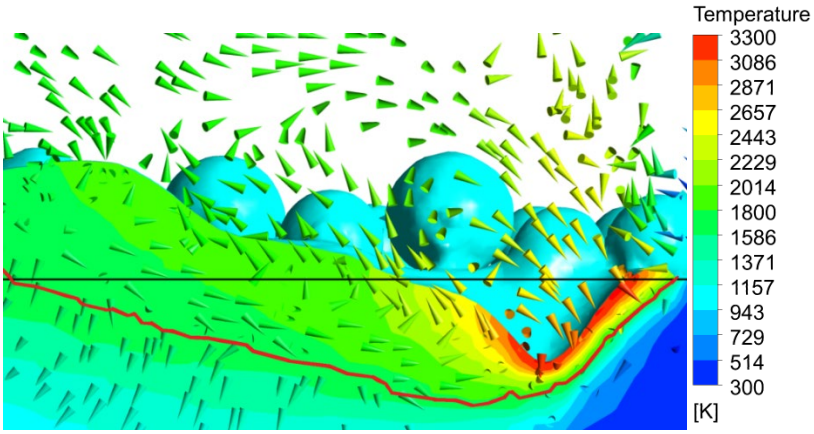


Рис. 1. Сечение вдоль траектории движения лазерного излучения. Черная сплошная линия – граница слоя порошка и подложки, красная сплошная линия – граница жидкой и твердой фазы. Размер векторов скорости фиксированный, в твердой фазе скорость равна нулю, в центре пятна 47 м/с

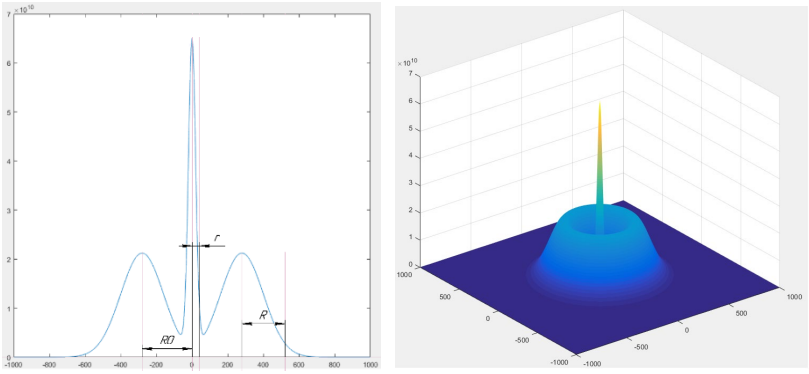


Рис. 2. Форма модифицированного пятна

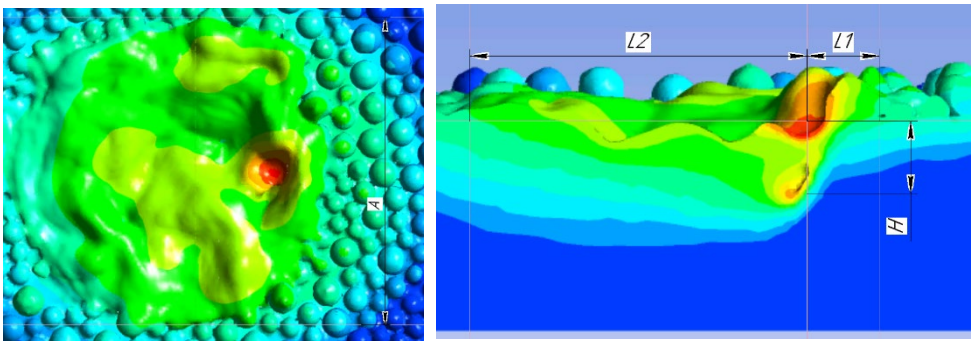


Рис. 3. Вид сверху и сечение вдольтраектрориии движения для двухлучевого пятна

Таблица 1

Сравнительный анализ геометрических размеров ванн плавления для двух случаев

Размеры (рис. 3)	A	H	L2	L1
1. Типовое пятно	93,22 мкм	45,19 мкм	223,55 мкм	42,63 мкм
2. Двухлучевое пятно	490,14 мкм	75,02 мкм	356,16 мкм	76,59 мкм
Отношение «2»/«1»	5,26	1,66	1,59	1,80

При выбранных параметрах моделирования наблюдаются интенсивные колебания внутри ванны. В связи с ростом глубины зоны проплавления образуется

газовые пустоты, может возникнуть нежелательный режим keyhole. Двухлучевой лазер обеспечивает преднагрев нижнего слоя и области вокруг центрального пятна, что позволяет увеличить скорость сканирования излучения.

Список источников

1. Zhihao Ren, David Z. Zhang, Guang Fu, Junjie Jiang, Miao Zhao. High-fidelity modelling of selective laser melting copper alloy: Laser reflection behavior and thermal-fluid dynamics // Materials & Design. 2021. Vol. 207, N 4.

2. Борейшо А. С., Джгамадзе Г. Т., Моисеев А. А., Савин А. В., Смирнов П. Г. Многоуровневое моделирование рабочих процессов селективного лазерного сплавления // Фотоника. 2022. Т. 16, № 3. С. 212–219.

3. Борейшо А. С., Джгамадзе Г. Т., Зыбина В. В., Моисеев А. А., Савина А. В., Смирнов П. Г., Смоленцев С. С., Тимофеев В. А., Третьяк П. С. Микроуровневое моделирование теплофизических и гидродинамических процессов селективного лазерного сплавления // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 1. С. 108–114.

Секция 11
Современные методы теплофизического эксперимента

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДА НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ВЕРХОВОЙ С УЧЕТОМ ВЕТРА

М. В. Агафонцев[1], Т. А. Белькова[2], Д. П. Касымов[1], В. А. Перминов[2*]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 36
[2]Томский политехнический университет
630050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
** perminov@tpu.ru*

Представлена математическая модель низового лесного пожара, распространяющегося по напочвенному покрову, который при определенных условиях может переходить в верховой. Верховой лесной пожар распространяется по кронам деревьев со значительно большей скоростью, чем низовой, и поэтому экологически более опасен. Достаточно часто реализуется ситуация, когда распространяется низовой лесной пожар, имеющий конечную ширину фронта и достаточно большую длину, которую можно считать бесконечной. При этом в пологе леса имеется ветер. Получены распределения температуры и тепловых потоков в очаге горения и на нижней границе полога леса с течением времени. Результаты экспериментальных исследований подтвердили полученные зависимости условий перехода низового лесного пожара в верховой при заданных типичных характеристиках для соснового леса.

Природные пожары происходят по всему миру и приводят не только к огромным экономическим затратам, но также угрожают здоровью и жизни человека, уничтожают лесную растительность и биомассу, что влечет значительную эрозию почв под воздействием воды и ветра. Ежегодно на нашей планете регистрируется до 7,5 млн пожаров. Проблема лесных пожаров остается острой для многих стран, так как с каждым годом площади и количество пожаров только возрастают. По оценкам специалистов, экономические потери от лесных пожаров в округе Лос-Анджелес составили от 135 млрд до 150 млрд долларов, что делает это стихийное бедствие одним из самых дорогостоящих в современной истории США.

Известно, что в реальных условиях возникновение лесного пожара может быть вызвано разнообразными источниками [1]. Наиболее опасным видом пожаров являются верховые. Основные механизмы возникновения различных видов пожаров в лесных массивах до конца не определены. Экспериментальное изучение перехода низового лесного пожара в верховой затруднено, поскольку это связано со значительными материально-техническими затратами и внешними климатическими условиями. В связи с этим в большинстве случаев исследования проводятся с использованием лабораторного оборудования с некоторыми допущениями, позволяющими частично смоделировать условия возникновения и распространения природных пожаров [2].

В настоящей работе приводится комплексный теоретико-экспериментальный подход, в рамках которого данные, полученные с помощью методов математического моделирования, будут сравниваться с результатами наблюдений последствий или результатами экспериментальных исследований. Результаты могут быть использованы при построении новых моделей и создании методик прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами и их воздействием на окружающую среду, атмосферу, населенные пункты, автодороги, сельхозугодия и другие объекты.

На рис. 1 приведена фотография экспериментальной площадки.

© Агафонцев М. В., Белькова Т. А., Касымов Д. П., Перминов В. А., 2025

Рис. 1. Экспериментальная площадка

Постановка задачи, система уравнений, а также основные допущения рассматриваемой математической модели представлены в работе [3]. Особо стоит отметить, что в данной постановке считалось, что:

1) течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным;

2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука;

3) полог леса рассматривался недеформируемой средой, который можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой.

Рассматривался так называемый продуваемый лесной массив, когда объемной долей конденсированной фазы лесных горючих материалов, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения. Для описания переноса энергии излучением используется диффузионное приближение. Считалось, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии.

В результате проводились численные расчеты по определению картины процесса зажигания полога леса от очага низового лесного пожара. На основе результатов, полученных в данных расчетах, было проведено сравнение угла отклонения факела пламени при зажигании полога леса для различных скоростей ветра. Также результаты расчетов для различных значений толщины напочвенного покрова показали, что критическое расстояние от напочвенного покрова до полога леса, на котором происходит воспламенение кроны, увеличивается с ростом толщины слоя. Это объясняется тем, что для создания очага низового лесного пожара, способного обеспечить зажигание полога леса, необходимо достаточное количество лесных горючих материалов в напочвенном покрове. С ростом высоты слоя в напочвенном покрове увеличивается и количество энергии, которое выделяется с единицы поверхности очага низового лесного пожара и поступает на нижнюю границу полога леса. Следовательно, критическое расстояние до полога леса, на котором возможно воспламенение кроны деревьев, увеличивается. Однако из-за влияния ветра оно несколько уменьшается. Следует отметить, что данные результаты качественно и количественно согласуются с результатами тестовых экспериментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 24-21-00069.

Список источников

1. Гришин А. М., Долгов А. А., Зима В. П., Крючков Д. А., Рейно В. В., Субботин А. Н., Цвык Р. Ш. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов / ФГВ. 1989. Т. 34 (6). С. 14–22.

2. Гришин А. М., Зима В. П., Кузнецов В. Т., Лобода Е. Л., Фильков А. И. Комплекс экспериментальных установок для исследования природных пожаров // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т. 52, № 2 (2). С. 84–89.

3. Perminov V. A., Marzaeva V. I. Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread in the Presence of Fire Breaks and Barriers of Finite Size // Combust Explos Shock Waves. 2020. Vol. 56. Pp. 332–343. DOI: 10.1134/S0010508220030107.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ПОДОГРЕВА В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ

С. В. Веретенников, Д. А. Бумагин

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева
152934, Российская Федерация, Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

Газотурбинные установки (ГТУ) работают в разных регионах России, где погодные условия могут быть опасными для входных частей энергоустановок из-за возможного обледенения конструктивных элементов. Это может привести к поломке всего осевого компрессора. Вопрос надежной защиты входных частей ГТУ от обледенения представляет большой интерес для наземных энергетических машин, которые используются в различных отраслях энергетики России.

Одним из методов борьбы с обледенением, использующим подогрев элементов газотурбинных установок, является система, основанная на эффекте Ранка – Хилша. Этот эффект заключается в разделении потока газа на две части: горячую и холодную. В данной системе вихревая труба устанавливается в лопатку входного направляющего аппарата компрессора. Это позволяет дополнительно подогреть поверхность лопатки на 60–70 °С. Однако существующие исследования вихревых труб не предоставляют полной информации о влиянии длины камеры энергоразделения на эффект подогрева, и это затрудняет эффективное проектирование таких систем.

Цель исследования – определить зависимость эффекта подогрева от длины камеры энергоразделения. Для этого были созданы корпусные элементы вихревой трубы с помощью технологий 3D-печати. Камера энергоразделения была теплоизолирована минеральной ватой для обеспечения условий адиабатности.

Для сравнения различных вариантов длины камеры энергоразделения экспериментальные исследования проведены при различных значения относительного давления на входе π и относительной доле охлажденного потока μ, равной отношению расхода на выходе охлажденного потока к расходу на входе в модель. При давлении на входе 0,4 МПа видна существенная разница между трубами длиной 6, 9 и 12 калибров: наибольшее снижение эффективности подогрева наблюдается для вихревой трубы с 6-калибровой камерой энергоразделения. Для труб с камерами энергоразделения 9 и 12 калибров разница составляет не более одного 1 °С, что сопоставимо с погрешностью измерения термопары. Эффекты подогрева при разных длинах камеры энергоразделения (давление на входе 0,4 МПа). Полученные данные несколько расходятся с традиционной теорией вихревых труб, согласно которой эффекты энергоразделения монотонно растут с увеличением длины камеры энергоразделения. В области наиболее эффективных режимов подогрева, которая ранее детально не исследовалась, наблюдается изменение трендов по эффектам энергоразделения. Замечено снижение эффектов подогрева на 9-калибровой вихревой трубе. Данная ситуация требует дополнительного изучения и прояснения.

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что наибольшие эффекты подогрева при $\pi \leq 2$ получаются на 9-калибровой вихревой трубе с установленным раскручивающим устройством. При $\pi > 2$ наибольшие эффекты подогрева выходят на 12-калибровой вихревой трубе с установленным раскручивающим устройством в виде пластины. Проведено сравнение количества теплоты, подводимой от подогретого потока к камере энергоразделения от ее длины, при различных π и μ Тепловая мощность вихревой трубы при разных длинах камеры энергоразделения (давление на входе 0,4 МПа) по полученным данным можно сделать вывод, что максималь-

© Веретенников С. В., Бумагин Д. А., 2025

ный теплосъем происходит при камере энергоразделения длиной 12 калибров, $\pi = 4$ и $\mu = 0{,}95$.

При сравнении полученных результатов экспериментальных исследований видна прямая зависимость теплового эффекта от длины камеры энергоразделения. Также надо отметить, что при различных значениях относительного давления на входе π, оптимальная длина камеры энергоразделения изменяется. Это связано с особенностями течения закрученного потока. Выявленная закономерность заключается в том, что при значениях $\pi \leq 2$ наибольшей эффективностью обладает вихревая труба с камерой энергоразделения длиной 9 калибров. При $\pi > 2$ наибольшей эффективностью обладает вихревая труба с камерой энергоразделения длиной 12 калибров.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Список источников

1. Михайлов В. Е. Предотвращение обледенения элементов воздухозаборного тракта ГТУ энергетических ПГУ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 9–10. С. 3–12.

2. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А. И. Леонтьева. М. : УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Захаренков, А. Т. Комов,
Д. А. Тупотилов*, П. А. Тупотилов, Т. Н. Абсатаров

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
** TupotilovDA@mpei.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена на рабочем участке с модифицированной электронным пучком поверхности в условиях одностороннего нагрева тепловыми нагрузками порядка нескольких МВт/м^2 и ее охлаждения диспергированным потоком теплоносителя. Приведено краткое описание установки, гидравлического контура и рабочего участка. Получены экспериментальные данные по температуре мишени, показано влияние расхода компонентов теплоносителя на изменение температуры мишени, выполнена оценка плотности теплового потока, воспринимаемого мишенью.

Развитие современной электроники и энергетики сделало типы охлаждения с использованием фазового перехода одним из приоритетных направлений в современной теплофизике. Интенсификация теплообмена с фазовым переходом (или теплообмена при кипении) может быть достигнута несколькими способами, некоторые из которых можно успешно совмещать для получения лучших результатов. Одним из самых эффективных методов можно назвать модификацию теплообменных поверхностей для получения на них различных развитых структур [1]. Модификация поверхностей сочетается с охлаждением поверхностей диспергированным потоком – методом, который способен обеспечивать высокую эффективность теплоотдачи [2].

Охлаждение модифицированных поверхностей диспергированным потоком сочетает сложную физику взаимодействия капель потока с поверхностью и механизмы кипения на структурах различного масштаба, что делает эту тему особенно актуальной для экспериментального исследования. Одной из перспективных методик модификации поверхности, которая, однако, мало изучалась, в случае диспергированного охлаждения является электролучевая обработка поверхности. В результате использования такого метода обработки на поверхности происходит оплавление и частичное испарение материала. Данная технология позволяет создавать разнообразные формы на поверхности изделий высотой до нескольких миллиметров и за несколько секунд. Высота вершин H и глубина впадин h зависят от мощности электронного луча, теплофизических свойств обрабатываемой поверхности, скорости движения луча, количества проходов и типа траектории [3]. Также актуальным вопросом для тематики распылительного охлаждения остается экспериментальная оценка различных теплообменных характеристик.

Исследования теплообмена проводились на установке «Односторонний нагрев мишени» кафедры ОФиЯС НИУ «МЭИ». Экспериментальная установка представляет собой герметичную вакуумную камеру с размещенной в ней рабочим участком, представляющим собой медную цилиндрическую мишень. Моделирование тепловых нагрузок порядка нескольких **мегаватт на квадратный метр** (МВт/м^2) выполнялось сканирующим пучком электронов, создаваемым электронно-лучевой пушкой ЭЛП производства компании «ТЭТА» мощностью 60 кВт. Охлаждение медной мишени осуществлялось газожидкостным потоком теплоносителя, создаваемым форсункой пневматического типа.

© Захаренков А. В., Комов А. Т., Тупотилов Д. А., Тупотилов П. А., Абсатаров Т. Н., 2025

Для охлаждения мишени ранее была создана система охлаждения с возможностью удаленного подключения (рис. 1).

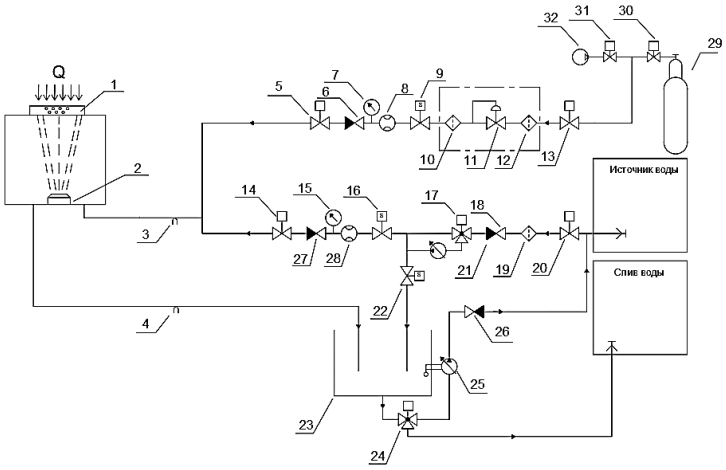


Рис. 1. Принципиальная схема контура охлаждения: *1* – рабочий участок; *2* – форсунка; *3* – термопара на входе в РУ; *4* – термопара на выходе из РУ; *5*, *13*, *14*, *20*, *30*, *31* – 2-линейный клапан с электрическим управлением; *6*, *18*, *26*, *27* – обратный клапан; *7*, *15* – манометр; *8*, *28* – расходомер; *9*, *16* – регулятор потока с электрическим управлением; *10* – фильтр тонкой очистки; *11* – редуктор; *12*, *19* – фильтр грубой очистки; *17*, *24* – 3-линейный клапан с прямым электрическим управлением; *21* – насос регулируемый; *22* – регулятор потока с электрическим управлением; 25 – регулируемый насос с поплавковым управлением; *23* – сепаратор; *29* – баллон с газом; *32* – компрессор

В рамках эксперимента были получены температурные поля мишени для различных параметров компонентов дисперсного потока теплоносителя, а также зависимость плотности теплового потока от показаний термопары T_1 в центральном сечении мишени для одного из режимов (рис. 2).

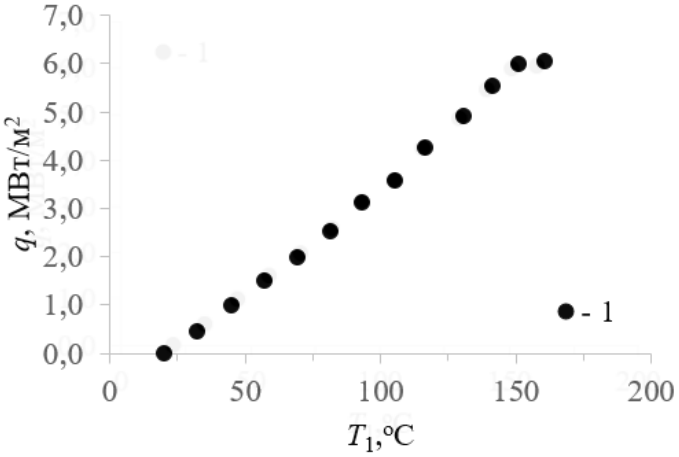


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от показаний термопары № 1 в центральном сечении мишени

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, соглашение № 23-19-00476.

Список источников

1. Huddle J. J., Chow L. C., Lei, S., Marcos A., Rini D. P., Lindauer S. J., Bass M. and Delfyett P. J. 2000 “Thermal Management of Diode Laser Arrays,” Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No.00CH37068), San Jose, CA, Mar. 23, pp. 154–160.

2. Bar-Cohen A., Maurer J. J. and Felbinger J. G. 2013 “DARPA’s Intra/ Interchip Enhanced Cooling (ICECOOL) Program,” International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, (CS MANTECH 2013), New Orlens, LA, May 13–16, pp. 171–174.

3. Xiong W., Blackman B. et al. The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surfi-sculpt, Compos. Struct. 134 (2015) 587–592.

МЕТОД ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Р. Р. Кабиров[1], И. Ш. Хабриев[1*], В. Ф. Хайрутдинов[1], И. Р. Габитов[1], И. М. Абдулагатов[2]

[1] Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, д. 68
[2]Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики –
филиал Объединенного института высоких температур РАН
367030, Российская Федерация, Махачкала, пр. И. Шамиля, д. 39а
** termi0@yandex.ru*

Работа посвящена методам исследования теплопроводности, в частности методу импульсного нагрева. Описана классификация методов исследования теплопроводности, их преимущества и недостатки. Приведена обобщенная информация о зондах, применяемых в экспериментальных установках метода импульсного нагрева, а также описание зонда, использованного в реализованной установке. Представлены экспериментальные исследования теплопроводности композитных материалов на основе стеклянных, керамических и полистирольных микросфер, а также стекловолокна, связанных стиролакриловой эмульсией. Измеренные значения теплопроводности находятся в диапазоне от 0,0581 до 0,0905 Вт/(м·К) с погрешностью 2,5 %.

Возросшая потребность промышленности и науки к объему и точности данных о теплофизических свойствах технически важных веществ и материалов требует создания высокопроизводительных прецизионных методов комплексного измерения свойств.

Метод импульсно нагреваемого зонда обеспечивает высокоскоростные измерения теплофизических свойств (ТФС) в течение одного импульса нагрева зонда (длительностью от сотых долей до десятков секунд); большую производительность и прецизионность (неопределенность около 1 %); проведение измерений в условиях, недоступных для стационарных методов (динамические процессы, химические реакции, фазовые переходы, в т. ч. в околокритической области параметров состояния); комплексность исследования – возможность в течение одного импульса нагрева измерить λ, а, χ, ν; миниатюризацию измерительных ячеек и установок, что позволяет измерять ТФС предельно малых (до 1 см^3) объемов вещества. При использовании данного метода с указанным устройством отсутствует необходимость в термостатировании или поддержании постоянства давления исследуемого вещества и полностью исключается возможность возникновения естественной конвекции. Опыт показывает, что начало конвекции наблюдается в жидкостях и газах при времени нагрева τ больше 1 с при перегреве зонда 1 К.

Измерительные датчики данной установки (см. рис. 1), состоящие из плоской металлической спирали, нанесенной на полимерную подложку, служат одновременно источником тепла и термометром сопротивления. Диаметр датчиков варьируется от 3,75 до 15 мм в зависимости от ожидаемой теплопроводности измеряемого материала. Тепло, выделяемое спиралью, рассеивается как исследуемым материалом, так и подложкой пропорционально их теплопроводностям.

В работе данная установка использовалась для измерения образцов композитных материалов на основе микросфер, изготовленных из различных материалов, со связующим веществом – стирол-акриловой эмульсией.

© Кабиров Р. Р., Хабриев И. Ш., Хайрутдинов В. Ф., Габитов И. Р., Абдулагатов И. М., 2025

Измерения теплопроводности проводились для четырех образцов композиционных материалов на основе стирол-акриловой эмульсии с различными наполнителями: керамическими, стеклянными, полистирольными микросферами и рубленым стекловолокном. Каждый материал исследовался при трех начальных уровнях содержания наполнителя (20, 40 и 60 %).

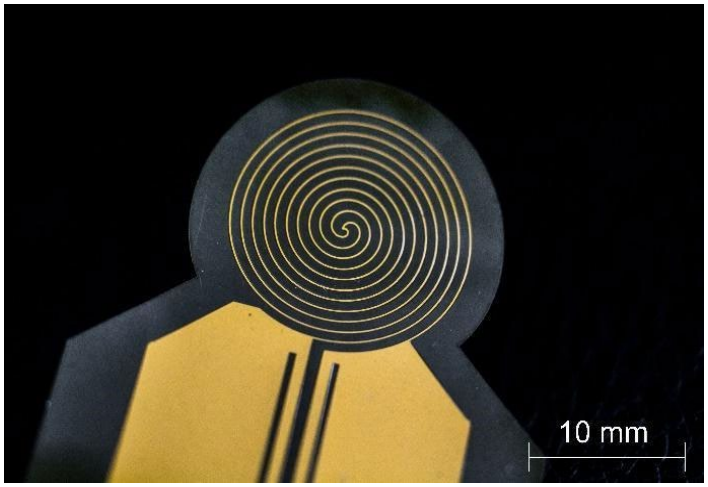


Рис. 1. Плоский зонд ограниченной ширины с металлической резистивной дорожкой в виде двойной спирали на двусторонней подложке

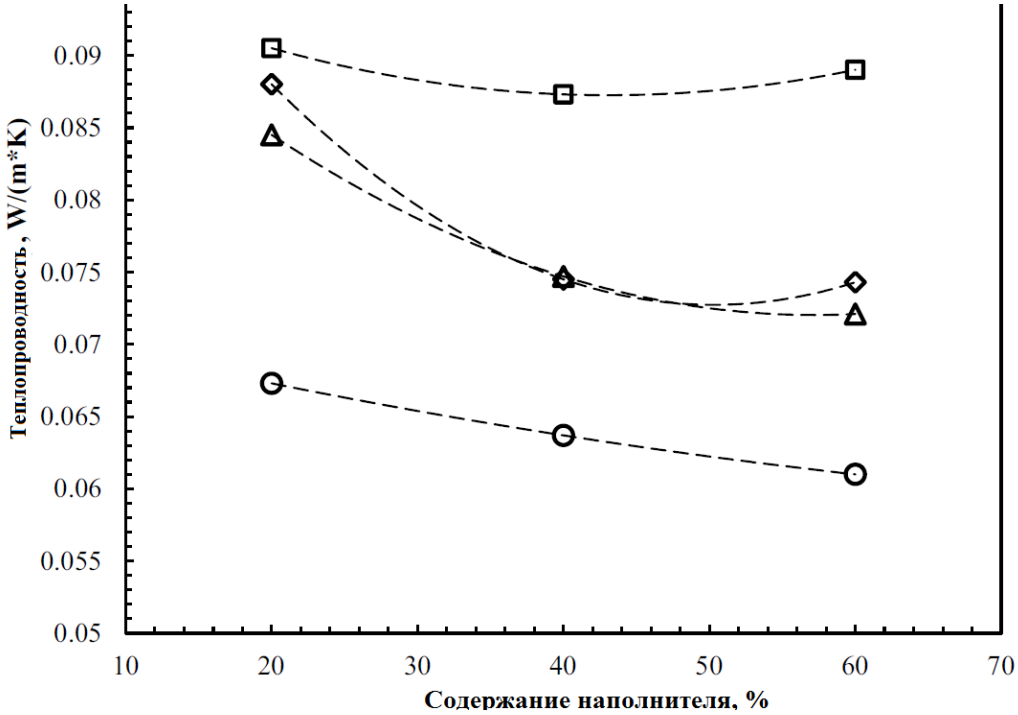


Рис. 2. Теплопроводность композиционных материалов на основе керамических микросфер (◊), стеклянных микросфер (Δ), полистирольных микросфер (○) и рубленого стекловолокна (□) в зависимости от процентного содержания наполнителя

Как и ожидалось, теплопроводность образцов уменьшается с увеличением содержания наполнителя (рис. 2). Такое поведение можно объяснить тем, что средняя теплопроводность микросфер всегда ниже, чем у эмульсии. Также из настоящих изме-

рений следует, что теплопроводность образцов со стеклянными и керамическими микросферами практически одинакова (в пределах экспериментальной погрешности). Напротив, образец с полистирольными микросферами имеет существенно более низкую теплопроводность из-за более низкой теплопроводности полистирола и, следовательно, микросфер, изготовленных из него. Образец композитного материала с рубленым стекловолокнистым наполнителем демонстрирует самые высокие значения теплопроводности, что можно объяснить морфологией материала. По сравнению с микросферами он имеет меньший удельный объем и, следовательно, меньшее содержание воздуха.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10129 (https://rscf.ru/project/22-79-10129).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКОЙ КАПЛИ ШЛИРЕН-МЕТОДОМ НА СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОДЛОЖКАХ

Ю. А. Пещенюк*, А. А. Семенов, Е. Я. Гатапова

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** peschenyuk.yulya@gmail.com*

Шлирен-метод со ступенчатым градиентным фильтром применяется для количественных измерений толщины тонкой жидкой пленки/капли и деформаций поверхности. В данной работе была исследована конечная стадия испарения капли воды. Были получены толщины тонких пленок порядка 1–2 мкм для подложки из черного кремния (b-Si) и стекла с покрытием Graphit 33, которые имеют низкую отражательную способность и высокое поглощение видимого света. Температура подложки варьировалась в диапазоне от 20 до 80 °C. Охарактеризованы возникновение жидкого бугорка на периферии капли, разрыв тонкой жидкой пленки и образование остаточной пленки. Рассчитана удельная скорость испарения с поверхности, которая увеличивается пропорционально скорости линии контакта.

Количественный метод измерения, позволяющий измерять толщину пленки жидкости и деформации ее поверхности, является особенно актуальным для микроразмерных пленок. Для получения двухмерных и трехмерных характеристик быстро испаряющихся тонких пленок жидкости применяются несколько оптических методов. Таких как конфокальная микроскопия [1], интерферометрия [2] и шлирен-метод [3].

В данной работе использовалась одна из модификаций шлирен-метода со ступенчатым градиентным фильтром с семью ступенями серого. Шлирен-метод со ступенчатым или плавно регулируемым фильтром нейтральной плотности был изобретен Нортом в 1952 г. Использование ступенчатого фильтра обеспечивает более четкое изображение с лучшим пространственным разрешением [4]. В качестве подложки использовался черный кремний (b-Si) и стекло с покрытием Graphit 33. Подложки имеют высокий коэффициент поглощения в видимом диапазоне (0,94–0,96), что является важным аспектом для проведения последующей обработки полученных результатов. Оптическая схема представлена на рис. 1.

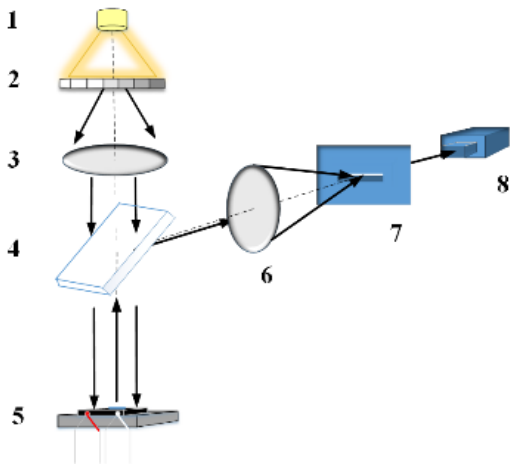
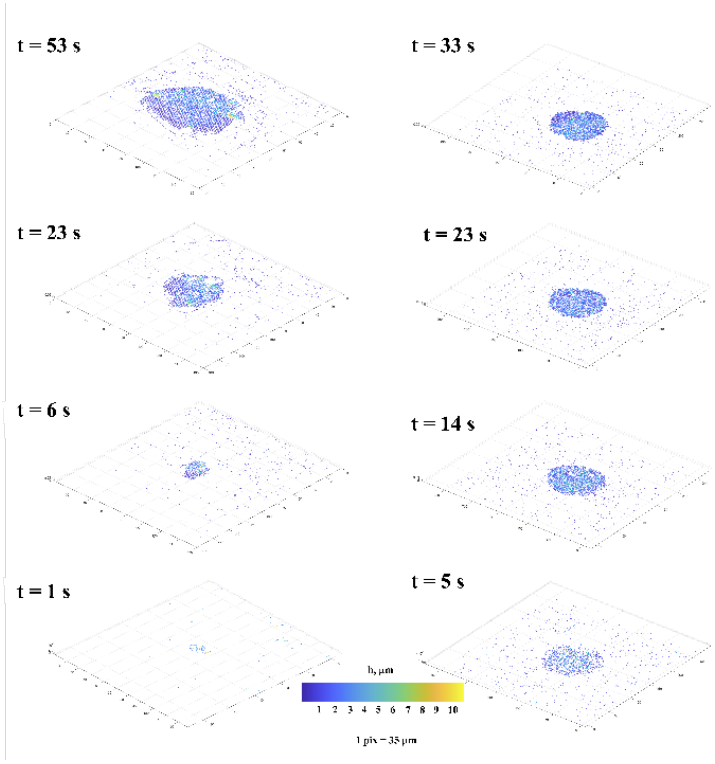


Рис. 1. Оптическая схема шлирен-визуализации: *1* – источник света; *2* – ступенчатый фильтр и матовая пластинка; *3* – коллимирующая линза; *4* – лучевой делитель; *5* – система, состоящая из подложки и нагревателя; *6* – шлирен-линза; *7* – шлирен-фильтр; *8* – камера

© Пещенюк Ю. А., Семенов А. А., Гатапова Е. Я., 2025

Для обработки полученных изображений была разработана программа в среде Matlab. С помощью предварительной калибровки на плоском зеркале получена калибровочная кривая, которая отображает зависимость угла наклона поверхности от градации серого. Полученные в ходе эксперимента изображения загружали в Matlab и преобразовывали в матрицы со значениями интенсивности [0, 256] оттенков серого. Затем матрицы интенсивности были сопоставлены с характерными значениями углов. Значения измеряемых углов лежат в диапазоне –5°…5°. Далее было произведено удаление фона (подложки), для того чтобы корректно задать граничные условия на краях капли и произвести расчет толщины тонкой капли.

Были рассчитаны профили толщины для капель воды при различных значениях температуры подложки, которые дают качественное и количественное представление о двухмерных и трехмерных деформациях поверхности (рис. 2). Также проведен расчет удельной скорости испарения.



а *б*

Рис. 2. Трехмерная карта толщины для капель воды на подложках при температуре подложки 20 °С: *а* – подложка из b-Si; *б* – подложка из стекла с покрытием Graphit 33

Кроме того, асимптотика удельной скорости испарения на заключительном этапе хорошо согласуется с данными, представленными в работе [5].

Список источников

1. Lefèvre F., Rullière R., Lips S., Bonjour J. Confocal microscopy for capillary film measurements in a flat plate heat pipe // J. of Heat Transfer. 2010. Vol. 132. Pp. 031502-1–031502-6.

2. Narayan S., Srivastava A. On the identification and mapping of three distinct stages of single vapor bubble growth with the corresponding microlayer dynamics // International Journal of Multiphase Flow. 2021. Vol. 142. Pp. 103722-1–103722-50.

3. Kabov O. A., Legros J. K., Marchuk I. V., Sheid B. Deformation of the free surface in a moving locally-heated thin liquid layer // Fluid dynamics. 2001. Vol. 36 (3). Pp. 521–528.

4. Settles G. S. Schlieren and shadowgraph techniques- Visualizing phenomena in transparent media (Book) // Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2001.

5. Gatapova E. Y., Shonina A. M., Safonov A. I., Sulyaeva V. S., Kabov O. A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation // Soft Matter. 2018. Vol. 14 (10). Pp. 1811–1821.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ МАРКИ СС И Д

С. А. Шевырёв[1*], П. А. Стрижак[2]

[1]Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, д. 28
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 30
** ssa.pmahp@kuzstu.ru*

Показаны результаты экспериментальных исследований паровой газификации углей марок СС и Д Кузнецкого бассейна, подвергнутых частичному удалению летучих веществ в муфельной печи. Получены характеристики генераторного газа в стационарном режиме и коксового остатка. Выполнен расчет эксергетической и энергетической эффективности процесса паровой газификации в кипящем слое.

Технология газификации углей позволяет сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Поэтому исследователи в различных странах продолжают работы в области изучения процессов газификации и поиска оптимальных режимов и конструкций газогенераторов. Перспективной конструкцией газогенератора является двухстадийная установка кипящего слоя (dual fluidized bed gasifier) [1]. К особенностям такой конструкции газогенератора относится разделение на две камеры, в которых протекает процесс газификации с разными газифицирующими агентами. Исследование стационарных и нестационарных процессов, протекающих в камерах газогенератора, позволяет оптимизировать их конструкции, а также подбирать оптимальные технологические параметры.

При газификации различных материалов в камерах газогенератора протекают стационарные и нестационарные процессы. Условно можно считать протекание нестационарного процесса в первой камере газогенератора, а стационарного процесса во второй камере газогенератора.

Для исследований процесса газификации использовались угли марок СС и Д с частичным удалением летучих веществ. В качестве газифицирующего агента применялся перегретый водяной пар различных температур и расхода. Для проведенных экспериментальных исследований в расчетах стационарный режим определялся по основным компонентам CO и H_2 при наблюдении практически неизменных показателей состава газа поточным газоанализатором с отклонением не более 3 % (табл. 1).

Таблица 1

Состав генераторного газа при паровой газификации углей марок СС и Д

Температура пара на входе в газогенератор, °С	CO, %	H_2, %	CO_2, %	CH_4, %	O_2, %
Уголь марки «СС», средний расход					
950	28,8	47,5	20,5	3,20	0
840	25,9	51,7	19,2	3,20	0
750	23,1	40,9	13,7	22,2	0
Уголь марки «СС», повышенный расход					
940	11,6	53,1	7,6	27,7	0
850	18,0	60,5	10,1	11,4	0
750	24,5	54,2	17,9	3,4	0

© Шевырёв С. А., Стрижак П. А., 2025

Окончание табл. 1

Температура пара на входе в газогенератор, °С	CO, %	H_2, %	CO_2, %	CH_4, %	O_2, %
Уголь марки «СС», пониженный расход					
940	26,2	42,0	12,3	19,5	0
845	23,1	53,1	13,1	10,7	0
750	25,2	54,2	10,6	10,1	0
Уголь марки «Д», средний расход					
950	30,4	35,3	30,3	4,0	0
850	29,1	39,3	25,8	5,7	0
750	25,1	39,6	24,8	10,5	0
Температура пара на входе в газогенератор, °С	CO, %	H2, %	CO2, %	CH4, %	O2, %
Уголь марки «Д», повышенный расход					
935	15,6	32,2	21,3	30,9	0
840	15,8	34,2	27,0	23,1	0
740	17,3	34,9	33,4	14,4	0
Уголь марки «Д», пониженный расход					
950	18,6	45,0	19,5	17,0	0
840	25,4	41,1	20,6	12,9	0
740	20,8	36,5	30,0	12,7	0

По результатам состава получаемого газа в стационарном режиме и характеристик коксового остатка выполнен расчет энергетической (cold gas efficiency – CGE) и эксергетической эффективности (η_{ex}) процесса паровой газификации [2].

Результаты расчета в различных режимах представлены в табл. 2.

Таблица 2

Энергетическая и эксергетическая эффективности паровой газификации углей марок СС и Д

Температура, °С	CGE, %	η_{ex}, %	Температура, °С	CGE, %	η_{ex}, %
Уголь марки «СС», средний расход			Уголь марки «Д», средний расход		
960	5	0,64	965	80	4,74
835	21	0,71	865	20	4,11
760	43	4,04	765	46	2,66
Уголь марки «СС», повышенный расход			Уголь марки «Д», повышенный расход		
740	46	2,26	745	56	2,82
835	9	1,30	835	28	2,44
940	37	2,05	940	28	2,69
Уголь марки «СС», пониженный расход			Уголь марки «Д», пониженный расход		
735	22	1,06	740	50	3,96
845	51	4,75	840	52	3,98
935	47	3,04	940	55	4,39

В результате расчета установлена невысокая эффективность использования перегретого водяного пара при получении генераторного газа. Это связано как с неоптимальной конструкцией газогенератора, так и с достаточно большим избытком пара, подаваемого для газификации исходного сырья для обеспечения кипящего слоя в газогенераторе.

Список источников

1. Шевырев С. А. Применение Aspen plus для моделирования состава синтез-газа в процессе паровой бескислородной газификации биомассы // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 43–50.

2. Investigation of characteristics of gas and coke residue for the regime of quasi- and non-stationary steam gasification of coal in a fluidized bed: Part 1 / S. A. Shevyrev, N. E. Mazheiko, S. K. Yakutin, P. A. Strizhak // Energy. 2022. No. 251 (50). P. 123938.

ЭЛЕКТРОВИХРИЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

И. О. Тепляков*, Ю. П. Ивочкин,
Д. А. Виноградов, П. И. Поляков

Объединенный институт высоких температур РАН
124412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, д. 13/2
** igor.teplyakov@mail.ru*

Рассмотрены гидродинамические явления, возникающие при пропускании электрического тока через жидкий металл между двумя полусферическими электродами. Показано влияние внешнего магнитного поля на вихреобразование. Описана волоконно-оптическая методика измерения скорости в жидком металле и приведены результаты измерений осевой и азимутальной скоростей в объеме жидкого металла.

При пропускании электрического тока через объем жидкого металла возникает объемная вихревая сила $F = J \times B$ (здесь, J и B – плотность электрического тока и магнитная индукция созданного им поля), приводящая в случае пространственно неоднородного распределения J к образованию электровихревого течения (ЭВТ) [1]. Интенсивные ЭВТ имеют место в различных сильноточных технологических процессах, например, при электродуговом и электрошлаковом переплаве металла. В частности, именно ЭВТ определяют гидродинамическую структуру потоков в рабочей ванне дуговых печей постоянного тока. Предполагается, что в природных условиях ЭВТ могут быть одной из причин возникновения торнадо.

Схема экспериментальной установки, на которой проводятся исследования в ОИВТ РАН, показана на рис. 1. Эвтектический сплав In-Ga-Sn 5 (массовое содержание компонент Ga – 67 %; In – 20,55; Sn – 12,5 %; температура плавления 10,5 °C; плотность $\rho = 6452$ кг/м^3; кинематическая вязкость $\nu = 4{,}3$–7 м^2/с) заполняет медный полусферический контейнер. Сменный малый электрод с полусферическим окончанием помещается в центр полусферы, и от источника через систему пропускается электрический ток до 1500 А. Внешнее магнитное поле создается соленоидом.

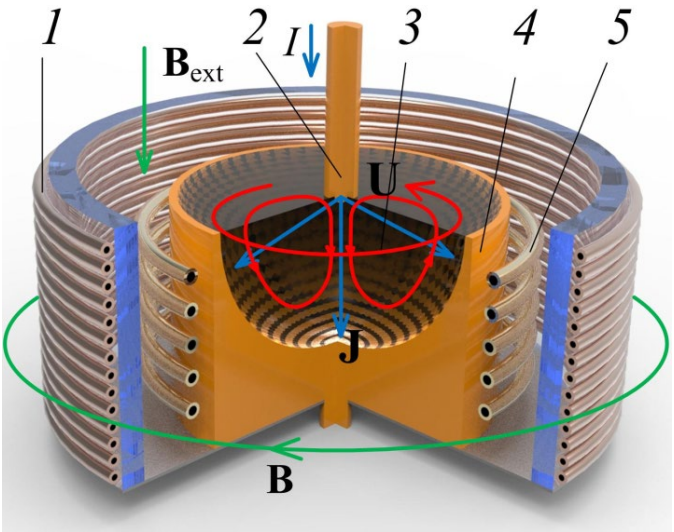


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – соленоид; *2* – малый электрод; *3* – эвтектический сплав In-Ga-Sn; *4* – большой электрод; *5* – система охлаждения

© Тепляков И. О., Ивочкин Ю. П., Виноградов Д. А., Поляков П. И., 2025

В такой системе может создаваться сложная система вихрей, конкретная реализация которой зависит от размеров электродов, тока через установку и внешнего магнитного поля. В системе без внешнего магнитного поля, в объеме полусферы, как правило, создается одиночный тороидальный вихрь, но при определенном соотношении радиусов электродов и тока, в области смыкания большого электрода и поверхности жидкого металла возникает цепочка вихрей Моффата.

Наложение внешнего вертикального поля, в результате взаимодействия радиальной компоненты тока с вертикальным полем приводит к азимутальной закрутке жидкости. При относительно малых полях течение представляет собой вращающийся тор, при увеличении поля возникает вторичный вихрь (родственный вихрям Тейлора), направленный противоположно первому, система теряет стационарность и начинаются автоколебания.

Для исследований полей скорости в жидком металле в лаб. 10.2 ОИВТ РАН используется волоконно-оптическая методика. Преобразователь работает следующим образом. При измерении скорости поток жидкости воздействует на цилиндрический чувствительный элемент, находящийся на конце стеклянного конуса. Чувствительный элемент изгибается, вызывая перемещение стеклянного указателя *2*, закрепленного внутри чувствительного элемента. Ход указателя измеряется с помощью оптоволоконного преобразователя перемещения, который состоит из пары изогнутых световодов, которые оптически соединены с источником света *5* и фотоприемником *6*. Под действием набегающего потока чувствительный элемент изгибается, а указатель (изменяя свое положение) меняет количество света, попадающего в световод. Таким образом, значения электрического сигнала фотоприемника функционально связаны со значениями двух составляющих скорости потока.

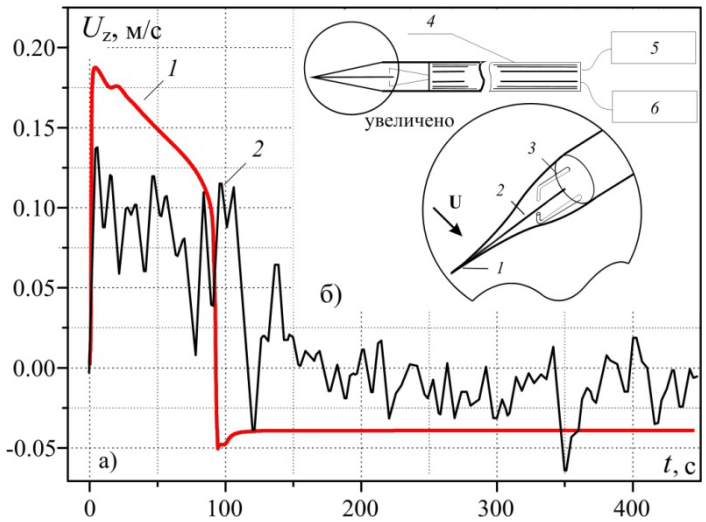


Рис. 2. Пример результата измерений (*2*) и сравнение с расчетом (*1*) осциллограммы осевой скорости при воздействии внешнего магнитного поля (*а*). Конструкция волоконно-оптического преобразователя скорости (*б*): *1* – цилиндрический элемент; *2* – указатель; *3* – осветительные и приемные волокна; *4* – корпу; *5* – источник света; *6* – светоприемник

Волоконно-оптический преобразователь позволяет измерять как средние, так и пульсационные значения скорости жидких металлов в интервале 1–50 м/с, с температурой до 100 °С, частотный интервал составляет 0–200 Гц, измерительный объем $0{,}04 \times 0{,}04 \times 0{,}7$ м^3. При помощи волоконно-оптического преобразователя были проведены измерения осевой и азимутальной скоростей при различных значениях тока и внешнего магнитного поля, построена карта режимов течения.

Список источников

1. Электровихревые течения / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг, Е. И. Шилова [и др.]; под ред. Э. В. Щербиниа. Рига : Зинатне, 1985. 316 с.

2. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. М. : Машиностроение, 1989. 272 с.

3. Жилин В. Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. М. : Энергоатомиздат, 1987. 112 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю. С. Чумаков, Т. М. Хакимов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б
** hakimov.t@edu.spbstu.ru*

В работе представлены характеристики и возможности исследования свободноконвективного потока на новом уникальном экспериментальном стенде, представляющем собой нагреваемую пластину высотой 5 м. Для определения теплового потока от нее производились подробные измерения профилей температуры и скорости вблизи поверхности. Были получены результаты для трех режимов течения: ламинарного, переходного и турбулентного.

Свободноконвективные потоки являются важной частью многих процессов, как природных, наблюдаемых в атмосфере и океанах Земли, так и тех, что реализуются в различных технологических устройствах. Актуальность изучения этой области обусловлена как раз возможностью оптимизации многих практических технологий, особенно тех, где применение вынужденной конвекции невозможно по ряду причин.

В то же время информация о структуре рассматриваемого потока все еще остается неполной. В частности, остается открытым вопрос о структуре динамического и теплового турбулентного и переходного пограничных слоев. Несмотря на возросшую доступность численного моделирования задач аэрогидродинамики, его применимость для исследования свободноконвективных турбулентных течений еще довольно ограничена ввиду отсутствия высокоэффективных моделей. Те же модели турбулентности, что используются при рассмотрении смежных задач, не обладают необходимой точностью, особенно когда речь заходит об определении точных границ ламинарно-турбулентного перехода [1]. В связи с этим возрастает значение экспериментального исследования, чему также способствуют возросшие возможности измерительной аппаратуры и совершенствование программного обеспечения для автоматизации обработки данных.

Задача о свободноконвективном теплообмене на вертикальной поверхности служит объектом экспериментального (а с недавнего времени и численного) исследования достаточно давно [2] ввиду своей простоты и показательности. Отличительной особенностью подхода, использованного в данной работе, является применение уникальной установки, представляющей собой вертикальную алюминиевую пластину высотой 5 м и шириной 90 см (рис. 1).

Нагрев обеспечивают 25 элементов, расположенных с обратной стороны и связанных с электронной системой, способной поддерживать заданный режим с точностью до 0,2 °C в течение 6–8 ч. Большая высота позволяет моделировать как ламинарный, так и переходный и турбулентный (вплоть до значения числа Грасгофа $Gr = 4{,}5 \cdot 10^{11}$) режимы течения.

Для перемещения датчиков предусмотрено координатное устройство, обеспечивающее позиционирование по нормали к поверхности, т. е. поперек пограничного слоя с точностью около 1 мкм и по вертикали. Таким образом, работа стенда полностью автоматизирована; на обработку одного сечения в пограничном слое уходит минимум 2 ч. Измерительная часть стенда представлена двумя основными датчиками – термоанемометрическим (ТА) и термометром сопротивления (ТС), расположенным выше по пото-

© Чумаков Ю. С., Хакимов Т. М., 2025

ку. По необходимости можно использовать как однониточный термоанемометр, так и Х-образный (для измерения двух компонент скорости). Выбор термоанемометрии как основной измерительной технологии обусловлен ее относительной простотой и точностью. От более современных методов (как например ЛДИС и *PIV*) ее также выгодно отличает возможность непрерывного измерения скорости потока. Сложности, связанные с неизотермичностью потока и его низкой скоростью, удалось обойти, разработав специальную методику и сконструировав вспомогательную установку для калибровки датчиков [3].

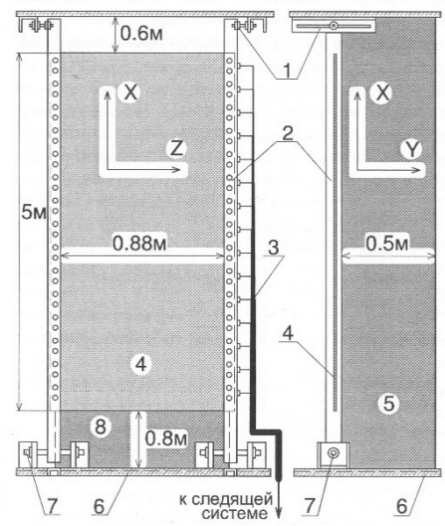


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: *1* – верхнее крепление; *2* – вертикальные опоры; *3* – кабели датчиков; *4* – пластина; *5* – боковые шторки; *6* – фундамент; *7* – шарнирное крепление; *8* – задняя шторка

Накопленная база данных профилей скорости и температуры, полученных на установке, дает возможность с высокой точностью вычислять величины, позволяющие анализировать структуру потока. В частности, пульсационные характеристики (как например интенсивности пульсаций температуры и продольной компоненты вектора скорости) дают представление о границе переходной зоны. Другие расчетные характеристики, такие как коэффициенты турбулентной вязкости и температуропроводности, в дальнейшем планируется использовать при верификации численных моделей турбулентности.

Список источников

1. Багаев Д. В., Сыралева М. Н. Численное моделирование свободноконвективного течения около вертикальной поверхности нагрева // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 2 (384). С. 93–98.

2. Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1988. N 31. Pp. 1723–1734.

3. Чумаков Ю. С., Хакимов Т. М. Установка и методика калибровки датчиков ТА для измерения скорости в низкоскоростном воздушном неизотермическом потоке // Неделя науки ФизМех : сборник материалов Всероссийской научной конференции, 1–5 апреля 2024 г. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 467–470.

Секция 12
Строительная теплофизика и задачи энергосбережения

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ НОВОГО УРЕНГОЯ

О. Ш. Белявская

Тюменский индустриальный университет
625000, Российская Федерация, Тюмень, ул. Володарского, д. 38
beljavskajaos@tyuiu.ru

Рассматривается проблема анализа ветрового режима жилых территорий городов, находящихся в Арктической зоне РФ. Рассмотрены особенности моделирования ветровых потоков в плагине Eddy3D для Grasshopper для территории микрорайона Нефтяников в городе Новый Уренгой. В результате цифрового моделирования получены траектория и скорость ветра в условиях многоэтажной застройки, визуализированы штилевые зоны и зоны сильных ветров.

Городское пространство интенсивно продолжает терять качество среды, это объясняется высоким уровнем техногенного воздействия, физико-химическим загрязнением, а также изменениями климатических параметров в условиях уплотнения застройки. Рост населенных мест приводит к сокращению зеленых насаждений, увеличению площади замощения, что вызывает серьезные изменения климатических факторов, таких как температура воздуха, скорость и направление ветра, перераспределение осадков и др. В приземном слое наблюдаются самые неблагоприятные трансформации климатических элементов для жителей, которые используют территорию для пешеходного движения.

Аэрационный режим в условиях сложившейся городской застройки подчиняется законам гидротермодинамики, что создает достаточно сложные условия для его изучения [1]. Высокий коэффициент шероховатости городских ландшафтов снижает скорость воздушных масс у поверхности земли, при этом из-за неравномерного нагревания воздуха у подстилающей поверхности возникает усиление ветра в штилевой зоне.

Особенно важно учитывать ветровой режим в населенных пунктах Арктической зоны РФ, так как активное изменение такого климатического фактора, как ветер, в благоприятную для человека сторону поможет создать комфортную городскую среду.

В рамках исследования выполнен анализ ветровых потоков жилой застройки на фрагменте территории микрорайона Нефтяников в городе Новый Уренгой. Для имитации ветрового потока на территории нового микрорайона использовался плагин Eddy3D для Grasshopper. Исходные данные для моделирования выбраны из следующих источников:

– рельеф-снимки SRTM с помощью плагина Heron;
– геометрические параметры застройки – Open Street Map;
– высотные характеристики – Qgis;
– направление и скорости ветра – сайт windy.com.

Согласно [2] город Новый Уренгой входит в I климатический район (подрайон IД) с резко континентальным суровым климатом, характеризующимся суровой длительной зимой, снегопереносом и метелями. Основное направление ветров в зимний период – южное. С севера и с востока территория микрорайона окружена лесным массивом, на юге сложившаяся городская застройка, с запада проходит магистральная автодорога. Согласно спутниковым картам, на сегодняшний день территория застроена частично, по проекту планировки предполагается несколько жилых групп, а также общественные здания (рис. 1). Высота жилых зданий составляет от 3 до 5 этажей и характеризуется как среднеэтажная.

© Белявская О. Ш., 2025

Применение плагина Eddy3D позволяет получить наглядное изображение ветровых потоков участков с различными скоростями ветра, а также увидеть места застоя воздуха и высоких скоростей (рис. 2).

Рис. 1. Фрагмент территории микрорайона Нефтяник в г. Новый Уренгой (спутниковая карта, проект планировки)

Результаты аэрационного режима фрагмента территории показывают, что происходит усиление ветра на территории детской образовательной организации, а также у здания общественного центра. Зоны со скоростями ветра менее 2,5 м/с сконцентрированы во внутридворовых территориях, что соответствует комфортным условиям эксплуатации открытого пространства.

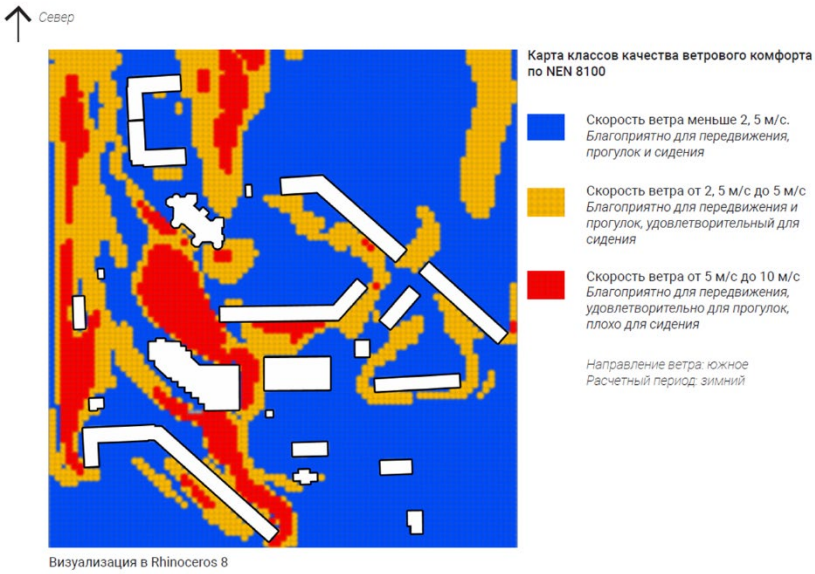


Рис. 2. Изображение ветровых потоков участков с различными скоростями ветра

Как показывают результаты цифрового моделирования, геометрические параметры застройки имеют большое влияние на поведение воздушных масс. Свободные приемы планировки, изменение расстояния от магистральных дорог, угловые и поворотные секции способствуют изменениям направления и скоростей ветров. Примене-

ние цифрового моделирования позволяет выполнять качественный анализ аэрационного режима жилой территории и предлагать решения, способствующие повышению качества среды.

Список источников

1. Мягков М. С. Нормирование и нормативы микроклиматических условий территории городской застройки. Реализация требований биоклиматической комфортности в проектной подготовке строительства. URL: https://marhi.ru/kafedra/techno/phisics/myagkov_climat.pdf (дата обращения: 10.01.2025).

2. СП 131.13330.2020. Строительная климатология: актуализированная редакция СНиП 23-01-99*: свод правил /Минрегион России: введен в действие с 2021-06-25. М. : ФЦС, 2021. 146 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ГОРОДОВ С РАЗЛИЧНЫМ ЕСТЕСТВЕННЫМ РЕЛЬЕФОМ

А. В. Беляева*, А. Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред УО РАН
614013, Российская Федерация, Пермь, ул. Ак. Королева, д. 1
** bav@icmm.ru*

Экспериментально исследованы процессы теплообмена в условиях городской среды. В качестве экспериментальных моделей использованы детализированные макеты городов Красноярска и Перми. Исследован процесс остывания поверхности города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Ключевой задачей являлось определение зависимости теплообмена от рельефа города, определяемого высотой местности и частотой застройки.

Одним из способов воздействовать на тепловой комфорт в городской среде является планирование застройки. Ряд исследований показал, что высота зданий и рельеф местности слабо влияют на температуру воздуха и городской поверхности [1–3]. Тогда как влияние плотности застройки оказывается неоднозначным.

Основной целью настоящего исследования является лабораторное моделирование процессов теплообмена в городской среде с использованием трехмерных моделей двух крупных городов – Красноярска и Перми, существенно отличающихся друг от друга рельефом местности. Красноярск, по сравнению с Пермью, имеет более сложный рельеф и большие перепады высот, что может приводить к сильным изменениям внешних условий в пределах города. Для оценки влияния рельефа и городской застройки на распределение температуры использовали новый экспериментальный подход, реализованный в работе [4]. Особенность данного подхода заключается в том, что для масштабирования процессов теплообмена в атмосферном пограничном слое используются турбулентные коэффициенты переноса. На основе такого приближения выбирается масштаб экспериментальных моделей и параметры эксперимента.

В качестве модельной задачи был исследован процесс остывания городских поверхностей после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Показано, что влияние геометрических характеристик города на распределение температуры поверхности макета является существенным только для макета города Перми с относительно плоским рельефом местности. Проведено сравнение экспериментальных результатов с данными дистанционного зондирования по снимкам Landsat~8.

Исследование поддержано Российским научным фондом, № 22-61-00098.

Список источников

1. Logan T. M., Zaitchik B., Guikema S. Nisbet. Night and day: The influence and relative importance of urban characteristics on remotely sensed land surface temperature // Remote Sensing of Environmen. 2020. Vol. 247. Pp. 111861.

2. Lan Y., Zhan Q. How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time // Building and Environment. 2017. Vol. 125. Pp. 88–98.

3. Zhou D., Shuqing Z., Shuguang L., Liangxia Z., Chao Z. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers // Remote sensing of environment. 2014. Vol. 152. Pp. 51–61.

4. Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // Urban Climate. 2022. Vol. 43. Pp. 101177.

© Беляева А. В., Сухановский А. Н., 2025

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ

Г. Г. Волокитин[1], В. А. Черемных[1*], В. Д. Гольдин[2], А. А. Клопотов[1], Ю. А. Абзаев[1], Н. О. Рыбалов[1]

[1] Томский государственный архитектурно-строительный университет
6340003, Российская Федерация, Томск, пл. Соляная, д. 2
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет
6340050, Российская Федерация, Томск, ул. Ленина, д. 30
** vacheremnykh@gmail.com*

Представлены результаты определения влияния воздействия высокоэнтальпийным плазменным пучком на поверхность образца древесины сосны. Проведен термический анализ процесса нагрева древесины, с помощью которого определены кинетические параметры четырех стадий разложения. Установлено, что выявленные четыре стадии теплофизических процессов можно свести к четырем стадиям, в которых скорости реакций разложения описывается законом Аррениуса.

Древесина относится к тому классу материалов, который широко используется в строительстве как в качестве отделочного, так и конструкционного материала. В то же время древесина относится к материалам с хорошо выраженной анизотропией физико-механических свойств и с пористым строением, у которого возможна существенная модификация поверхности в результате термического воздействия [1; 2]. Одним из перспективных методов модификации поверхности изделий из древесины является воздействие высокоэнтальпийным плазменным пучком. При таком воздействии глубина модифицированного структурно измененного слоя древесины достигает значений порядка 1–2 мм. Толщина модифицированного слоя зависит от параметров плазмотрона, плазмообразующего газа и скорости сканирования поверхности [3]. Кроме визуального изменения цветовой гаммы поверхности и образования сажи, поверхность становится более устойчивой к грибковым заболевания и образованию плесени.

При создании изотермической плазмы в плазматроне происходит образование большого числа активных частиц (ионов, атомов, радикалов) и в результате такое состояние плазмы становится высокоэнтальпийным энергоносителем [4]. Известно, что температура высокоэнтальпийного плазменного пучка кратно выше, чем температура в камере термической модификации, или температура при горении древесины. Это хорошо показано при теоретическом расчете распределений температурных полей в плазменной струе от плазменного генератора с мощностью 25 кВт (рис. 1). Установлено, что распределение температурных полей в плазменной струе имеет хорошо выраженное градиентное строение: температура слоев увеличивается от периферийной части струи к центральной от 4000 до 7000 °С. Эти данные показывают, насколько высока температура высокоэнтальпийного плазменного пучка. В результате в приповерхностном слое древесины возможно получить достаточно высокие температуры, которые можно варьировать при помощи скрости сканирования.

В литературе мало работ, посвященных вопросам нагрева поверхности древесины и определению распределений температурных полей по сечению древесины в результате ее взаимодействия плазмой [6]. Эти данные необходимы для создания математической модели, описывающей процессы взаимодействия плазменного потока с поверхностью древесины, в основе которой лежит понимание теплофизических явлений.

© Волокитин Г. Г., Черемных В. А., Гольдин В. Д., Клопотов А. А., Абзаев Ю. А., Рыбалов Н. О., 2025

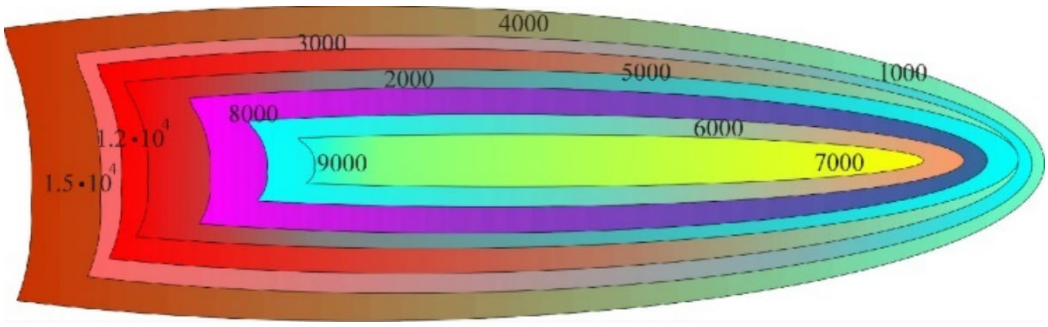


Рис. 1. Схематическое распределение температурных полей
в высокоэнтальпийноом плазменном пучке при токе дуги 150 А [5]

В данной работе представлены результаты моделирования теплофизических процессов с использованием экспериментальных данных дифференциального термогравиметрического анализа процесса пиролиза древесины при высоких интенсивностях нагрева (10–20 град/мин) и экспериментальных данных, полученных при исследовании взаимодействия поверхности древесины с потоком высокоэнтальпийной плазмы.

Воздействие плазменным пучком на древесину проводилось на сконструированном в ТГАСУ аппарате [7]. Мощность плазменного генератора меняли в широких пределах от 14,4 до 25,5 кВт. Сканирование поверхности образцов проводили со скоростями от 0,05 до 0,1 м/с.

На основе полученные экспериментальных данных предложены теплофизические процессы, которые происходят в результате испарения летучих компонентов (свободной воды, легкоиспаряющихся компонентов) и нагрева основного каркаса из древесины. Выявлено четыре реакции, которым соответствуют четыре стадии на дифференциальных термогравиметрических кривых.

Показано, что в основе теплофизических процессов лежат сложные физико-химические преобразования материала, которые можно свести к четырем стадиям, на каждой из которых скорость реакции разложения описывается законом Аррениуса.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEMN-2023-0003.

Список источников

1. Скоблов Д. А. Применение древесины в современном, строительстве. М. : Госстройиздат, 1962. 200 с.

2. Черемных В. А., Волокитин Г. Г., Клопотов А. А., Скрипникова Н. К. Перспективы использования плазменных технологий в области создания и обработки строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. Т. 764, № 8. С. 65–72.

3. Волокитин Г. Г., Устинова М. В., Черемных В. А. Определение влияния различных видов термической обработки на механические свойства древесины сосны с учетом их себестоимости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26, № 3. С. 210–218.

4. Даутов Г. Ю., Тимошевский А. Н., Аньшаков А. С. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы. Новосибирск : Наука, 2004. 466 с.

5. Фролов В. Я., Юшин Б. А., Чуркин И. С. Плазменная технология нанесения декоративных покрытий // Металлообработка. 2009. № 1. С. 20–23.

6. Волокитин Г. Г., Волокитин О. Г., Шеховцов В. В. и др. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины// Вестник Томского

государственного архитектурно-строительного университета. 2013. Т. 40, № 3. С. 220–227.

7. Волокитин Г. Г., Шеховцов В. В., Безухов К. А., Черемных В. А. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы // Патент на полезную модель № 212821 U1 Российская Федерация, МПК B27K 5/00: № 2021139632: заявл. 29.12.2021: опубл. 10.08.2022.

РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПЛАВЛЕНИЕ БАЗАЛЬТА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

С. Ю. Шишулькин, А. Г. Девятов*

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, Российская Федерация, Улан-Удэ, ул. Ранжурова, д. 4
Devyatov1994@list.ru

В статье по результатам выполненных измерений энергетических характеристик опытной экспериментальной установки «Электромагнитный технологический реактор» в процессе плавления базальтовой породы Енхорского месторождения республики Бурятия получены данные по удельному расходу электроэнергии на один килограмм базальта. При сопоставлении данных по удельному расходу электроэнергии с другими электроустановками (электродуговые и индукционные) доказана энергоэффективность плавления в электромагнитном технологическом реакторе.

Строительная индустрия в Республике Бурятия и в России в целом, характеризуется ежегодным увеличением объемов потребления теплоизоляционных материалов на 10–12 % [1]. Особого внимания при этом заслуживает производство минераловатных материалов. В частности, базальтового волокна, используемого в качестве эффективного теплоизолятора в зданиях и сооружениях различного назначения. Однако ключевой технологической стадией, определяющей значительную долю энергозатрат в производстве базальтового волокна, остается процесс высокотемпературного плавления исходного сырья. Этот процесс обычно осуществляется в плавильных реакторах, которые работают при температурах, достигающих 1250–1550 °С [2]. Для достижения необходимой температуры используются мощные электродуговые или газовые печи. Поэтому разработка и внедрение энергоэффективных плавильных реакторов – острая необходимость для снижения себестоимости продукции.

Для выполнения эксперимента по плавлению базальта в электромагнитном технологическом реакторе [3] использована минеральная порода Енхорского месторождения Республики Бурятия, элементный состав которого определен с помощью рентгенофазового анализа и представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав Енхорского базальта

SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
42,55	17,37	1,12	2,151	3,58	5,42	3,22	5,22

Для определения теоретического минимума энергозатрат на процесс плавления базальта принимались удельные теплоемкости базальта в зависимости от температурных промежутков [4] (табл. 2).

Таблица 2

Удельная теплоемкость базальта от температурных промежутков

Температурный промежуток, ºС	Удельная теплоемкость, кДж/кг* ºС
20–400	0,698
400–600	0,933
600–800	0,978
800–1180	1,04

© Шишулькин С. Ю., Девятов А. Г., 2025

Также при расчете затрат электрической энергии необходимо установить удельную теплоту плавления базальта. Учитывая, что в составе базальта большую часть составляет кремнезем 48,12 %, можно сделать вывод, что удельная теплота плавления базальтовой шихты не менее удельной теплоты плавления SiO_2, которая составляет142 кДж/кг. По результатам расчета теоретического минимума энергозатрат на плавлении 20 кг базальта до температуры 1200 ºС составляет 23,7 МДж энергии.

В процессе плавления базальтовой породы производились замеры энергетических характеристик реактора с помощью прибора «Энергомонитор-3.3 Т1» [5], который совмещает в себе эталонный счетчик, анализатор, измеритель, регистратор и осциллограф. Для фиксации достигнутой температуры расплава использовалась тепловизионная камера Luma sense MSC 640.

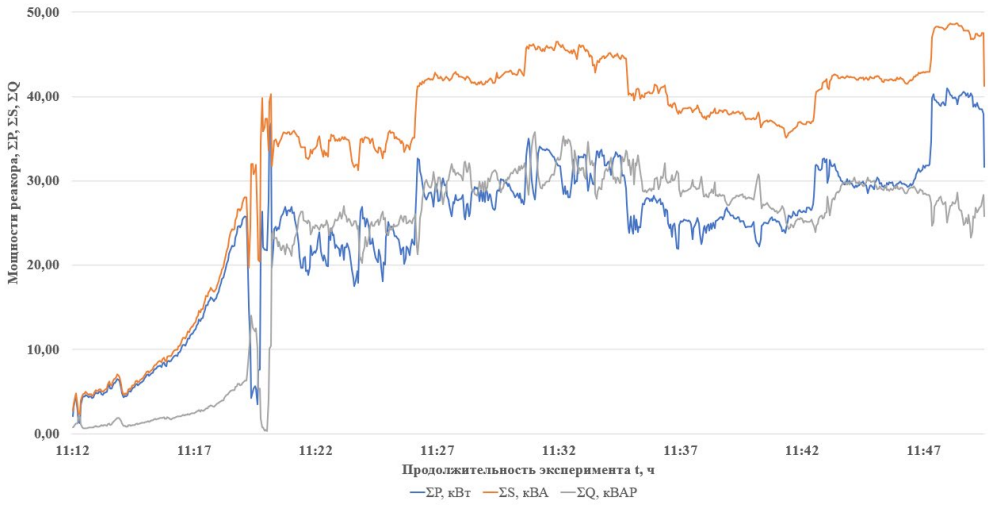


Рис. 1. Графики активной, полной и реактивной мощностей

Общая длительность плавки базальта без механического перемешивания в реакторе составила 38 минут, удельные энергозатраты составили 1,52 кВт·ч/кг. Сравнивая полученный показатель энергозатрат электромагнитного технологического реактора с современными индукционными и электродуговыми печами, энергопотребление которых составляет 2,2 кВт·ч/кг и 7,08 кВт·ч/кг соответственно, можно сделать вывод о энергоэффективности технологической плавки базальта в реакторе данной конструкции.

Список источников

1. Оснос М. С., Оснос С. П. Базальтовые непрерывные волокна – основа для создания новых промышленных производств и широкого применения армирующих и композитных материалов // Композитный мир. 2019. № 1. С. 58–65.

2. Расчеты плавильных и нагревательных печей : учеб. пособие / Б. М. Соболев, Ю. Н. Мансуров, Хейн Вин Зо, С. Б. Марьин ; под общ. ред. Б. М. Соболева. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «ККнАГТУ», 2015. 131 с.

3. Патент № 2533565 C1 Российская Федерация, МПК C03B 37/06. Плазменный способ получения минеральной ваты и установка для его осуществления / Буянтуев С.Л., Шишулькин С. Ю. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»: Заявл. 07.11.2013; опубл. 20.11.2014. Бюл. № 32

4. Нурматов Ж. Т. О свойствах базальтов и изделий // Экономика и социум. 2022. №12. С. 747–750.

5. Приборы для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор-3.3Т1». Руководство по эксплуатации МС3.055.028 РЭ. URL: https://www.electronpribor.ru/files/products/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-33t_7.pdf (дата обращения: 11.08.2024).

6. Технико-Коммерческое предложение [Электронный ресурс] // Научно-Производственная компания [сайт]. URL: http://www.termokomplex.ru/commerce (дата обращения: 08.02.2025).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО И МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

В. А. Лавшонок

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета
660074, Российская Федерация, Саяногорск, р. п. Черемушки, д. 15
LavshonokVA@nornik.ru

В работе рассмотрено применение программного комплекса «Борей 3D» при выполнении прогнозных теплотехнических расчетов на этапах проектирования и эксплуатации зданий и сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов с учетом тенденции глобального потепления климата. Моделирование позволяет выполнить оценку состояния температурного режима грунтов и применить полученные результаты для определения несущей способности грунтов основания зданий и сооружений.

Строительство и эксплуатация зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) представляют собой сложную инженерную задачу, особенно в условиях изменения климата. Повышение температуры приводит к деградации мерзлых грунтов, снижению их несущей способности и риску деформаций конструкций [1]. Для прогнозирования и предотвращения негативных последствий применяется численное моделирование температурного и механического взаимодействия зданий и грунтов, позволяющее оценить возможные изменения и подобрать эффективные решения.

ММГ обладают высокой устойчивостью при отрицательных температурах, однако при оттаивании они теряют прочность, что может привести к просадкам фундаментов, деформациям и разрушению сооружений. Основные факторы, влияющие на температурный режим грунтов:

– изменение климата – увеличение средней годовой температуры и количества осадков;

– тепловое воздействие зданий – тепло, поступающее от фундаментов и коммуникаций, ускоряет оттаивание грунтов;

– снеговой покров – его рост изменяет теплообмен между поверхностью и грунтом.

Для анализа этих процессов используются специализированные программные комплексы, такие как «Борей 3D», позволяющие моделировать распределение температуры в грунтовом массиве с учетом фазовых переходов воды.

Метод, реализованный в программном комплексе, основывается на численных методах решения нелинейных задач теплопроводности, таких как метод конечных разностей. Этот метод позволяет дискретизировать расчетную область во времени и пространстве, что необходимо для моделирования температурного режима грунтов. Задача теплового взаимодействия решается с учетом фазовых переходов в грунтах, которые относятся к классу нелинейных задач. Основной метод решения – метод конечных разностей, который позволяет учитывать теплофизические характеристики грунтов и их температурное поле. Данный подход закреплен в нормативных документах, таких как РСН 67-87, и используется для прогнозирования изменений температурного режима вечномерзлых грунтов.

© Лавшонок В. А., 2025

Входные данные при моделировании. Для моделирования используются климатические характеристики, полученные из нормативных документов, таких как СП 131.13330.2020, либо на основании данных инженерных изысканий, выполненных при проектировании. Тренд глобального потепления учитывается на основе открытых климатических баз данных, таких как WorldClim, CHELSEA или климатические проекции CMIP6. Геологическое строение района играет ключевую роль в моделировании температурного режима грунтов. Для этого используются данные инженерно-геологических изысканий, включая инженерно-геологические колонки и разрезы. Различные виды грунтов имеют разные теплофизические свойства, расчет которых программный комплекс «Борей 3D» позволяет выполнить несколькими методами [2; 3].

В качестве примера выполнено построение 3D-модели в виде куба размером 50 × 50 × 50 м, с заданными грунтовыми и климатическими условиями площадки проектирования насыпи, на которой планируется расположить технологический трубопровод с автопроездом (рис. 1). Куб модели отображает область, которая подвергнется дискретизации при выполнении расчета. Прогноз динамики изменения климатических данных выполнен для случая потепления на 0,07 °С ежегодно в период с начала строительных работ по возведению земляной насыпи и эксплуатации трубопровода в течение 15 лет. Также заданы условия теплопередачи от трубопровода, в котором транспортируется жидкость с постоянной температурой + 15 °С к грунтам насыпи, на которой он расположен. Калибровка модели выполняется на основании фактически измеренных температур грунта, выполненных при проектировании, и данных геотермического контроля в период эксплуатации.

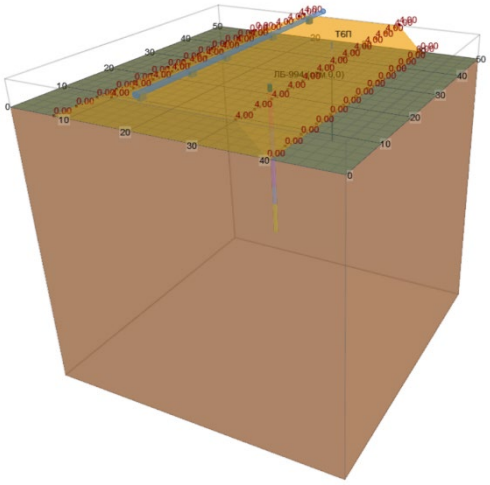


Рис. 1. Построение 3D-модели в программном комплексе «Борей 3D»

При заданных условиях моделирование показало деградацию мерзлотного состояния грунтов основания насыпи. Анализ данных температурных полей показал, что глубина сезонного растепления грунта к концу срока эксплуатации составит 5 м, что превышает средний уровень глубины растепления площадки строительства (2 м) Тепловое влияние трубопровода не оказывает оттепляющего воздействия на грунты насыпи.

Вычислительное моделирование является важным инструментом для обеспечения устойчивости зданий и сооружений в условиях изменения климата. Использование численных методов, таких как метод конечных разностей, позволяет учитывать сложные процессы, происходящие в грунтах, и прогнозировать их влияние на сооружения. Это особенно актуально для северных регионов, где вечная мерзлота является основой

для строительства. Учет климатических изменений и геокриологических процессов позволяет разрабатывать эффективные меры по адаптации зданий к новым условиям и предотвращать их разрушение.

Список источников

1. Хрусталев Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. М. : Университетская книга, 2011. 260 с.

2. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04-88.

3. Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне : справочное пособие. Новосибирск : Издательство СО РАН, 2004. 146 с.

МЕТОДИКА ЗОНИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ПО УРОВНЯМ ПЕШЕХОДНОЙ КОМФОРТНОСТИ

В. Д. Мешкова[1*], П. Д. Шульженко[1], К. Ю. Литвинцев[2], А. А. Дектерев[1, 2]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
[2]Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** Redel-VD@yandex.ru*

Представлено описание разработанной методики зонирования городской застройки по уровням пешеходного комфорта на основе расчета биоклиматических показателей. Проведена апробация данной методики на типовой городской застройке по критерию комфорта – радиационно эквивалентно-эффективной температуры (РЭЭТ). Моделирование проведено для климатических условий, характерных для летнего режима г. Красноярска. В качестве результата приведено зонирование застройки по рассматриваемому критерию, для которого определены количественные значения и описаны условия пешеходного комфорта.

Исследования аэрационного и теплового режима городов позволили определить, что на территории каждого города формируются свои условия внешней среды, которые, в-первую очередь, зависят от климатических особенностей рассматриваемой территории, рельефа местности и наличия водных объектов. Для локального аэрационного и теплового режима определяющим фактором является застройка (тип жилой застройки, высота зданий и сооружений, ее плотность, теплофизические свойства строительных материалов).

Изначально разработка численных инструментов была направлена на возможность прогнозировать внешние условия городской среды для изучения экологических условий в приземной атмосфере, т. е. для определения условий рассеивания загрязняющих веществ от различных источников. Но в результате развития городов стали возникать новые проблемы, которые связаны с ветротемпературным комфортом в уличных пространствах, где постоянно пребывают люди.

Ветротемпературный режим территории в разных географических широтах будет восприниматься человеческим организмом по-разному. Например, в местах, где преобладают отрицательные температуры воздуха, ветер усиливает неблагоприятные погодные условия. В теплом климате ветровой режим, наоборот, улучшает микроклимат территории [1; 2]. В связи с этим возникает потребность в разработке численного инструмента, позволяющего комплексно учитывать теплофизические процессы, на основе которых происходит формирование ветрового и температурного режима территории, и оценивать их с точки зрения восприятия человеческим организмом. Специалистами Сибирского федерального университета и Института теплофизики СО РАН разрабатывается микромасштабная модель атмосферы города, которая направлена на моделирование условий распространения загрязняющих веществ в городской среде, а также развивается для исследования условий формирования уровня пешеходного комфорта в городской застройке с помощью расчета биоклиматических критериев комфортности [3].

В программном модуле SigmaPedestrianComfort была реализована методика зонирования городской застройки по уровням пешеходной комфортности на основе обработки полученных при численном моделировании полей метеовеличин. В данный

© Мешкова В. Д., Шульженко П. Д., Литвинцев К. Ю., Дектерев А. А., 2025

модуль интегрировано 10 биоклиматических критериев комфорта, которые позволяют идентифицировать локальные метеоусловия по степени их восприятия человеческим организмом и определить условия комфорта в целом.

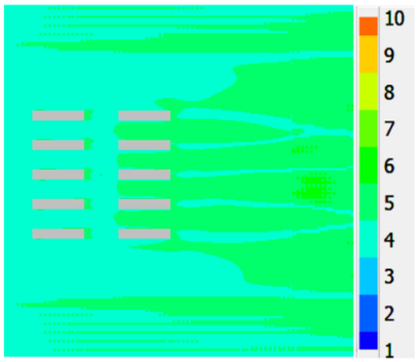
Алгоритм, реализованный в методике, заключается в следующем: выбирается объект исследования (область городской застройки), собираются и анализируются метеоданные, присущие территории, на которой расположен объект исследования; подбираются исследуемые метеорологические сценарии; далее осуществляется подготовка геометрии объекта с расчетной областью, готовится расчетная сетка; выполняются численные исследования аэродинамики и тепломассообмена; на основе полученных расчетных значений скорости, температуры, влажности и потока солнечного излучения осуществляется расчет биоклиматических показателей комфорта; производится зонирование городской застройки по условиям комфорта в виде полей для рассматриваемых критериев комфорта.

В качестве примера, возможно рассмотреть зонирование по условиям комфорта на основе расчета показателя радиационной эквивалентно-эффективной температуры (РЭЭТ):

$$\text{РЭЭТ} = 1251g\left[1 + 0.02T + 0.001(T - 8)(f - 60) - 0.045(33 - T)\sqrt{V} + 0.185\beta\right]$$

где T – температура воздуха, °C; f – относительная влажность, %; V – скорость ветра, м/с; β – поглощенная поверхностью тела солнечная радиация, кВт/м^2 ($\beta = \varepsilon(1 - \alpha)$, где ε – интенсивность солнечной радиации, кВт/м^2, α – альбедо кожи человека).

Рассматривается формирование условий пешеходного комфорта в типовой застройке строчного вида, где высота зданий составляет 30 м. Для моделирования использовались климатические условия, характерные для летнего периода г. Красноярска: скорость ветра и температура были равны 2,5 м/с и 298 К соответственно на высоте 10 м. Результат зонирования по уровню комфорта на основе РЭЭТ на высоте 2 м на основе реализованной методики приведен на рис. 1.



Для зоны 4, характерное распределение показателя РЭЭТ варьируется в пределах от 21…27, что соответствует *умеренному теплу, комфортным условиям.*

Для зоны 5, характерное распределение показателя РЭЭТ варьируется в пределах 17…21, что соответствуют условиям *прохладно, менее комфортные условия*.

Рис. 1. Зонирование городской застройки по критерию комфортности РЭЭТ

Методика зонирования городской застройки по уровням пешеходного комфорта имеет универсальный характер и может быть применена для любой городской застройки при различных климатических условиях с учетом географических особенностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098 (https://rscf.ru/project/22-61-00098).

Список источников

1. Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы Москвы. МДС 20-1.2006 // ФГПУ «НИЦ «Строительство». М. : ФГУП ЦПП, 2006. С. 27.

2. Рекомендации по оценке аэрации территории в жилой застройке г. Москвы. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 160 с.

3. Dekteryev A. A., Litvintsev K. Yu., Gavrilov A. A., Kharlamov E. B. The development of free engineering software package for numerical simulation of hydrodynamics, heat transfer, and chemical reaction processes // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2017. N 10 (4). Pp. 105–112.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЧЕБНОГО КОРПУСА ВОЕННОГО ВУЗА

С. Д. Мурашов[1*], О. Ш. Белявская[2], Г. В. Сухарев[1]**

[1]Тюменское высшее военно-инженерное командное ордена Кутузова училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова
625001, Российская Федерация, Тюмень, ул. Льва Толстого, д. 1
[2]Тюменский индустриальный университет
625000, Российская Федерация, Тюмень, Володарского, д. 38
**czr266@mail.ru, **beljavskajaos@tyuiu.ru*

Статья поднимает проблему энергоэффективности учебных корпусов военных вузов и особенности температурно-влажностного режима аудиторий. Исследованы теплотехнические характеристики ограждающих конструкций стен, чердачного перекрытия, пола, окон, дверей и проведена тепловизионная съемка учебного корпуса ТВВИКУ в Тюмени. Рассчитаны нормативные и расчетные сопротивления теплопередачи, произведено сравнение поэлементных требований, которые показывают несоответствие условиям [2] и предложены мероприятия для улучшения теплотехнических показателей.

Содержание и экстремальный характер военно-профессиональной деятельности, сложность военной техники как ее объекта, специфика условий производственной среды военного специалиста, высокая цена ошибки в его действиях обуславливают острую потребность в обеспечении единства общенаучной, гуманитарной, инженерно-технической, тренажерной, тактической подготовки будущих военных специалистов.

Особенностями организационно-педагогических условий образовательной среды высших военных учебных заведений являются четкая регламентация содержания и структуры профессиональной подготовки будущих военных специалистов, что делает обязательным соблюдение распорядка дня, который регламентирует почти 90 % времени курсантов. Значительную часть времени курсанты отводят под учебные занятия и самостоятельную подготовку в учебных классах, поэтому так важно поддерживать комфортные условия для обеспечения учебной деятельности курсантов.

В рамках исследовательской работы рассматривается построенный и введенный в эксплуатацию в 2022 г. учебный корпус, находящийся на территории учебного центра Тюменского высшего военно-инженерного командного училища, 31-й военный городок.

В учебном корпусе находятся 7 учебных классов, полная посадка которых составляет 250 чел., 2 преподавательских и место несения службы дежурным по учебному корпусу.

На протяжении трех лет в холодное время года поступают жалобы от курсантов и профессорско-преподавательского состава на отсутствие комфортных условий и явное нарушение температурного режима в учебных аудиториях. Показания термометров в аудиториях колеблются в пределах 15–18 °С, влажность находится в интервале 25–30 %.

Согласно требованиям [1], нормативные значения температуры и влажности в учебных аудиториях (помещения 2-й категории) составляет: оптимальная температура 19–21 °С, относительная влажность 45–30 %. Сравнивая нормативные значения температуры воздуха с имеющимися показаниями термометров, можно обнаружить нарушение нормативных требований: температура ниже оптимальных значений, влажность меньше рекомендуемых.

© Мурашов С. Д., Белявская О. Ш., Сухарев Г. В., 2025

На следующем этапе был проведен теплотехнический расчет (табл. 1) ограждающих конструкций, который выполнялся согласно [1; 2]. Были рассчитаны нормируемые значения приведенного сопротивления теплопередачи для климатических условий г. Тюмени, а также расчетное значение в соответствии с составом ограждающих конструкций. Значение расчетного приведенного сопротивления теплопередачи окон и дверей приняты согласно данным производителей.

Таблица 1

Теплотехнические показатели

Тип конструкции	Обозначение, единица измерения	Нормируемое значение	Расчетное проектное значение
Стена	$R_{\text{о.ст}}^{\text{пр}}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}{\text{Вт}}\right]$	3,495	2,877
Окно	$R_{\text{о.ок}}^{\text{пр}}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}{\text{Вт}}\right]$	0,4137	0,457
Чердачное перекрытие	$R_{\text{о.черд}}^{\text{пр}}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}{\text{Вт}}\right]$	4,598	4,78
Полы	$R_{\text{о.цок}}^{\text{пр}}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}{\text{Вт}}\right]$	4,598	3,737

Также были проведены измерения температуры поверхностей учебного корпуса с помощью тепловизора FLIR i3 [3].

На фотографиях (рис. 1) представлены результаты тепловизионной съемки: температура внутренних поверхностей стены составляет 15,7 °С, а температура пола 14 °С, что является неприемлемым в данной ситуации.

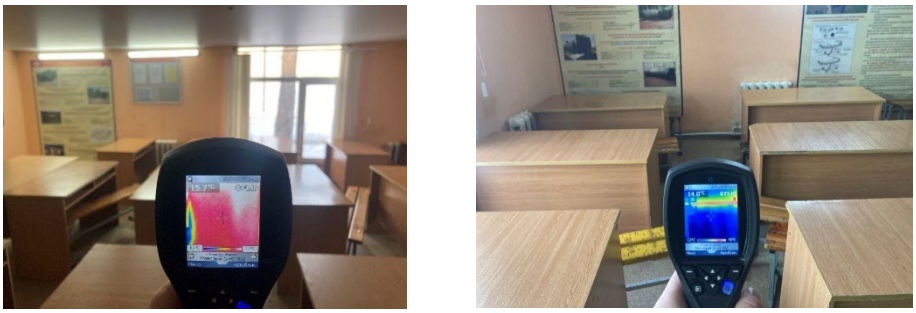


Рис. 1. Температура внутренней поверхности стены учебной аудитории №9

В ходе исследования опытным и аналитическим путями была доказана необходимость утепления стен и полов учебного корпуса, замена окон на более энергоэффективные. В связи с увеличением штата подразделений вооруженных сил, в Тюменском училище за последние три года набор курсантов увеличился с 250 до 400 чел., что опять же подтверждает необходимость строительства новых учебных корпусов, которые будут не только соответствовать всем стандартам и правилам строительства, но и станут ведущими за счет своей практичности и эргономичности. В качестве типового учебного корпуса подойдут конструкции модульного типа, подчеркивающие однообразие и лаконичность, к которым так стремится Министерство обороны.

Список источников

1. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor

enclosures : издания официальное : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 191-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2013 г. – М. : Стандартинформ, 2013. 11 с.

2. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Thermal performance of the buildings : издание официальное : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 15 мая 2024 г. № 327 и введен в действие с 16 июня 2024 г. М. : Минрегион России, 2024. 97 с.

3. Getting Started Guide FLIR ix series / FLIR Systems, Inc. All rights reserved worldwide, 2011.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

М. И. Низовцев*, В. Н. Летушко, А. Н. Стерлягов

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** nizovtsev@itp.nsc.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований тепловых и гидродинамических параметров воздухо-воздушного регенеративного теплообменника с промежуточным теплоносителем и капельным орошением. Получены экспериментальные зависимости температурной и влажностной эффективности теплообменника от расходов воздушных потоков.

При эксплуатации зданий энергозатраты на нагрев и охлаждение вентиляционного воздуха могут достигать 50 % в общем энергобалансе. В связи с высокими ценами на энергоносители и ростом затрат энергии на отопление и вентиляцию современных жилых и производственных зданий все более остро встают вопросы энергосбережения, большую актуальность приобретает создание и использование новых энергоэффективных технологий и устройств. Широкое применение современных энергоэффективных конструкций стен и окон с низкой воздухопроницаемостью приводит к проблемам регулируемой вентиляции помещений [1]. При вентиляции до 90 % энергозатрат может быть снижено при использовании рекуперативных и регенеративных теплообменников. Эффективность используемых конструкций воздушных регенеративных теплообменников еще недостаточно высока, кроме того, существенным недостатком известных устройств является то, что они надежно работают только при относительно высоких температурах наружного воздуха. При низких температурах поверхности теплообмена в них обмерзают, и аппараты перестают выполнять свои функции. Это вызывает необходимость проведения научно-исследовательских работ по поиску новых технических решений [2]. Для повышения эффективности существующих теплообменников и создания принципиально новых устройств необходимы простые и эффективные модели теплофизических процессов, верификация которых требует наличия обширной базы экспериментальных данных. Таким образом, задача изучения физических механизмов тепломассопереноса в мини-каналах и пористых средах с фазовыми превращениями, на базе которых могут быть разработаны новые теплообменные аппараты, является актуальной и требует комплексного экспериментально-расчетного подхода.

Перспективными устройствами регенеративной вентиляции являются регенераторы с промежуточным теплоносителем. Достоинствами такого типа регенераторов являются отсутствие обмерзания, малые потери напора воздуха и возможность пространственно разнести места ввода и вывода воздушной вентиляции, что повышает эффективность их работы. Подобные регенераторы тепла являются новыми, и поэтому в литературе имеется ограниченная информация о таких аппаратах [3].

Для повышения энергетической эффективности устройств утилизации тепла и холода вентиляционного воздуха в лаборатории термогазодинамики Института теплофизики СО РАН выполняются работы по исследованию воздухо-воздушных теплообменников с промежуточным теплоносителем и капельным орошением. Такие аппараты не подвержены обмерзанию и могут надежно работать в холодных климатических условиях, а также позволяют повышать влажность поступающего в помещение воздуха в холодный период года. В 2024 г. получен патент на изобретение «Воздухо-

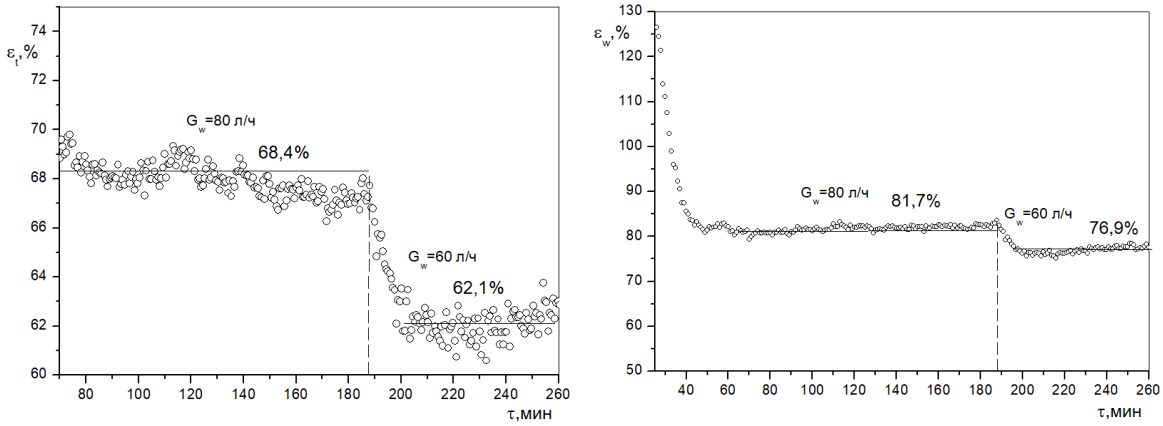
© Низовцев М. И., Летушко В. Н., Стерлягов А. Н., 2025

воздушный регенеративный теплообменник с промежуточным жидкостным теплоносителем» [4]. Разработана и изготовлена новая лабораторная модель одноколоночного теплообменного аппарата. Описание конструкции аппарата и первые экспериментальные исследования его эффективности в зимний период времени приведены в докладе.

Теплообменник выполнен в виде единой колонны из пластиковой трубы диаметром 0,25 м высотой 2 м и теплоизолирован с наружной стороны. В верхнюю зону аппарата подается наружный воздух, который проходит снизу вверх через слой засыпки. Сверху слой засыпки орошается солевым раствором. Солевой раствор проходит через слой засыпки и нагревает воздушный поток, который поступает в помещение. Охлажденный солевой раствор через гидрозатвор орошает нижний слой засыпки. В противоположном направлении солевому раствору движется поток воздуха, который поступает из помещения, проходит через засыпку, охлаждаясь солевым раствором, и выводится на улицу. Солевой раствор, нагретый воздухом из помещения жидкостным насосом, вновь подается в верхнюю часть колонны, таким образом замыкая жидкостный контур. В качестве промежуточного теплоносителя используется концентрированный раствор хлористого кальция, а в качестве засыпки – кольца Рашига.

При проведении экспериментов расходы потоков воздуха из помещения и с улицы были одинаковы, $G_v = 130$ м^3/ч. Расход промежуточного теплоносителя первые 187 минут работы теплообменника был $G_w = 80$ л/ч, после этого был снижен до $G_w = 60$ л/ч.

Была определена температурная эффективность нагрева воздуха (рис. 1, *а*). Она составила при расходе теплоносителя $G_w = 80$ л/ч, $\varepsilon_t = 68{,}4$ %, а при расходе $G_w = 60$ л/ч, $\varepsilon_t = 62{,}1$ %.



а *б*

Рис. 1. Эффективность теплообменника:
а – температурная; *б* – влажностная

Важная особенность работы данного теплообменника заключается еще и в том, что он позволяет, помимо регенерации тепла вентиляционного воздуха, повышать влажность поступающего в помещение воздуха, что важно в регионах с холодным климатом, так как наружный воздух в них имеет низкую влажность в зимнее время. По результатам экспериментов средняя влажностная эффективность нагрева воздуха составила при расходе промежуточного теплоносителя $G_w = 80$ л/ч, $\varepsilon_w = 81{,}7$ %, а при расходе $G_w = 60$ л/ч, $\varepsilon_w = 76{,}9$ % (рис. 1, *б*).

Список источников

1. Schünemann C., Schiela D., Ortlepp R. How window ventilation behavior affects the heat resilience in multi-residential buildings // Building and Environment, vol. 202(9), 107987, 2021.

2. Hu Y., Heiselberg P. K., Guo R. Ventilation cooling/heating performance of a PCM enhanced ventilated window-an experimental study // Energy and Buildings. 2020. Vol. 214. 109903.

3. Yu. V., Boroduli M. I. Nizovtsev. Calculation of the Efficiency of Intermediate Heat Carrier, Journal of Construction Research. June 2021. Vol. 03. Issue 01.

4. Патент № 2824236. Воздухо-воздушный регенеративный теплообменник с промежуточным жидкостным теплоносителем / В. Н. Летушко, М. И. Низовцев, А. Н. Стерлягов; патентообладатель ФГБУН ИТ СО РАН.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ С ГЛУБОКОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ И ВЛАГИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА КАК АЛЬТЕРНАТИВА ЦЕНТРАЛЬНОМУ ОТОПЛЕНИЮ

Ю. Я. Печенегов*, Н. А. Озеров, В. А. Косов, М. А. Косов

Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина
410054, Российская Федерация, Саратов, ул. Политехническая, д. 77
** y.pechenegov@mail.ru*

Предложена система распределенного воздушного отопления жилых и производственных помещений, замещающая широко используемые централизованные системы водяного отопления. В результате проведенных расчетов получена совокупность технико-экономических показателей предложенной системы. Показано, что предложенная система экономически выгоднее систем центрального водяного отопления и обладает рядом других преимуществ.

Оставшиеся России в наследство от СССР широко распространенные системы централизованного водяного отопления жилых и производственных помещений в настоящее время находятся в изношенном состоянии, имеют высокую аварийность и нуждаются в замене. Восстановительные и ремонтные работы на существующих тепловых водяных сетях отопительных систем весьма затратны и не всегда возможны в условиях сложившейся городской застройки.

Как альтернатива централизованному водяному отоплению, позволяющая решить многие присущие ему недостатки, может рассматриваться регулируемая распределенная система воздушного отопления помещений, совмещенная с системой их вентиляции и основанная на использовании рекуператора [1] (рис. 1), обеспечивающего глубокий перенос теплоты и влаги из потока удаляемого вытяжного воздуха в поток приточного воздуха.

Тепломассообменная матрица рекуператора состоит из двух вертикальных отсеков, в которых противоточно перемещаются приточный и вытяжной потоки воздуха. Отсеки примыкают к внутренней поверхности стены здания и включают перемежающиеся между собой теплообменные и влагообменные секции. Секционирование матрицы позволяет выводить капельную влагу из потока вытяжного воздуха по мере ее образования при охлаждении потока и тем самым исключает отложение льда на стенках щелевых теплообменных каналов в теплопередающих секциях. Щелевые каналы образованы теплопередающими тонкостенными гофрированными пластинами, имеют малую ширину (1–3 мм) и повышенную интенсивность теплообмена потоков воздуха. Перемещение потоков воздуха через рекуператор осуществляется при помощи двухпоточного вентилятора [2], который устанавливается под оконным проемом на наружной стороне стены здания. Устройство имеет электрический доводчик температуры приточного воздуха, управляющие поворотные заслонки в газоходах и обеспечивает работу в трех основных режимах: 1) вентиляция помещения с передачей теплоты и влаги из потока вытяжного в поток приточного воздуха (реализуется при наличии людей в помещении); 2) рециркуляция воздуха внутри помещения при выключенном вентиляторе (в отсутствии людей); 3) объединяет оба предыдущих режима.

Расчеты распределенной системы воздушного отопления проводили с учетом нормативов [3], температуры внутри помещения 20 °С и снаружи –26 °С, цен на тепловую энергию 2 700 руб/Гкал и электроэнергию 4,4 руб/(кВт·ч). При разности темпе-

© Печенегов Ю. Я., Озеров Н. А., Косов В. А., Косов М. А., 2025

ратур потоков приточного и вытяжного воздуха в секциях рекуператора, равной 1 °С, коэффициент удержания теплоты (тепловой КПД устройства) в отапливаемом помещении составлял 97,8 %.

Получено, в частности, что инвестиционные затраты на строительство распределенной системы воздушного отопления значительно меньше стоимости замещаемого оборудования (котельные, тепловые сети и др.) централизованного водяного отопления. Эксплуатационные издержки для предложенной распределенной системы отопления жилых помещений на 60 % меньше, чем для системы централизованного водяного отопления. В абсолютном выражении экономия составляет 62 руб/(м^2 пола помещения) в месяц.

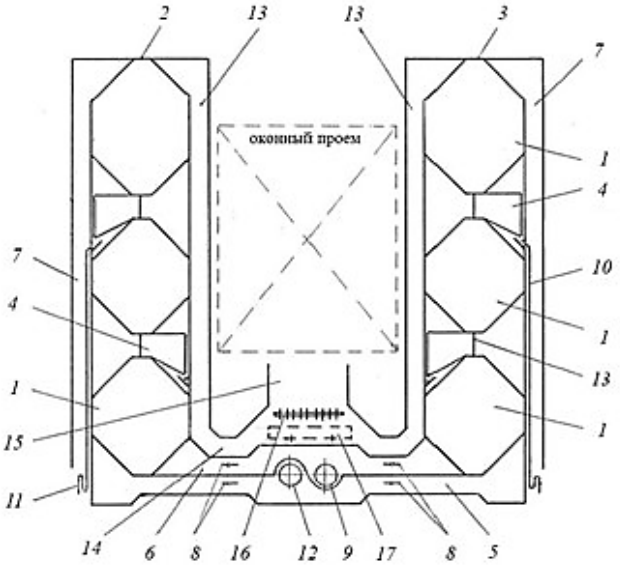


Рис. 1. Вертикальный разрез рекуператора (схемное изображение): *1* – теплообменные секции с пакетами теплопередающих гофрированных пластин; *2, 3* – вертикальные отсеки; *4* – влагопередатчики; *5, 6* – каналы приточного и вытяжного потоков воздуха; *7* – подъемные каналы вытяжного воздуха; *8* – поворотные регулируемые заслонки; *9* – патрубок подачи вытяжного воздуха в вентилятор; *10* – дренажные трубки; *11* –гидрозатворы; *12* – патрубок подачи приточного воздуха от вентилятора; *13* – опускные каналы приточного воздуха; *14* – горизонтальные газоходы; *15* – приемная камера; *16* – электрический тепловой доводчик; *17* – окно с регулируемой заслонкой

Для жилой комнаты в типовом доме с площадью пола 20 м^2 и площадью наружной стены с окном 10 м^2 расходы каждого из потоков приточного и вытяжного воздуха в соответствии с [3] составляют 60 м^3/час. При этом суммарная площадь поверхности теплопередачи в рекуператоре равна 40 м^2, высота вертикальных отсеков 2,5 м; ширина теплообменных секций 0,5 м и их толщина 0,045 м.

Предлагаемая система воздушного отопления обеспечивает регулирование параметров атмосферы в помещениях с малым временем отклика на управляющий сигнал, что способствует повышению комфортности и энергосбережению. Отопительная система позволяет дополнительно, без помощи форточек и вытяжных устройств, эффективно решать задачу замены воздуха в помещениях, что особенно важно в условиях массовой установки пластиковых окон в домах.

Список источников

1. Патент РФ № 2796291, МПК F 24 F 3/147, F 24 F 12/00. Рекуператор теплоты и влаги вентиляционного воздуха / Печенегов Ю. Я., Косов В. А., Косов М. А. и др.; Опубл. 22.05.2023, бюл. № 15.

2. Патент РФ № 2773590, МПК F 24 F 7/00, F 04 D 17/00. Двухпоточный центробежный вентилятор / Печенегов Ю. Я., Косов В. А., Косов М. А. и др.; Опубл. 06.06.2022, бюл. № 16.

3. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М. : ФГУП ЦПП, 2004.

ПОВЫШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЛОГО ДОМА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОКОННОГО БЛОКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ TEMPER-3D

И. Д. Ржаников*, Н. Е. Таран, О. Ш. Белявская

Тюменский индустриальный университет
625000, Российская Федерация, Тюмень, ул. Володарского, д. 38а
** Ilyarzhan@gmail.com*

Рассматривается необходимость повышения энергоэффективности жилых зданий типовой серии и снижения тепловых потерь, что является важным аспектом в условиях изменяющегося климата и растущих цен на энергоресурсы. Также приведены результаты моделирования узла примыкания оконного блока к наружной ограждающей конструкции в программном комплексе Temper-3D.

В рамках проекта «Региональная программа капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах Тюменской области на 2015–2053 годы» проведено исследование показателей энергетической эффективности жилого дома, расположенного по адресу: г. Тюмень, ул. Флотская, 15, введенного в эксплуатацию в 1980 г. [1]. Данная программа была разработана с целью реконструкции и поддержания удовлетворительного технического состояния существующих многоквартирных домов, а также улучшения энергоэффективности и комфортной жизни населения.

В результате расчетов было определено, что большая часть теплопотерь происходит через ограждающие конструкции оконных и дверных проемов. Данные участки являются наиболее уязвимыми местами, так как имеют наименьший уровень теплоизоляции по сравнению с другими элементами. Температурный перепад в области проемов приводит к конвекции, потере тепла и образованию холодных зон.

Цель данного исследования заключается в определении фактического и расчетного теплотехнического сопротивления оконных блоков в существующем многоквартирном доме и разработке технических решений для сокращения потерь тепла через данные зоны. В программном комплексе Temper-3D был выполнен аналог оконного блока для создания модели процессов утечки тепла, выполнения теплового анализа, визуализации результатов и дальнейшей разработки и оптимизации технологии установки оконных блоков.

В настоящее время основными причинами теплопотерь, возникающих в области оконных блоков, являются несоблюдение технологии установки, некорректный выбор материалов и элементов проема на стадии проектирования и недостаточная квалификация специалистов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выбор объекта исследования; сбор исходной информации, натурное и тепловизионное обследование жилого дома, создание цифровой модели; проведение расчетов для определения показателей энергоэффективности ограждающих конструкций и количества теплопотерь и анализ полученных данных; построение информационной модели оконного блока и проведения расчета в программном комплексе Temper-3D; анализ полученных данных, выбор оптимальных материалов; разработка технологии монтажа оконного блока с применением инновационных материалов; расчет и моделирование процессов теплопотерь через оконных блок после внедрения разработанной технологии в программном комплексе Temper-3D.

© Ржаников И. Д., Таран Н. Е., Белявская О. Ш., 2025

Было выявлено то, что наибольшие теплопотери возникают в области стыков стеновых панелей, оконных и балконных блоков. Большая часть конструкций выполнена из пластика (90 %), следовательно, для дальнейшей разработки и выполнения модели был выбран данный элемент. После повторного визуального осмотра было выявлено, что существующие оконные блоки были установлены с использованием нескольких шурупов и строительной монтажной пены.

Также проведена тепловизионная съемка для определения фактических теплопотерь ограждающих конструкций существующего многоквартирного дома (рис. 1).

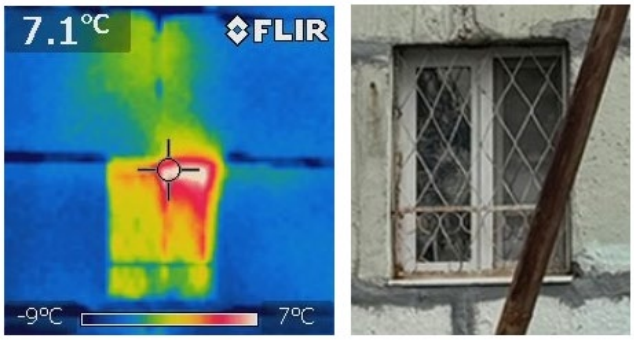


Рис. 1. Результаты тепловизионной съемки. Оконный блок 1100 × 1400

На основе полученных данных был сделан вывод о том, что наибольшее количество теплопотерь происходит через оконные и балконные блоки.

Для определения точных причин и «холодных» зон была создана модель оконного блока в программном комплексе Temper-3D согласно результатам натурных обмеров, комплекта чертежей и визуального осмотра. На основе существующих данных был произведен предварительный расчет [3] (рис. 2).

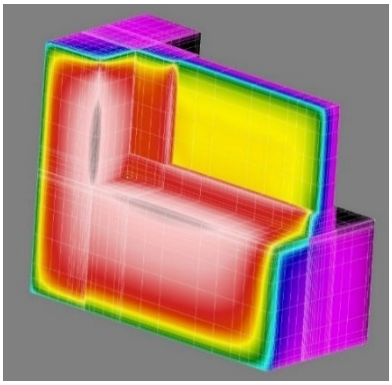


Рис. 2. Модель оконного блока. Внешняя сторона (улица)

При расчете в программном комплексе была установлена температура на поверхности ограждающей конструкции окна в месте примыкания к стеновой панели $t = -4{,}24$ °C.

В результате исследования были установлены узловые соединения с наибольшими потерями тепла, смоделирован узел примыкания в зонах наибольших теплопотерь и проанализированы полученные данные в ПК Temper-3D. Для уменьшения тепловых потерь необходимо применение инновационных теплоизоляционных материалов, которые помогут решению данной проблемы.

Список источников

1. СП 50.13330.2024 «СниП 23-02-2003 Тепловая защита зданий». URL: https://docs.cntd.ru/document/456054197 (дата обращения: 12.09.2024).

2. Насонова А. Е. Энергоэффективные дома глазами потребителей // Библиотека научных статей АВОК.2024. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4941 (дата обращения: 12.09.2024).

3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «TEMPER-3D» № 2006610359 от 20.01.2006 / правообладатель Федоров С. В. URL: https://www.temper3d.ru/publish/raschet (дата обращения: 16.11.2024).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПОД СВАЙНЫМ ФУНДАМЕНТОМ ЗДАНИЯ

А. Н. Стерлягов*, М. И. Низовцев

Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1
** sterlyagov@itp.nsc.ru*

Представлены результаты численных расчетов изменения температуры грунта под свайным фундаментом здания в условиях вечномерзлого грунтового основания. Получены данные по распределению температуры на различной глубине грунта в годовом цикле в естественных условиях и под фундаментом здания. В расчетах учтено воздействие солнечного излучения, снежного покрова, а также влияние фазовых переходов замерзания и оттаивания воды в грунте.

При проектировании и строительстве зданий на вечномерзлых грунтах для предотвращения оттаивания грунтового основания практикуется использование конструкций свайных фундаментов с проветриваемым подпольем [1]. В этом случае грунты вечномерзлого основания используются по I принципу, т. е. с сохранением мерзлого состояния в процессе строительства и эксплуатации [2].

В работе выполнено прогнозное моделирование теплового режима грунтового основания под фундаментом на вечномерзлых грунтах на примере здания в г. Норильске. С использованием программных комплексов проведены численные расчеты изменения температуры на различной глубине грунтового основания в годовом цикле на месте строительства в естественных условиях и под фундаментом. Для выполнения расчетов были использованы данные метеорологической станции и отчеты об инженерно-геологических изысканиях для места строительства, с помощью которых получены необходимые теплофизические характеристики грунтов. Влияние толщины снежного покрова учитывалось по результатам обобщения данных многолетних наблюдений в условиях г. Норильска [3]. Влияние солнечного излучения на нагрев поверхности грунта учитывалось с использованием данных по месячной суммарной энергии излучения. Также в расчетах учитывалась влажность различных типов грунтов, которая значительно влияла на температуру грунта из-за прямых и обратных фазовых переходов. Результаты расчетов сопоставлялись с данными натурных измерений распределения температуры грунта.

В результате расчетов были получены данные по изменению температуры грунта в течение года в естественных условиях и под свайным фундаментом здания. С увеличением глубины грунта для обоих рассчитанных вариантов наблюдалось выравнивание годовых изменений температуры. Результаты расчетов показали, что грунт на поверхности в проветриваемом подполье находился в более мерзлом состоянии по сравнению с естественными условиями. В качестве основных причин более мерзлого состояния грунта на поверхности в случае вентилируемого подполья можно отметить отсутствие утепляющего слоя снежного покрова в зимнее время и ограниченный доступ солнечного излучения в летнее время.

Список источников

1. Мустакимов В. Р. Проектирование зданий в особых природно-климатических условиях : учеб. пособие. Т. 1. Казань, 2018. 231 с.

© Стерлягов А. Н., Низовцев М. И., 2025

2. СП 25.133030.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах при строительстве зданий». М. : Минрегионгразвитие, 2020. 117 с.

3. Федотов А. А., Канибер В. В., Храпов П. В. Анализ и прогнозирование изменений температурного режима грунта в районе города Норильска // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8, № 10. С. 51–65.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНОЙ БАЗАЛЬТОВО-ЗОЛОВОЙ ВАТЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПЛАЗМЕННЫМ СПОСОБОМ

Ф. Л. Чан[1*], С. Ю. Шишулькин[2]

[1] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
670013, Российская Федерация, Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в
[2] Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, Российская Федерация, Улан-Удэ, ул. Смолина, д. 24а
** tranluuphong66@gmail.com*

Рассмотрен опыт плавления смеси золошлака из мусорсжигательного завода и базальта в плазменном реакторе, определены энергозатраты, а также проведено сравнение полученных результатов с данными коэффициентов теплопроводности для минеральных волокон других авторов и справочными данными.

Проблема сбора, транспортирования, хранения и утилизации бытовых отходов все чаще поднимается не только в средствах массовой информации, но и звучит в решениях различных государственных и общественных организаций. Это не дань моде, а назревшая актуальная проблема. Мировой опыт по сжиганию мусора в печах оказался негативным. Построенные в конце XX в. мусоросжигательные заводы загрязняют воздух, воду и биосферу токсинными высокотоксичными соединениями. Фураны и диоксины выпадают с осадками, накапливаются в земле, попадают в пищу животных и человека. Биоразлагаемые материалы и выведение микроорганизмов, способных вырабатывать синтетические полимеры, – вопрос отдаленного будущего. Откладывать проблему утилизации отходов нельзя. Наиболее распространенными побочными продуктами сжигания являются зольный остаток и летучая зола, которые часто классифицируются как опасные отходы на основе выщелачивания тяжелых металлов [1]. В частности, летучая зола содержит значительную концентрацию токсичных тяжелых металлов, таких как ртуть, свинец, мышьяк, хром, а также органических загрязнителей, таких как диоксины. Витрификация является очень многообещающим процессом для безопасной обработки опасной золы и подавления выщелачивания тяжелых металлов; даже радиоактивные отходы, которые относятся к наиболее опасному классу отходов, могут быть успешно обработаны путем витрификации [2; 3].

Цели работы: переработка золошлаковых отходов в плазменном электродуговом реакторе, а также процесс плавления золошлака с получением минеральной ваты с последующим исследованием физических параметров, таких как коэффициент теплопроводности и средний диаметр волокон.

Для переработки золошлаков изготавливают шихту путем смешивания золошлака и базальта в следующем соотношении: 10 % золошлака мусоросжигательного завода КНР и 90 % Енхорского базальта.

Объектом исследования является действующая лабораторная установка производительностью до 40 кг/ч, состоящая из трехфазного дугового магнитного плазменного энергетического реактора и камеры волокнообразования. Температура внутри реактора в среднем составляет 2300 К.

Основой данной установки является плазменный энергетический реактор трехфазного переменного тока, в котором можно получать температуры от 1000 до 2500 °С с регулированием температуры в указанных пределах. Энергозатраты данной установки – в пределах 0,5–2 кВт/ч на 1 кг, что в 2–3 раза меньше, чем в традици-

© Чан Ф. Л., Шишулькин С. Ю., 2025

онных плавильных установках [4]. Установка является экологически чистой, поскольку исключаются вредные выбросы в атмосферу за счет регулирования температуры в плазменно энергетическом реакторе, а также предусматривается дополнительная вторая ступень с плазмотроном для дожигания (разложения) токсичных газовых выбросов в атмосферу, которые могут образовываться при получении расплава базальта и золошлаковых отходов.

После процесса плавления полученные волокна и расплав, оставшийся в реакторе, взвешивались с определением энергозатрат на процесс плавления.

Элементный анализ исходного сырья и конечных продуктов показал возможность производства качественной минеральной ваты с заданными теплофизическими характеристиками. Так, коэффициент теплопроводности волокон в среднем составил 0,059 Вт/м °С с энергозатратами на их производство 0,7 кВт/ч на 1 кг [5]. Полученные характеристики сравнимы с каменной ватой, что позволяет сделать вывод возможности применения данной ваты как изоляционного материала в строительстве.

Список источников

1. Wang Q. et al. Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators // Chemosphere. 2010. Vol. 78 (5). P. 626–630.
2. Tian S. et al. Behavior of heavy metals in the vitrification of MSWI fly ash with a pilot-scale diesel oil furnace // Procedia Environmental Sciences. 2012. Vol. 16. Pp. 214–221.
3. Tsakalou C. et al. Characterization and leachability evaluation of medical wastes incineration fly and bottom ashes and their vitrification outgrowths // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol. 6 (1). Pp. 367–376.
4. Чан Ф. Л., Буянтуев С. Л., Шишулькин С. Ю. и др. Исследование минеральных волокон, полученных путем смешения базальта и золошлаковой смеси с помощью электромагнитного технологического реактора // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 1 (88). С. 95–102.
5. Шишулькин С. Ю., Чан Ф. Л., Старинский И. В. и др. Энергозатраты процесса плавлении базальта Енхорского месторождения // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 3 (94). С. 109–117.

Круглый стол
Проблемы подготовки кадров теплофизического профиля

ВЛИЯНИЕ НА ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ ПО ФИЗИКЕ В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ШКОЛЕ

М. С. Лобасова

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79
MLobasova@sfu-kras.ru

Рассмотрены основные причины и последствия недостаточности числа абитуриентов, имеющих положительные результаты ЕГЭ по физике, на реформирование инженерного образования.

По итогам 2023 г. был подготовлен «Доклад о состоянии гражданского общества в Российской Федерации за 2023 год» [1], в котором в разделе 3 «Интеллектуальное лидерство» были обозначены задачи высшего образования. В п. 3.1 «Обеспечение технологического лидерства» указано, что для сферы образования в рамках реализации «Концепции технологического развития до 2030 года» глобальным вызовом является задача создания межуровневых бесшовных программ подготовки инженерных кадров по всем уровням образования, для всех критических отраслей. А в п. 3.3 «Совершенствование российской системы высшего образования» объявлено о формировании новой системы высшего образования, пилотный проект которой в первую очередь касается именно инженерного образования. Одним из проблемных мест в решении этих задач является слабая подготовка выпускников общеобразовательных школ по физике.

В настоящее время в РФ примерно 250 вузов (более 40 %) обучают студентов на инженерно-технических специальностях и направлениях, объединенных в группу «Инженерное дело, технологии и технические науки». В эту группу входят 23 УГСН (НПС), в т. ч. те, которые готовят специалистов теплофизического профиля. В 2024 и 2025 гг. на эти направления и специальности выделено около 250 тыс. бюджетных мест по всем уровням подготовки и формам обучения ежегодно, из них в 2025 г. на бакалавриат примерно 62 % мест, на специалитет – 16 %, или вместе примерно 193,8 тыс. мест. Абитуриенты всех этих УГСН (НПС) могут сдавать в качестве вступительного испытания (ВИ) физику. Кроме того, 6620 бюджетных мест выделено на УГСН (НПС) 03.03.00 «Физика и астрономия», из которых на бакалавриат и специалитет – 4 261 место, для поступления на которые обязательно следует сдавать физику.

Сейчас для поступления на направления и специальности группы УГСН (НПС) «Инженерное дело, технологии и технические науки» обязательными ВИ для выпускников школ являются ЕГЭ по профильной математике, а также обязательный для всех абитуриентов ЕГЭ по русскому языку. Третье ВИ должно быть выбрано абитуриентом не менее чем из двух дисциплин, предложенных вузом. Какие дисциплины самостоятельно установит вуз, зависит от конкретного направления подготовки бакалавров или специальности, в соответствии с разрешенным МОН перечнем дисциплин. Чаще всего (~ 90 %) третье ВИ предполагает выбор между физикой и информатикой.

В начале 2024 г. остро ставился вопрос о технологической независимости России, для чего и было начато реформирование высшего образования, в первую очередь инженерного. Один из шагов для решения этой задачи – начало реформирования школьного образования по физике. В совместном с Министерством просвещения проекте по развитию инженерного образования одно из направлений должно было обеспечить преемственность между получением знаний в школе и вузе за счет повышения качества школьного физического образования. Для этого обсуждалась возможность зако-

© Лобасова М. С., 2025

нодательного установления для инженерных направлений и специальностей четырех обязательных ВИ без всякого выбора, а именно включения в перечень ВИ физики и информатики вместе с математикой и русским языком.

В качестве первого шага было объявлено об уменьшении количества заданий в ЕГЭ по физике в 2024 г. для привлечения большего числа выпускников школ его сдавать. К сожалению, эта информация была опубликована после 1 февраля, даты, когда школьниками уже должны быть написаны заявления о выборе экзаменов.

В ноябре 2024 г. были опубликованы распоряжение Правительства РФ об утверждении комплексного плана мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года [2] и утверждено обсуждаемое ранее измерение перечня ВИ [3]. В качестве ВИ физика была добавлена не только в подавляющее большинство направлений и специальностей группы «Инженерное дело, технологии и технические науки», но и в значительное число направлений группы естественно-научных дисциплин, а также во многие другие. Вузам было предоставлено право добавить в перечень ВИ четвертый предмет как факультативный. Но в наборе 2025 г. снова оказалось невозможным реализовать это право, так как основное количество учащихся 11-х классов уже выбрали предметы для подготовки к ЕГЭ. Поэтому обязательной физика должна стать для всех вузов в 2026 г. [2].

Известно, что проблемы школьного обучения физике не в последнюю очередь связаны с недостаточным количеством учителей физики. Оказалось, что много лет абитуриенты направления подготовки бакалавров «Педагогическое образование» (готовящее учителей-предметников для общеобразовательных школ) не сдают в качестве ВИ тот предмет, учителем которого они хотят стать. Поэтому педвузы часто практиковали «двойной» диплом с квалификациями «учитель физики и информатики», «учитель физики и английского языка» или даже «учитель физики и ОБЖ», привлекая абитуриентов «модными» предметами на плохо заполняемые бюджетные места для учителей физики. В результате обладатели таких квалификаций редко работают в школе учителями физики, предпочитая ей информатику либо вообще не приходят в школу. Для исправления этой ситуации тем же приказом Министерства науки и высшего образования [3] был пересмотрен перечень ВИ и для абитуриентов педагогических направлений и специальностей. Но только в 2027 г. вузы обязаны будут принимать профильный предмет в качестве ВИ [2].

Кроме того, в течение 2024 г. широко обсуждалась и продолжает обсуждаться сейчас проблема ЕГЭ как формы итоговой аттестации школьников, вплоть до его отмены. За более чем 20-летний период существования ЕГЭ, он многократно критиковался и периодически трансформировался как по форме проведения, так и по содержанию. Итоговая аттестация менялась вместе с изменением содержания школьной программы, в т. ч. по физике и по математике. Оба этих предмета существенно изменились по содержанию, а в 10-х и 11-х классах физику несколько последних лет вообще можно было не изучать. В результате всех этих преобразований за 20 лет существенно сократилось количество выпускников школ, имеющих возможность самостоятельно подготовиться к ЕГЭ по физике, в то время как число бюджетных мест, для поступления на которые он нужен, в ближайшее время кратно возрастет. Тем не менее сейчас обсуждается введение в ЕГЭ по физике и по химии экспериментальной части, что еще больше его усложнит для учащихся, а также потребует от школ значительного переоборудования кабинетов физики и химии и подготовки новых педагогических кадров.

Возрастающий разрыв между базовым уровнем физики в школе и ее начальным уровнем в инженерном вузе приводит к трудностям в освоении студентами образовательной программы, особенно если абитуриент не изучал физику в 10 и 11 классах и не сдавал ЕГЭ по физике. В одной группе собираются студенты со значительной раз-

ницей в начальной подготовке, поэтому их совместное обучение также осложняется. Для стандартных групп численностью по 25–30 студентов это означает, что из поля зрения преподавателя неизбежно выпадают как самые слабые, так самые сильные студенты. И те, и другие могут потерять интерес, как к предмету, так и к будущей специальности.

Список источников

1. Доклад о состоянии гражданского общества в Российской Федерации за 2023 год. – М. : Общественная палата Российской Федерации, 2023. ISBN 978-5--6050462-1-9.

2. Распоряжение Правительства РФ от 19.11.2024 № 3333-р.

3. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ № 820 от 27.11.2024 «Об утверждении перечня вступительных испытаний при приеме на обучение по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата и программам специалитета».