ЕНИСЕЙСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Тезисы докладов
I Всероссийской научной конференции
с международным участием

Красноярск, 28–31 марта 2023 г.

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

Енисейская теплофизика

Тезисы докладов
I Всероссийской научной конференции
с международным участием

Красноярск, 28–31 марта 2023 г.

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2023

УДК 536.2(082)
ББК 22.317.1я43
Е632

Ответственный за выпуск – Дмитрий Викторович Платонов

Е632 **Енисейская теплофизика** : тез. докл. I Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Красноярск, 28–31 марта 2023 г. [Электронный ресурс] / отв. за вып. Д. В. Платонов. – Электрон. дан. (20 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2023. – 560 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 978-5-7638-4846-5

Представлены тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская теплофизика», проходившей в Красноярске с 28 по 31 марта 2023 года.

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(082)
ББК 22.317.1я43

ISBN 978-5-7638-4846-5

Электронное научное издание

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

Подписано в свет 10.07.2023. Заказ № 18885
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 С. В., академик РАН (Новосибирск)

Сопредседатели:

Минаков А. В., д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

Кулагин В. А., д-р техн. наук (Красноярск)

Члены программного комитета:

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)
Куперштох А. Л., д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)
Маркович Д. М., академик РАН (Новосибирск)
Москвичев В. В., д-р техн. 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)
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)
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)**
Feng-Chen Li, Prof. Dr. **(Китай)**
Miloš Stanković, Prof. Dr. **(Сербия)**

Ученый секретарь конференции: Платонов 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)

НОЦ «Енисейска Сибирь»

ЗАО «НОРСИ-ТРАНС»

ООО «Сигма-про»

ООО «ТеСИС»

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 5

СЕКЦИЯ 1 «Теплофизические проблемы теплоэнергетики» 19

СЕКЦИЯ 2 «Строительная теплофизика» 89

СЕКЦИЯ 3 «Методы управления теплообменом» 152

СЕКЦИЯ 4 «Возобновляемая и альтернативная энергетика» 207

СЕКЦИЯ 5 «Теплофизика природных явлений» 251

СЕКЦИЯ 6 «Теплофизика и гидродинамика двухфазных потоков» 306

СЕКЦИЯ 7 «Гидродинамика и теплофизика в задачах нефтегазовой индустрии» 358

СЕКЦИЯ 8 «Теплофизика новых материалов» 403

СЕКЦИЯ 9 «Теплофизика процессов горения» 448

СЕКЦИЯ 10 «Теплофизические вопросы получения новых видов топлива» 479

Круглый стол «Проблемы подготовки кадров теплофизического профиля» 534

Школьная секция 538

Пленарные доклады

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А. А. Аксенов*

ООО «ТЕСИС»
127083, Российская Федерация, Москва, ул. Юннатов, 18, оф. 703
andrey@tesis.com.ru

В докладе представлен программный комплекс FlowVision [1], предназначенный для автоматизации инженерных расчетов для решения различных задач вычислительной физики. FlowVision имеет автоматический построитель неструктурированной локально-адаптивной сетки с возможностью разрешения тонких пограничных слоев. В нем реализован двухуровневый параллелизм.

Программный комплекс FlowVision обладает широким спектром физико-математических моделей – турбулентности (URANS, LES, ILES), горения, массопереноса с учётом химических превращений и радиоактивного распада, электромагнитогидродинамики, акустики, радиационного теплообмена. Особенность заложенных методов расчета заключается в том, что FlowVision позволяет решать задачи от несжимаемого до гиперзвукового режима за счет использования всескоростного метода расщепления по физическим переменным для решения уравнений Навье – Стокса [2].

FlowVision позволяет моделировать многофазные течения, обтекание подвижных относительно области расчета тел, вращающиеся машины, взаимодействия жидкости и конструкций (сопряжение с конечно-элементными кодами). В данной работе показаны практические примеры решения различных междисциплинарных задач: посадка космического корабля на воду при торможении ракетными двигателями, движение плазмы в электроразряднике, моделирование работы человеческого сердца с искусственными и живыми клапанами, а также другие задачи.

Список литературы

1. Аксёнов А. А. FlowVision: Индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 1. С. 5–20.

2. Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Savitskiy D. V., Bartenev G. Y., Pokhilko V. I. Simulation of 3D flows past hypersonic vehicles in FlowVision software // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653, no. 012072.

КОНТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ В СТР КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ю. Ф. Майданик*

Институт теплофизики Уральского отделения РАН
620016, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
lhtd@itpuran.ru

Контурные тепловые трубы являются пассивными двухфазными теплопередающими устройствами, работающими по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и использующими «капиллярный механизм» для прокачки теплоносителя. Основными компонентами устройства являются испаритель с капиллярно-пористой структурой и конденсатор, которые сообщаются посредством гладкостенных паропровода и конденсатопровода. Эти устройства обладают высокой теплопередающей способностью, низким термическим сопротивлением, способны работать при любом положении в поле сил тяжести и хорошо адаптируются к различным условиям размещения и эксплуатации. Они нашли широкое применение в системах терморегулирования и системах охлаждения электроники различного назначения.

Выделение избыточного тепла является одним из наиболее распространенных процессов, сопровождающих работу различных технических объектов. Характерным примером являются центральные и графические процессоры компьютеров, тиристоры, IGBT-модули, светодиоды и т. д., которые можно объединить термином «электроника». Это тепло необходимо отводить, чтобы обеспечить допустимую рабочую температуру указанных объектов, которая обычно находится в пределах 60–100 °С. Поскольку плотность тепловых потоков, рассеиваемых такими устройствами, может достигать десятков ватт на квадратный сантиметр, то задача отвода тепла становится экстремально сложной в условиях сильно лимитированной разности температур между источником и стоком тепла, их удаленностью друг от друга, а также габаритно-массовых ограничений. Эффективно решать указанную задачу способны системы охлаждения с удаленным стоком тепла, в которых ключевую роль играют свойства элемента, обеспечивающего тепловую связь между источником и стоком тепла. Он должен обладать достаточно низким термическим сопротивлением, хорошо сопрягаться с источником и стоком тепла, легко конфигурироваться и не потреблять дополнительной энергии. Именно такими свойствами обладают контурные тепловые трубы (КТТ), которые в свое время были созданы для систем терморегулирования (СТР) космических аппаратов, но затем нашли широкое применение в системах охлаждения электроники различного назначения [1–5].

Первые в мире летные эксперименты с КТТ в космосе были проведены в 1989 году на борту космических аппаратов (КА) «Горизонт» (НПО «Прикладной механики») и КА «Гранат» (НПО им. А. С. Лавочкина), а реальное использование их началось с 1994 года на борту КА «Обзор» (НПО «Полет»). «Крайний» запуск российского КА «Электра-Л» с восемью КТТ в бортовой СТР состоялся 07.02.2023. В настоящее время контурные тепловые трубы являются штатными компонентами систем терморегулирования как российских, так и зарубежных космических аппаратов. На рубеже 2000-х г. в связи с бурным развитием микроэлектроники были созданы миниатюрные КТТ с цилиндрическими испарителями диаметром 5–10 мм и трубопроводами для пара и жидкости диаметром 2–4 мм. Такие устройства способны передавать до 400 Вт на расстояние до нескольких метров. Наиболее эффективным теплоносителем для них является аммиак. Были разработаны также медь-водяные КТТ с плоскими испарителями толщиной 3–10 мм и трубопроводами диаметром 3–6 мм, мощность которых может достигать 1 кВт и более. В настоящее время миниатюрные КТТ нашли практическое применение в системах охлаждения персональных и промышленных компьютеров, компьютерных серверов, лазеров и другой электроники. Освоено также производство этих устройств на российском предприятии ООО «Теркон-КТТ». На рис. 1 представлена принципиальная схема и внешний вид некоторых образцов КТТ.

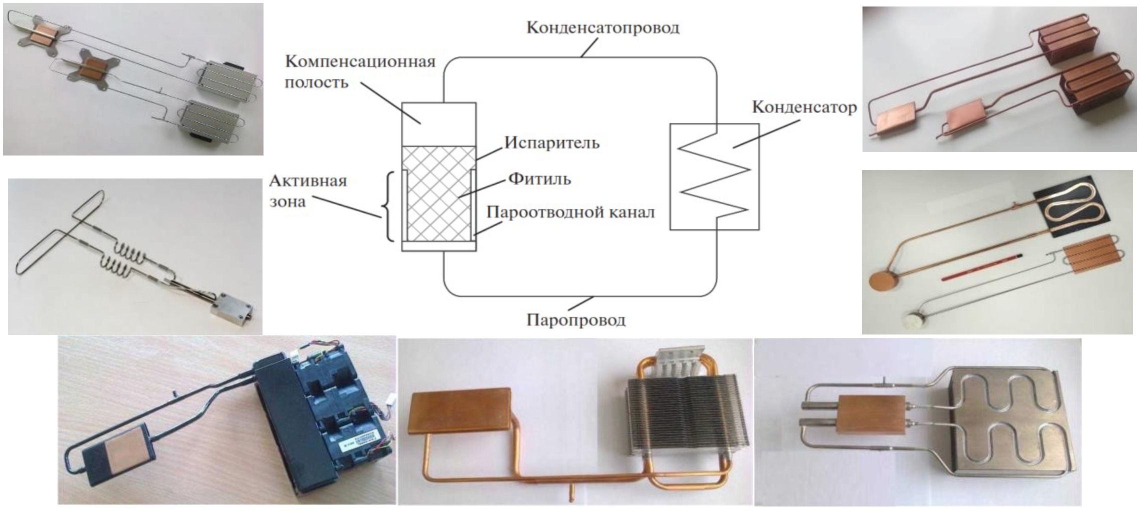


Рис. 1. Принципиальная схема и внешний вид КТТ

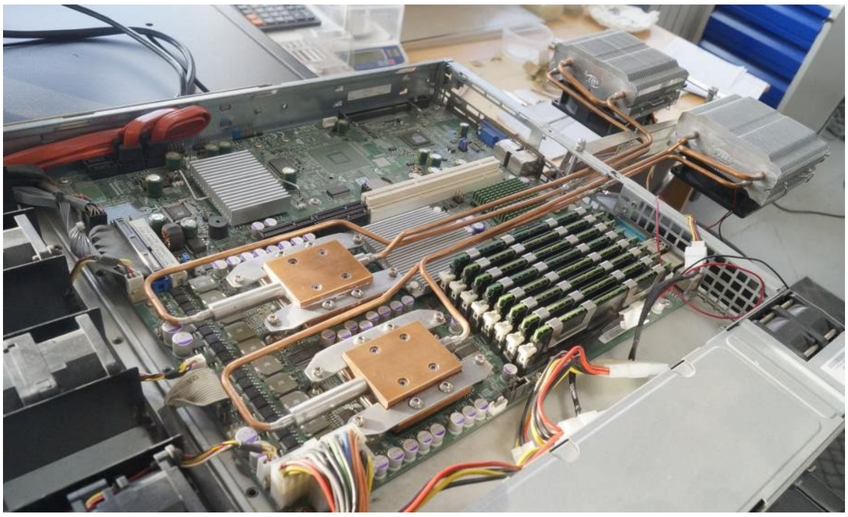


Рис. 2. Компьютерный сервер с контурными тепловыми трубами

На рис. 2 в качестве одного из характерных примеров показан компьютерный сервер, где контурные тепловые трубы с 10-миллиметровым цилиндрическим испарителем используются для отвода тепла от центральных процессоров к удаленным стокам тепла.

Список литературы

1. Maydanik Yu. F. Rewiew: Loop heat pipes // Appl. Therm. Eng. 2005. Vol. 25. Pp. 635–657.

2. Майданик Ю. Ф. Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Инновации. 2003. № 5 (62). С. 83–86.

3. Maydanik Yu. F., Vershinin S. V., Chernyshova M. A. Comparison tests of loop heat pipes with flat evaporators of different types // Heat Mass Transfer. 2022. Vol. 197. P. 123–316.

4. Васильев Л. Л., Майданик Ю. Ф. Двухфазные теплопередающие контуры // Тепловые процессы в технике. 2022. № 10, т. 14. С. 434–446.

5. Maydanik Y., Chernysheva M., Vershinin S. High-capacity loop heat pipes with flat evaporators for efficient cooling systems // Thermophys. Heat Transfer. 2020. Vol. 34. Pp. 465–475.

МОНИТОРИНГ, ОЦЕНКА РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТЬ ГЭС АНГАРО-ЕНИСЕЙСКОГО КАСКАДА

В. В. Москвичев, А. П. Черняев, Е. В. Анискович*

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярский филиал
660049, Российская Федерация, Красноярск, пр. Мира, 53

Вопросы безопасности крупных ГЭС, являющихся критическими элементами инфраструктуры России, регламентируются федеральными законами, требованиями и положениями государственных стандартов, регламентов и отраслевых нормативных документов. Гидрооборудование ГЭС, как правило, имеет значительные запасы прочности, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию в течение десятков лет. Однако статистика повреждений и отказов гидротурбин показывает, что только за счет избыточной прочности конструкции обеспечить длительную безаварийную работу турбин невозможно.

В этой связи представлены результаты исследований:

1) технического состояния гидротурбинного оборудования Красноярской ГЭС по данным диагностики повреждений рабочих колес, включая оценку остаточного ресурса;

2) причин разрушения резьбовых соединений крепления крышки гидротурбины Саяно-Шушенской ГЭС;

3) причин трещинообразования в колоннах статора Богучанский ГЭС;

4) обоснования нормативной базы безопасности и защищенности ГЭС от тяжелых аварий;

5) обоснованных оценок опасностей и риска аварий ГЭС Ангаро–Енисейского каскада.

При проведении исследований использованы данные технического диагностирования гидрооборудования, проведенного в соответствии с требованиями нормативных документов методами неразрушающего контроля (визуально-измерительный контроль, ультразвуковая дефектоскопия и толщинометрия, контроль проникающими веществами) с определением характеристик механических свойств и остаточных напряжений. Ресурсные характеристики рабочих колес гидротурбин определялись расчетно-экспериментальными методами классической усталости и механики разрушения. Оценки риска выполнены на основе представлений теории безопасности технических систем.

При обосновании нормативной базы безопасности ГЭС использованы методы механики деформированного твердого тела, численные методы анализа предельных напряженных состояний, требования нормативных документов в области безопасности.

ПАССИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНОМ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

В. И. Терехов*, В. В. Терехов*

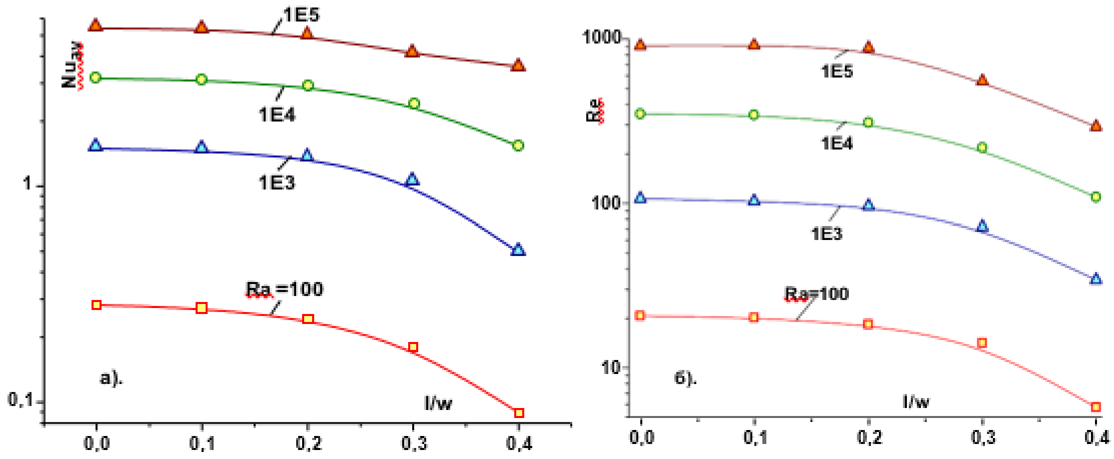
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
**terekhov@itp.nsc.ru*

Представлено современное состояние исследований пассивных методов управления процессами теплообмена при свободной конвекции. Рассмотрен широкий класс задач по изучению теплообмена в открытых и замкнутых прослойках между параллельными пластинами при наличии одиночных ребер и их системы, цилиндрических траншей и других преград. Анализируются результаты исследований градиентных (конфузорных и диффузорных) свободно-конвективных течений. Обсуждаются проблемы использования поверхностных вихрегенераторов для интенсификации и подавления теплообмена в энергетических установках различного назначения.

Проблема интенсификации процессов теплообмена при свободной конвекции является одной из ключевых в широком спектре современных технологий. Особую остроту данная проблема приобрела при разработке современных устройств электронной техники, проектировании систем отопления и кондиционирования, когда использование вынужденной конвекции затруднено либо полностью исключается. Важной областью применения результатов данного направления является дизайн вытяжных и дымовых труб, а также строительных теплоизолирующих систем с вентилируемыми каналами. При этом, как это отмечается в большом числе исследований, течения, формируемые стратифицированными по плотности средами, очень трудно поддаются интенсификации теплоотдачи и прирост теплообмена, как правило, обеспечивается развитием площади теплоотдающих поверхностей. Очевидно, что этот традиционный способ усиления теплосъёма имеет пределы, диктуемые габаритами тепловых радиаторов, их массой, стоимостью и т. д. По этой причине в последние годы можно наблюдать огромный интерес к поискам новых схем охлаждающих радиаторов (heat sinks) применительно к бурно развивающейся области тепловых технологий электронных гаджетов, компьютеров, смартфонов и других изделий. Работ в этом направлении и особенно прикладной направленности в литературе имеется большое количество. В то же время отмечается дефицит исследований фундаментального характера, на основании которых можно было бы проводить оптимизационный анализ и поиск наиболее эффективных схем охлаждения.

Типичным единичным элементом радиатора охлаждения, где происходит сброс теплоты в окружающую среду, является промежуток между теплопроводящими рёбрами, образующими прослойку, в которой формируется свободно-конвективное течение. Такое течение для условий охлаждения электроники является, как правило, ламинарным, и оно, несмотря на кажущуюся простоту, является исключительно сложным и многофакторным. Для относительно простого классического случая вертикальных прослоек с параллельными стенками при постоянных и равных температурах стенок (или тепловых потоков) получены обобщающие зависимости для интегральной теплоотдачи [1–3], позволяющие проводить многопараметрический анализ теплопереноса для сложных систем охлаждения.

В отличие от режимов вынужденной конвекции, где установка ребер является наиболее распространенным методом интенсификации теплообмена, при свободной конвекции оребрение стенок приводит к сильному снижению теплоотдачи. Это видно на рис. 1, где представлены данные работы [4]. Основной причиной подавления теплообмена является рост гидравлических потерь за счет поджатия потока ребрами, в результате чего значительно снижается расход газа через канал (конвективная тяга) – рис. 1, *б*. Установка теплопроводящих ребер, как правило, не меняет этой тенденции [5].



а б

Рис. 1. Влияние высоты ребра на теплообмен (*а*) и конвективную тягу (*б*) в вертикальном канале

Столь сильное влияние преград на скорость подъемного течения свидетельствует о том, что для целей интенсификации теплообмена использование подобных вихрегенераторов нерационально. Чтобы не влиять на гидравлические потери, они не должны сильно выступать за пределы теплообменной пластины или вовсе должны быть утоплены внутрь пластины. В качестве таких интенсификаторов были выбраны канавки полуцилиндрической формы различной глубины, которые отличаются высокой эффективностью при вынужденной конвекции. Расчеты показали, что принципиального улучшения теплообмена при использовании каверн цилиндрической формы не происходит. Показано, что выигрыш в теплоотдаче за счет отрыва потока компенсируется сильным снижением интенсивности теплообмена внутри канавок.

Большое внимание в последнее время уделяется поиску оптимальных форм каналов. Наиболее простыми из них, кроме упоминаемых выше каналов с параллельными стенками, являются конфузорные и диффузорные каналы. Угол раскрытия (сужения) стенок может оказывать сильное влияние как на структуру течения, так и на закономерности теплоотдачи. Об этом говорят полученные предварительные результаты [6].

В докладе обсуждается широкий круг проблем управления теплообменными характеристиками в режимах термогравитационной конвекции.

Исследование поддержано РНФ № 21-19-00162.

Список литературы

1. Elenbaas W. Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection // Physica, IX/1, pp. 2–28, 1941.

2. Bar-Cohen A., Rohsenow W. M. Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates // J. Heat Transfer, vol. 106, pp. 116–123, 1984.

3. Olsson C.-O. Prediction of Nusselt Number and Flow Rate of Buoyancy Driven Flow Between Vertical Parallel Plates // J. Heat Transfer, vol. 126, pp. 97–104, 2004.
4. Terekhov V. I., Ekaid A. L. and Yassin K. F. Laminar Free Convection Heat Transfer and Separated Flow Structure in a Vertical Channel with Isothermal Walls and Two Adiabatic Opposing Fins// J. Eng. Thermophysics, Vol. 26, No. 3, pp. 339–352, 2017.
5. Терехов В. В., Терехов В. И. Теплообмен в высокой вертикальной прослойке с оребрением одной из боковых стенок // ТВТ. 2006. Т. 44, № 3. С. 439–444.
6. Терехов В. И., Экаид А. Л., Ясин Х. Ф. Ламинарная свободная конвекция в вертикальном конвергентном канале // Тезисы докладов 38-го Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск, 2022. С. 242.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А. Н. Тугов*

ОАО «ВТИ»
115280, Российская Федерация, Москва, ул. Автозаводская, 14
ANTugov@vti.ru

Показано, что уголь по-прежнему является (и в среднесрочной перспективе останется) основным первичным источником для выработки электроэнергии. Отмечается, что обновление угольной генерации происходит преимущественно за счет современных энергоблоков (ССКП, ЦКС). Благодаря потенциальной возможности улавливания CO_2 в XXI веке усилился интерес к ПГУ с ВЦГ.

Основной тенденцией в электроэнергетике в настоящее время является уменьшение выбросов углекислого газа за счёт изменения структуры производства электроэнергии в пользу CO_2-нейтральных источников энергии, прежде всего, возобновляемых (к CO_2-нейтральным источникам энергии относят также атомную и гидроэнергетику). В результате в XXI веке структура мировой электроэнергетики существенно поменялась: в 2021 г. CO_2-нейтральные источники энергии суммарно выработали более 38 % электроэнергии, т. е. больше, чем угольные ТЭС (36 %) [1]. Тем не менее общий объем электроэнергии из угля постоянно растет. Сокращение угольной электрогенерации в некоторых странах Евросоюза и США компенсируется стабильным ростом в азиатских странах, особенно в Китае и Индии.

В 2022 г. уголь энергетически использовался в 75 странах мира. Примерно 88 % мирового производства угольной электроэнергии приходится на девять стран: Китай, Индию, США, Японию, Южную Корею, ЮАР, Индонезию, Германию и Россию, причем три первых обеспечивают около 75 % общей выработки (табл. 1).

Таблица 1

Производство электроэнергии из угля в лидирующих по этому показателю странах

Страна	Общая выработка электроэнергии по годам, ТВт·ч			Установленная электрическая мощность в 2022 г., МВт
	2000 г.	2015 г.	2021 г.	
Мир	5 715	9 135	10 042	2 082 583
Китай	1 060	4 046	5 383	1 092 889
Индия	390	1 007	1 250	234 256
США	1 966	1 352	899	212 042

Рост объемов выработки электроэнергии из угля в мире в абсолютном значении обеспечивается устойчивым увеличением суммарной мощности угольных ТЭС, которая сейчас составляет более 2,0 ТВт. Примерно 85 % всех электрогенерирующих угольных мощностей находится в странах-лидерах (табл. 1), а на долю Китая, США и Индии приходится 73 %.

Некоторое сокращение темпов роста угольных мощностей в последние годы (рис. 1) обусловлено интенсивным выводом из эксплуатации устаревшего оборудования [2]. В то же время ввод новых мощностей осуществлялся в основном за счет строительства новых современных энергоблоков сверхкритического давления (СКД) и энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП). За последние 10 лет в мире запущено в эксплуатацию около 230 ГВт энергоблоков СКД (33 % от общего количества введенных в эксплуатацию в этот период) и примерно 250 ГВт энергоблоков ССКП (36 %). Примерно 450 таких энергоблоков общей мощностью около 400 ГВт работает уже сейчас более чем в 20 странах. Примерно 80 % блоков ССКП эксплуатируется в Китае. Блоки ССКП характеризуются высокой экономичностью и минимальным воздействием на окружающую среду [3].

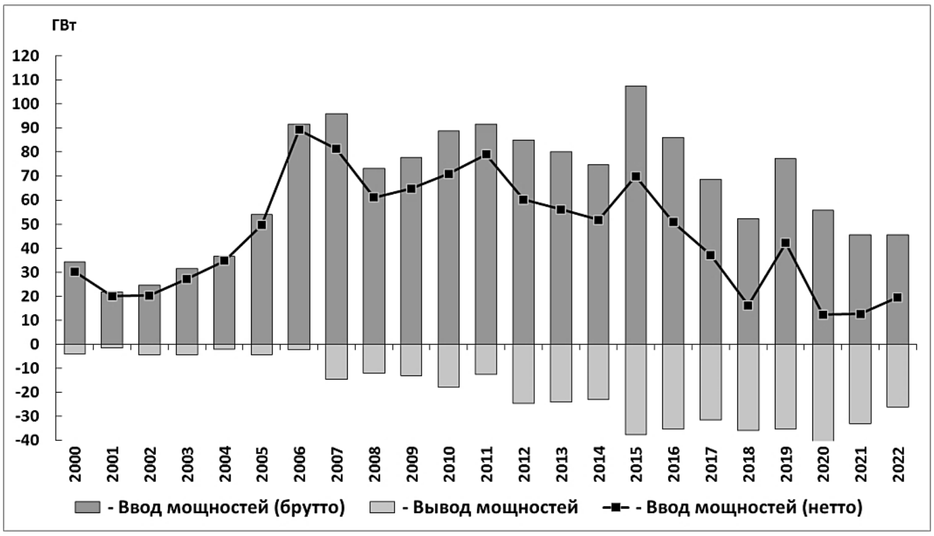


Рис. 1. Ввод и вывод мощностей угольных ТЭС в мире, ГВт
(ввод мощностей-нетто – разница между их вводом и выводом)

За счет вывода устаревшего оборудования и ввода современного существенно поменялась структура угольной генерации в мире. ТЭС с энергоблоками ССКП и СКД составляют 45 % от общей мощности угольных ТЭС, в некоторых странах еще больше (в Корее – 88,5 %, в Японии – 75 %, в Китае – 56 %).

Существенно «омолодился» и средний возраст угольных ТЭС, особенно в Китае: так, доля мощностей, проработавших менее 20 лет, составляет 65 % (в Китае – 86 %), более 30 лет – 24 % (в Китае – 3 %).

В основном на угольных ТЭС эксплуатируют пылеугольные блоки. В то же время с конца XX века в мире начали активно использовать технологию сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Широко используют котлы с ЦКС в Китае. В Европе наибольший прогресс применения котлов с ЦКС достигнут в Польше. Крупные энергоблоки с котлами с ЦКС строятся в Южной Корее.

В некоторых странах для производства электроэнергии из угля используют парогазовые установки с внутрициклой газификацией (ПГУ с ВЦГ). В настоящее время суммарная электрическая мощность нетто всех ПГУ с ВЦГ оценивается на уровне 2,8 ГВт. Сейчас наибольший интерес к ПГУ с ВЦГ проявляют страны азиатского региона (Япония, Корея, Китай). В XXI веке интерес к ПГУ с ВЦГ усилился благодаря потенциальной возможности улавливания CO_2.

Таким образом, в валовой выработке электроэнергии уголь по-прежнему является и в среднесрочной перспективе останется основным первичным источником. По оценкам Международного энергетического агентства (IEA) к 2024 г. производство электроэнергии из угля вырастет на 0,3 %, достигнув 10415 ТВт · ч, а в 2040 г. доля выработки электроэнергии на угольных электростанциях, хотя и упадет до 25 % от общей выработки, однако её абсолютный объем увеличится на 3 %.

Список литературы

1. Тугов А. Н., Артемьева И. В. Производство электроэнергии в мире: тенденции и достигнутые в 2021 г. результаты // Электрические станции. 2022. № 1. С. 2–11.

2. Тугов А. Н., Артемьева И. В. Состояние угольных электрогенерирующих мощностей в мире // Энергохозяйство за рубежом. 2021. № 6. С. 1–24.

3. Сомова Е. В., Тугов А. Н., Тумановский А. Г. Современные угольные энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 2. С. 5–23.

ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

П. Г. Фрик[*], И. В. Колесниченко,
А. Д. Мамыкин, Р. И. Халилов[*]

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614018, Российская Федерация, Пермь, ул. Ак. Королева, 1
[*]frick@icmm.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и прямого численного моделирования турбулентной конвекции жидкого натрия в цилиндрических объемах с различным аспектным отношением и различной ориентацией по отношению к силе тяжести. Изучена зависимость числа Нуссельта от угла наклона и числа Рэлея. Исследована динамика возникающей в полости крупномасштабной циркуляции металла.

С большими объемами жидкого, неоднородно нагретого металла приходится иметь дело в различных металлургических аппаратах, а также в системах охлаждения, использующих жидкометаллические теплоносители. Адекватное описание соответствующих систем требует понимания особенности конвективного турбулентного тепломассопереноса в жидкостях с низким числом Прандтля. Выполненные в ИМСС УрО РАН экспериментальные исследования показали, что возникающая крупномасштабная конвекция металла оказывает существенное воздействие на эффективный теплоперенос, причем зависимость числа Нуссельта от наклона полости оказалась значительно сильнее, чем в жидкостях с умеренными числами Прандтля [1].

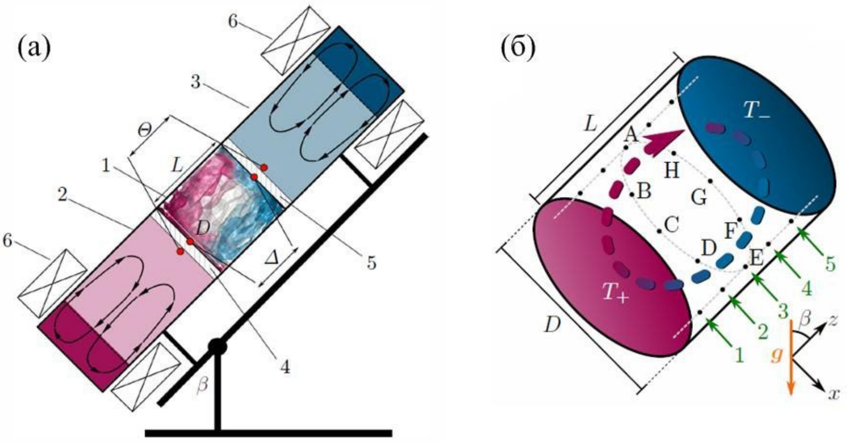


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и расположение и маркировка термопар внутри исследуемой области (б)

В докладе представлены результаты экспериментального исследования и прямого численного моделирования турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре с длиной, равной диаметру. Экспериментальная установка состоит из замкнутой цилиндрической конвективной ячейки, ограниченной двумя теплообменниками. Ячейка и теплообменники изготовлены из трубы из нержавеющей стали и заполнены жидким натрием. Длина конвективной ячейки 216 мм. Особенностью теплообменников является то, что вместо традиционных толстых медных пластин используются тонкие пластины, интенсивно омываемые жидким натрием [2]. В конвективной ячейке на расстоянии 17 мм от стенки установлено 28 термопар (см. рис. 1), используемых как для измерения температурных осцилляций, так и для оценки средних по времени и объему скоростей крупномасштабной циркуляции (КМЦ) натрия методом кросскорреляционной анемометрии. Угол наклона полости изменялся от 0 до 90° с шагом 10°.

Результаты экспериментов сравнивались и дополнялись результатами прямого численного моделирования, выполненного путем решения обезразмеренных уравнений Навье – Стокса в приближении Буссинеска с использованием вычислительного кода «GOLDFISH» [3].

Численно и экспериментально построены зависимости числа Нуссельта от числа Релея. Показано, что все данные дают близкую степенную зависимость, хотя абсолютные значения безразмерного теплопотока в эксперименте систематически ниже, чем в расчетах. Это можно объяснить двумя факторами. Во-первых, в расчетах используются идеальные граничные условия первого рода (постоянная температура), в то время как в реальном эксперименте жидкий металл безусловно влияет на локальную температуру поверхности, снижая перепад температуры и, соответственно, теплопоток. Во-вторых, в эксперименте невозможно определить точную температуру жидкого металла у поверхности теплообменника, а измеряемая температура самих пластин, на поверхности которых всегда есть некая окисная пленка, приводит к завышению числа Релея.

Проведено систематическое исследование динамики крупномасштабной циркуляции в полости. Показано, что структура течения и интегральные характеристики процесса существенно зависят от угла наклона полости. При всех положениях полости как в эксперименте, так и в расчетах в полости формируется крупномасштабная циркуляция, а при β от 0 до 36° наблюдаются интенсивная осцилляция потока и торсионные колебания. Экспериментальные и численные результаты хорошо согласуются между собой.

Список литературы

1. Васильев А. Ю., Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Фрик П. Г., Халилов Р. И. Рогожкин С. А., Пахолков В. А. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // Журнал Технической Физики. 2015. Т. 85 (9). С. 45–49.

2. Khalilov R., Kolesnichenko I., Pavlinov A., Mamykin A., Shestakov A., Frick P. Thermal convection of liquid sodium in inclined cylinders // Phys. Rev. Fluids. 2018. Vol. 3 (4). P. 43–50.

3. Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Mandrykin S., Pavlinov A., Shestakov A, Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the cell inclination on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // Journal of Fluid Mechanics, vol. 884, A18, 2020.

Секция 1
«Теплофизические проблемы теплоэнергетики»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К. Е. Азанов*

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
azanovkonstantin285@gmail.com

В статье описан процесс проектирования с использованием параметризации на примере элементов оборудования электрических станций в CAD-среде Siemens NX, приведены доводы в пользу эффективности данного подхода для снижения стоимости проектирования и повышения надёжности проектируемого оборудования.

Параметрическое моделирование в большинстве CAD-сред (Siemens NX, КОМПАС 3D, SolidWorks) – это подход к построению 3D-моделей изделия, при котором оно представляется в виде ряда геометрических параметров, значения которых определяются в результате произведённых расчётов (прочностного, гидравлического, теплового) или же зависят от значений смежных параметров той же геометрии (например, длина участка трубопровода будет определяться n-м количеством его диаметров). Параметрическое моделирование может быть применено для геометрии любой сложности, независимо от назначения будущего изделия.

Рассмотрим параметрическую модель водяного экономайзера парового котла БКЗ-420-140, работающего на угле Берёзовского месторождения, марки 2Б. Модель состоит из непосредственно трёхмерной модели в среде Siemens NX и внешнего файла Microsoft Excel с исходными данными и расчётом геометрических характеристик. Номинальные характеристики пакета экономайзера приведены ниже (рис. 1).

Геометрические параметры

Параметр	Значение
Наружный диаметр труб $d_н$, м	0,032
Толщина стенки труб $\delta_{ст}$, м	0,006
Поперечный шаг труб s_1, м	0,096
Продольный шаг труб s_2, м	0,054
Глубина конвективной шахты $a_{кш}$, м	5,61
Ширина топочной камеры $b_т$, м	15,37
Число труб в ряду z_1, шт.	58
Число рядов по ходу газов z_2, шт.	8,00
Высота пакета ВЭК h, м	0,432

Определяющие параметры

Параметр	Значение
Коэффициент теплопередачи k, Вт/(м^2·К)	110
Тепловосприятие водяного экономайзера $Q^б$, кДж/кг	1216
Температурный напор в водяном экономайзере Δt, °С	400
Расчётный расход топлива на котел $B_р$, кг/с	23,1
Площадь поверхности нагрева F, м^2	638,4
Длина каждого змеевика $l_{зм}$, м	109,5

Рис. 1. Номинальные геометрические и расчётные параметры ВЭК

Ввиду того, что в файл Excel внесён тепловой расчёт котельного агрегата [1], изменение исходных данных или выбранной режимной характеристики ведёт к пересчёту геометрических параметров данной 3D-модели (рис. 2) с дальнейшим её перестроением. Например, снизив температурный напор в экономайзере с 400 до 300 °С получаем закономерное увеличение необходимой площади поверхности теплообмена и, следовательно, увеличение высоты пакета и числа труб по ходу газов (рис. 2). Сравнение трёхмерной модели до и после перестроения приведено ниже (рис. 3).

	Геометрические параметры	
2	Параметр	Значение
3	Наружный диаметр труб $d_н$, м	0,032
4	Толщина стенки труб $\delta_{ст}$, м	0,006
5	Поперечный шаг труб s_1, м	0,096
6	Продольный шаг труб s_2, м	0,054
7	Глубина конвективной шахты $a_{кш}$, м	5,61
8	Ширина топочной камеры $b_т$, м	15,37
9	Число труб в ряду z_1, шт.	58
10	Число рядов по ходу газов z_2, шт.	10,00
11	Высота пакета ВЭК h, м	0,54

Определяющие параметры	
Параметр	Значение
Коэффициент теплопередачи k, Вт/(м^2·К)	110
Тепловосприятие водяного экономайзера $Q^б$, кДж/кг	1216
Температурный напор в водяном экономайзере Δt, °С	300
Расчётный расход топлива на котел $B_р$, кг/с	23,1
Площадь поверхности нагрева F, м^2	851,2
Длина каждого змеевика $l_{зм}$, м	146,1

Рис. 2. Геометрические и расчётные параметры ВЭК при изменении температурного напора

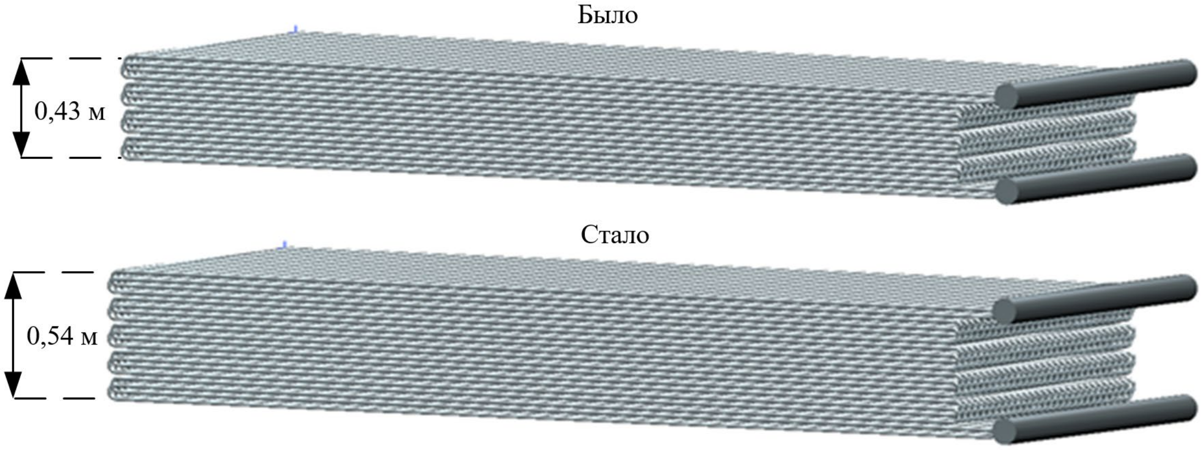


Рис. 3. Сравнение трёхмерной модели до и после пересчёта геометрии

Аналогичным образом построим параметрическую модель ротора высокого давления паровой турбины К-300-240. Автоматизировав тепловой расчёта проточной части [2] в документе Microsoft Excel, рассмотрим сценарий реконструкции, при котором увеличилась температура острого пара на входе в турбину с 540 до 560 °С. Расчёт производился на наибольший КПД оборудования. По итогу расчёта и перестроения геометрии получаем увеличение числа рабочих ступеней (рис. 4) ввиду увеличения теплоперепада ЦВД.

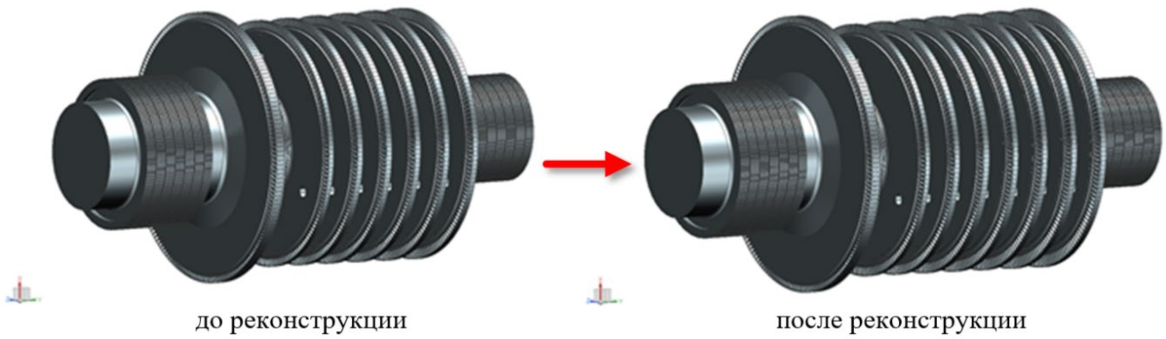


Рис. 4. Ротор высокого давления турбины К-300-240

Таким образом, изменив оно лишь значение в файле расчёта, автоматически получаем новую геометрию. В первом случае увеличилась необходимая площадь поверхности теплообмена, во втором – необходимое число ступеней.

Параметрическое моделирование при правильной настройке модели позволяет полностью исключить из процесса проектирования человеческий фактор, повысив тем самым надёжность конечного изделия на 20 % [3] и сократив трудозатраты на разработку проектной и конструкторской документации на 70 % [4].

Список литературы

1. Бойко Е. А., Деринг И. С., Охорзина Т. И. Котельные установки и парогенераторы. Тепловой расчёт парового котла : учеб. пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 96 с.

2. Костюк А. Г., Фролов В. В., Булкин А. Е., Трухний А. Д. Турбины тепловых и атомных электрических станций : учебник для вузов. М. : Изд-во МЭИ, 2001. 488 с.

3. Смирнов А. В., Юсупов Р. М. Технология параллельного проектирования : основные принципы и проблемы внедрения // Автоматизация проектирования. 1997. Т. 329. № 2. С. 50–55.

4. Лякишев А. Г., Смородинова Т. К., Маслов В. М., Аксёнов К. В. Техническая подготовка производства изделий : метод. указания. Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2006. 70 с.

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОТЛА БКЗ-210-140-8 С НАКЛОННЫМИ СОПЛАМИ ТРЕТИЧНОГО ДУТЬЯ И ГАЗОПЛОТНОЙ ТОПКОЙ

Т. А. Акимова*, А. В. Лесных, Е. Ю. Дорогов, А. А. Глазебная*

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
akimova.ta@dvfu.ru

Выявлены причины отклонения тепловых расчетов котла БКЗ-210-140-8 с наклонными соплами третичного дутья и газоплотной топкой, выполненных с использованием нормативного метода теплового расчета котлов, с данными испытаний. Определены фактические значения коэффициентов, описывающих лучистый теплообмен. Выбрана наиболее подходящая методика расчета, разработана расчетная модель, обеспечивающая удовлетворительную степень сходимости.

В процессе пуска и режимно-наладочных работ котельного агрегата БКЗ-210-140-8 ст №14 с наклонными соплами третичного дутья [1] и газоплотной топкой был выявлен ряд существенных отклонений в параметрах работы котла от его заводского теплового расчета: значительное снижение температуры пара, сниженная температура уходящих газов, даже при увеличении температуры на выходе из топки изменений практически не происходит.

Для определения причин отклонения данных теплового расчета котла от данных испытаний, поиска оптимальных решений и обеспечения возможности прогнозирования влияния на его работу проводятся расчетные исследования. Разработка модели выполнена в ПО Boiler Designer [2]. Данная программа выполняет теплогидравлический расчет котельного агрегата, опираясь на исходные данные и коэффициенты, внесенные в модель [3]. Исходными данными для котельных установок являются их конструкторские характеристики, например: размеры поверхностей нагрева; диаметры, шаги и количество труб и др.

Цифровая модель котельного агрегата разработана с использованием конструкторской документации с графическими изображениями общего вида котельного агрегата, поверхностей нагрева и нормативного теплового расчета котлов 1998 г. [4]. При данном виде расчета на режимные параметры влияет исключительно только доля третичного дутья и фактически не учитывается действительный уровень ядра факела (1).

С точки зрения расчета топочных камер для текущей компоновки с соплами третичного дутья более подходящим является НТР 1973 г. [5], так как она позволяет более точно рассчитать распределение температур по высоте топочной камеры за счёт параметра $\chi_т$ (2).

НТР 1998:

$$M = M_0(1 - 0{,}4x_г)\left(1 - \kappa g_{тр.в}\right)\sqrt[3]{r_v} \tag{1}$$

НТР 1973:

$$M = 0{,}54 - 0{,}2x_T. \tag{2}$$

Для более точного теплового расчета топочной камеры необходимо корректно определить два полуэмпирических критерия: параметр М и ψ.

Учитывая характеристики при различных режимах работы, были определены параметры М и уровень расположения максимума температур. При определении данных параметров учитывалось, что сопла третичного дутья направлены вниз. Значения параметров $\chi_т$ и М показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Номинальная нагрузка
Коэффициент тепловой эффективности	0,5757
Относительная высота максимума температур	0,353
Параметр М	0,469
Температура газов на выходе из топки (расчетное значение), °С	1187
Температура газов на выходе из топки (испытания), °С	1053
Температура газов на выходе из топки (Boiler Designer), °С	1057

Нормативные значения коэффициентов тепловой эффективности топочных экранов ψ составляют 0,65 при сжигании природного газа. С учетом горелок, сопел, лазов, лючков и шамотированного пода коэффициент снижен до 0,5757 при работе на шести горелках, до 0,518 – на четырех горелках.

Полученные данные соответствуют результатам испытаний, которые проводились на котельном агрегате. Погрешность при анализе результатов составляла от 0,15 до 0,34 %. Такие показатели погрешности являются нормой и позволяют считать модель адекватной. Данную модель можно использовать для прогнозирования режимов работы и их оптимизации. Внедрение цифровых технологий в производственную цепочку позволяет оценить экономический эффект от тех или иных мероприятий.

Список литературы

1. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб., 1996. 270 с.
2. Лесных А. В., Акимова Т. А. Прогнозирование эффективности режима работы котельного агрегата БКЗ-210-140-8 ст №14 с использованием по boiler designer // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. Красноярск СФУ, 2022. С. 915–930.
3. Supranov V. M., Pleshanov K. A., Khokhlov D. A. New Opportunities for Boiler Plants Calculation. International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2022 – Proceedings, 2022.
4. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1998. 257с.
5. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубовский И. Е. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). М.: Энергия, 1973. 256 с.

СНИЖЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В. И. Башун*, И. В. Кириллова*

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
**vi_bashun@mail.ru*

В статье рассмотрены результаты работы котельной малой мощности, находящейся в населенном пункте, использующей твердое топливо и не имеющей системы очистки газа. Даны некоторые рекомендации по установке газоочистного оборудования, с учетом которых котельная будет оказывать меньшее экологическое воздействие на окружающую среду [1]. В частности, рассмотрены возможности установки пылеосадительной камеры или циклона типа ЦН-11-500. Представлены результаты расчетов рассеивания загрязняющих веществ с учетом предложенных мероприятий.

Существенный вклад в высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха вносят котельные малой производительности. Учитывая, что в Красноярске таких объектов большое количество и, как правило, они эксплуатируются без газоочистного оборудования и зачастую имеют невысокие дымовые трубы, то вред окружающей среде от многочисленных (хоть и малых) угольных котельных может быть сравним с крупным промышленным объектом [2].

Объект исследования – котельная, находящаяся в Центральном районе города Красноярска на расстоянии 162 м от жилой зоны. Организация использует данный объект малой теплоэнергетики для отопления складских, производственных и служебных помещений. На объекте установлено два водогрейных котла марки «Энергия-3М» мощностью 442 КВт, используемое топливо – бурый уголь Бородинского разреза Канско-Ачинского угольного бассейна. Котлы со слоевой топкой, немеханизированные. Дымовые газы отводятся по кирпичному газоходу в металлическую нефутерованную трубу диаметром 530 мм и высотой 11 м. Газоочистное оборудование на объекте не установлено. Параметры, принятые для расчета, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры для проведения расчета рассеивания

Параметр	Единица измерения	Значение
Расчетная температура	°C	–20
Коэффициент А, зависящий от температурной стратификации	–	200
Радиус нормативной СЗЗ	м	50
Скорость ветра	м/с	2
Высота дымовой трубы	м	11
Диаметр устья	м	0,53
Температура ГВС	°C	100
Скорость выхода ГВС	м/с	4,0
Объемный расход газа	$м^3/с$	2,54
Выброс пыли неорганической	г/с	0,2492
Выброс оксида углерода	г/с	1,074
Выброс оксида азота	г/с	0,00616
Выброс диоксида азота	г/с	0,028867

По данным расчетов рассеивания, проведенных с использованием программного комплекса УПРЗА Эколог (фирма «Интеграл»), максимальная приземная концентрация пыли неорганической составляет 0,254 мг/м^3, оксида углерода – 0,269 мг/м^3, оксида азота – 0,002 мг/м^3, диоксида азота – 0,012 мг/м^3. На границе жилой зоны приземные концентрации пыли неорганической равны 0,148 мг/м^3, что составляет 0,49 ПДК, т. е. в расчет рассеивания необходимо вводить значение фоновых концентраций.

Согласно приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 498, запрещается размещение и эксплуатация объектов хозяйственной и иной деятельности, которые не имеют предусмотренных правилами охраны атмосферного воздуха установок очистки газа. Следует признать, что в настоящее время полностью исключить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду невозможно, однако при подборе эффективного газоочистного оборудования их можно свести к минимуму [3].

Для снижения концентрации взвешенных веществ в качестве газоочистного оборудования был предложен гравитационно-инерционный пылеуловитель – пылеосадительная камера [4]. Данный класс пылеуловителей является простейшим типом газоочистного оборудования, обладающего низкой эффективностью очистки и небольшим гидравлическим сопротивлением, что дает возможность применения данных устройств в условиях невысокой самотяги. В пылеосадительной камере дисперсные частицы движутся горизонтально с некоторой скоростью и вертикально вниз под действием силы тяжести. Требуется, чтобы она находилась в камере достаточно продолжительное время и успела осесть на дно прежде, чем долетит до тыла камеры. Необходимая длина камеры для осаждения частиц диаметром 60 мкм и больше должна быть 2,91 м. Расчетная эффективность очистки газов, с учетом фракционного состава золы уноса при слоевом сжигании, составляет 76 %.

Другим вариантом снижения концентрации пыли неорганической является подбор и установка циклона. Этот способ очистки более эффективен, но с экономической точки зрения затратный. Циклон является пылеулавливающим устройством инерционного типа, в котором поток запыленного газа входит в корпус тангенциально, затем закручивается, и при движении вниз, к конической части аппарата, частицы пыли выносятся из потока под действием центробежной силы и оседают на стенки [5]. Очищенный поток газов движется вверх и выводится из циклона. Согласно данным производителя НИИОГАЗ, при оптимальной скорости внутри циклона, равной 3,5 м/с, диаметр циклона в соответствии с объемным расходом дымовых газов составил 450 мм. По каталогу изделий НИИОГАЗ был выбран циклон марки ЦН-11-500.

Предложенные мероприятия по уменьшению негативного влияния малой котельной ведут к значительному снижению вредных веществ, в частности пыли неорганической. После установки пылеосадительной камеры выброс взвешенных частиц составит 0,0623 г/с, а максимальная концентрация снизится в 8 раз и составит 0,029 мг/м^3. С учетом установки циклона и с расчетной эффективностью очистки газов 85 % максимальная концентрация пыли составит 0,017 мг/м^3.

Список литературы

1. Кулагин В. А., Кулагина Т. А., Матюшенко А. И., Турутин Б. Ф. Физика атмосферы и гидрофизика. Красноярск, 2006. 499 с.

2. Кулагина Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. пособие. Красноярск, 2003. 332 с.

3. Гутенев В. В., Кулагина Т. А., Кулагина Л. В., Крючков Г. П., Матюшенко А. И., Русак О. Н., Турутин Б. Ф. Экология техносферы: учеб. пособие. М., 2008. 468 с.

4. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Грищенко Е. П. Методы расчета пылеуловителей. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. 385 с.

5. Путилов В. Я. Экология энергетики: учеб. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2003. 716 с.

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЛОПАТОК ДЫМОСОСА КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

А. А. Бектемисов[1‡], М. В. Ермоленко[1], С. Л. Елистратов[2]*

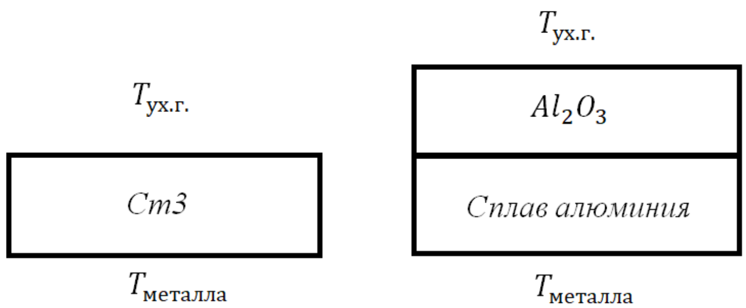
[1]НАО «Университет имени Шакарима города Семей»
071412, РК, область Абай, г. Семей, ул. Глинки, 20а
[2]Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
‡anekin88@gmail.com

Рассмотрены проблемы износа летучей золой направляющих лопаток и рабочих колес дымососов. Предложено решение по упрочнению рабочих поверхностей с применением метода микродугового оксидирования.

В настоящее время для уменьшения абразивного износа дымососного оборудования используются различные типы золоуловителей, наплавка износостойких металлов, уменьшение частоты вращения электродвигателя дымососа. Дополнительной мерой борьбы с влиянием золы являются переработка и обогащение твердого топлива, что существенно уменьшает долю золы в топливе.

В качестве перспективного решения проблемы предлагается изготовление лопаток дымососа из легких сплавов алюминия методом высокоточного литья под давлением с последующим упрочнением его рабочей поверхности методом микродугового оксидирования (МДО). Плотность сплавов алюминия [1] в зависимости от марки варьируется от 2,7 до 2,8 кг/дм^3, что значительно меньше, чем у Ст3, из которой изготавливаются рабочие колеса промышленных дымососов серии ДН [2]. Это снижает динамические нагрузки на подшипники вращения рабочего колеса. МДО позволяет получить на рабочей поверхности слой окислов Al_2O_3 с высокой микротвердостью [3], соизмеримой с корундом.

В процессе эксплуатации дымоходных систем важно спрогнозировать поведение ее рабочих элементов при знакопеременных термических нагрузках. В настоящей работе проведено сравнительное моделирование нестационарного теплопереноса в стальной пластине толщиной 10 мм и аналогичной ей по размерам из алюминиевого сплава с упрочняющим покрытием (рис. 1).



а б

Рис. 1. Геометрия модельного образца:
а – Ст3; *б* – сплав алюминия с покрытием по методу МДО

При расчетах использовались граничные условия первого рода, температура уходящих газов составляла 150 °C, а начальная температура металла – минус 15 °C. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 2 и 3.

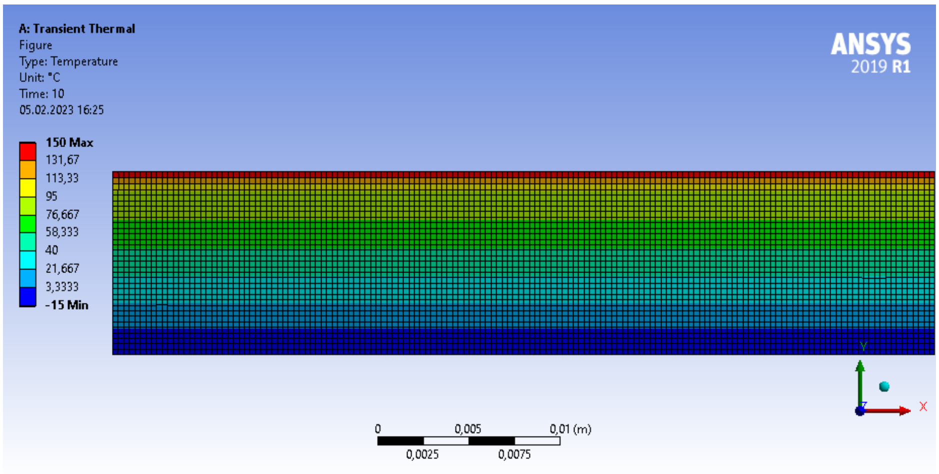


Рис. 2. Температурные поля при нестационарном режиме нагрева
для алюминиевого сплава с покрытием на основе МДО (t = 10 с)

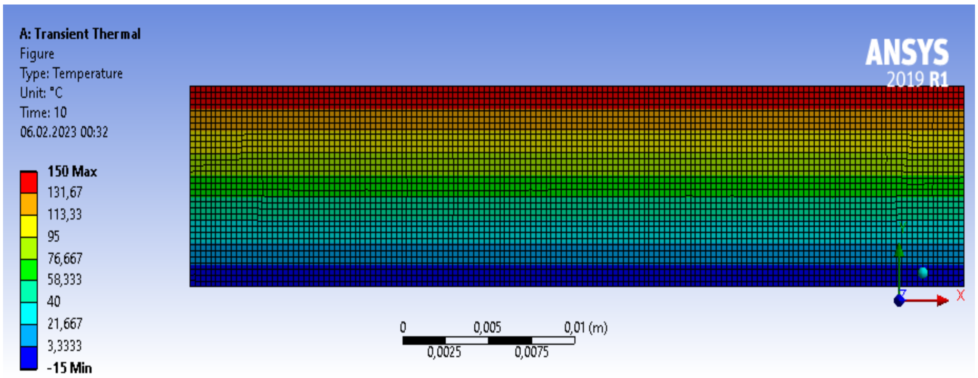


Рис. 3. Температурные поля при нестационарном режиме нагрева для Ст3 (t = 10 с)

Можно видеть, что в области низкотеплопроводного износостойкого покрытия (рис. 2), в отличие от однородного материала (рис. 3), имеют место высокие градиенты температур, препятствующие быстрому прогреву модельного образца. Однако температурные деформации на границе «износостойкое покрытие – металл» не должны повлиять на общий ресурс работы лопаточной части дымохода вследствие специфических особенностей технологии формирования покрытий на основе МДО.

Список литературы

1. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые сплавы деформируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2009. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294850/4294850525.pdf (дата обращения: 04.02.2023).

2. СТО 70238424.27.060.01.003-2009. Дымососы центробежные одностороннего всасывания типа ДН-26, ДН-26ГМ, ДН-24, ДН-24ГМ, ДН-22, ДН-22ГМ, ДН-21М, ДН-21МГМ, ДН-19М, ДН-19МГМ. Групповые технические условия на капитальный ремонт (дата введения: 2010-01-11). URL https://meganorm.ru/Index2/1/4293808/4293808221.htm (дата обращения: 17.01.2022).

3. Малышев В. Ч., Марков Г. А., Федоров В. А., Петросянц А. А., Терлеева О. П. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. № 1. С. 26–27.

ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ УГОЛЬНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В. В. Вишняк[1*], В. И. Карпенок[2], В. И. Мурко[1]*

[1]Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Российская Федерация, Новокузнецк, ул. Кирова, 42
[2]Кузбасский государственный технический университет, филиал в г. Новокузнецке
654000, Российская Федерация, Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 7
[*]sib_eco@mail.ru

Актуальной задачей является создание локальных экологически чистых теплоисточников, работающих на угольном топливе, для теплоснабжения отдаленных потребителей. На основе проведенных экспериментальных исследований предлагается технология слоевой газификации кускового угля, в которой в качестве газифицирующего агента использовались воздух и водяной пар. Исследования проводились на экспериментальном образце угольного газогенератора с применением сортовых каменных и бурых углей. Герметичность полости газификатора достигнута специальной конструкцией загрузочного и разгрузочного устройств. В процессе газификации был получен топливный газ с теплотой сгорания до 7,0 МДж/кг, который эффективно сжигался в топке котла.

В настоящее время актуальной является проблема использования малокалорийного окисленного угля, который из-за низких качественных свойств не востребован на рынке, в результате чего отправляется на длительное хранение на угольный склад или транспортируется в отвал. Вследствие долгого хранения и воздействия химических процессов углю свойственно самовозгорание, что приводит к пожарам и выделению значительных вредных выбросов в атмосферу.

Аналогичные проблемы возникают при использовании бурых углей. Ввиду их малой калорийности и склонности к самовозгоранию использование данных углей ограничено потребителями близлежащих территорий. Таким образом, для повышения эффективности работы угольных предприятий, в первую очередь, добывающих уголь открытым способом, в т. ч. числе бурый, стоит проблема использования низкосортных и малокалорийных углей вблизи их добычи. Помимо экономической эффективности для добывающих предприятий в местах их расположения существенно снизится нагрузка на окружающую среду.

В настоящее время разработано несколько технологических направлений решения данной проблемы. В нашей работе предложена технология переработки угля в местах его добычи с использованием газификации добываемого полезного ископаемого и получением конкурентно способных продуктов с высокой добавленной стоимостью, в том числе: углеводородного газа, жидких смолистых веществ, полукокса. При этом образующийся твердый остаток (шлак) не выбрасывается с газами в атмосферу, а организовано выгружается в специальный накопитель. Учитывая наличие значительного количества местных теплопотребителей, целесообразна организация локальных экологически чистых теплоисточников без создания дорогостоящих теплотрасс.

Технологическая схема экологически чистого локального теплоисточника, работающего на топливном генераторном газе, приведена на рис. 1. Исходный уголь класса 13–25 мм направляется на паровоздушную газификацию в слоевой газификатор непрерывного действия. Полученный генераторный газ сжигается в газовом водогрейном или паровом котле. Одним из основных элементов используемого технологического оборудования является слоевой газогенератор непрерывного действия.

Отличительными особенностями разработанного газогенератора и на его основе созданного локального теплоисточника являются:

– проведение процесса газификации в непрерывном режиме;
– обеспечение герметичности полости газогенератора;
– безопасность работы газогенератора за счет проведения реакции под давлением;
– отсутствие пылевых выбросов при работе газового котла;
– локализация золового продукта газификатора;
– возможность быстрого запуска теплоисточника после его длительной остановки.

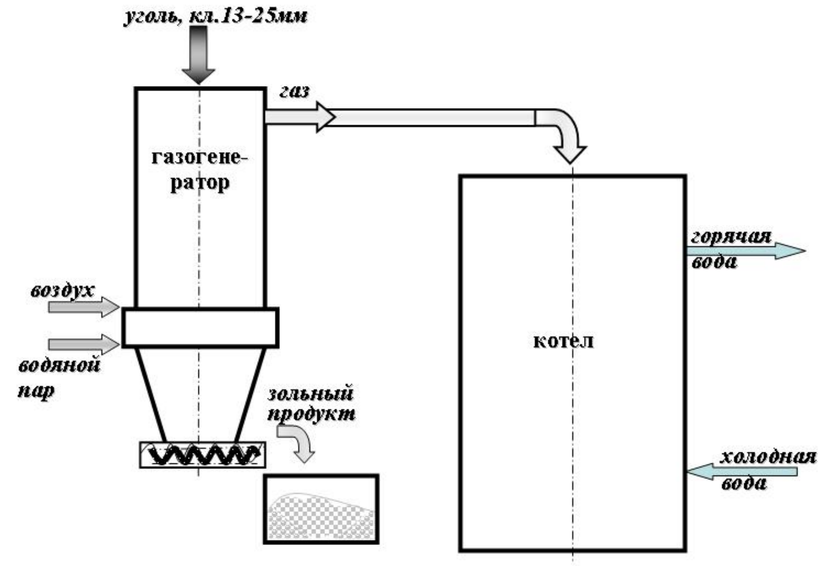


Рис. 1. Технологическая схема экологически чистого локального теплоисточника, работающего на топливном генераторном газе

Проведенные экспериментальные исследования процесса газификации классифицированного угля марок Б2 и Д с низшей теплотой сгорания 14,3 МДж/кг (3500 ккал/кг) и 21,0 (5000) соответственно подтвердили заявленные технические характеристики газификатора с получением генераторного газа с теплотой сгорания 5,9 и 7,0 МДж/кг [1–3].

На основании проведенных исследований разработан полупромышленный образец газификатора непрерывного действия слоевого типа с тепловой производительностью по газу 1,5 МВт.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-29-00728.

Список литературы

1. Мурко В. И., Черникова О. П., Сентюрев С. А., Амлин М. С. Обоснование технологических решений энергогенерации путем переработки низкосортных углей на площадке разреза // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Меж-

дународной научно-практической конференции: в 2 ч. / Под общей ред. А. Б. Юрьева. Новокузнецк, 2021. С. 166–174.

2. Сентюрев С. А., Амлин М. С. Разработка технологического комплекса по переработке низкосортных и окисленных углей на месте добычи // СТУДЕНТ ГОДА 2021 Международного учебно-исследовательского конкурса (19 мая 2021 г.). Ч. 1. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. С. 348–358.

3. Патент на полезную модель 205264 U1, 06.07.2021 Аппарат для пиролиза углеродного материала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЗАВЕСЫ НА ЛОПАТКАХ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

В. Г. Грибин[1], А. Ю. Макаров[⁑], Д. М. Андрианов[*]

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14
⁑ MakarovAYur@mpei.ru

Разработаны методика и стенд для проведения экспериментов по влиянию режимных параметров и геометрии каналов, подводящих воздух к охлаждаемой поверхности, на формирование пленочной заградительной завесы над обтекаемой поверхностью лопатки высокотемпературной газовой турбины. Проведены исследования геометрии каналов выдува, влияния режима вдува на эффективность заградительного охлаждения.

Одним, из наиболее перспективных способов повышения эффективности ГТУ является увеличение температуры рабочего тела перед газовой турбиной. Современные ГТУ работают при начальной температуре 1600 °C, в то время как допустимая температура металла лопаток находится на уровне 900 °C [1]. Поэтому наряду с ростом температур газа постоянно совершенствуется система охлаждения деталей горячего тракта ГТУ, в первую очередь лопаточного аппарата первых ступеней. Для уменьшения расходов охлаждающего воздуха и снижения потерь, связанных с охлаждением обтекаемых поверхностей, применяют жаропрочных сплавы, термобарьерные покрытия, разрабатываются более эффективные системы охлаждения.

Наиболее широкое распространение в газотурбиностроении получили системы конвективно-пленочного воздушного охлаждения. При таком способе охлаждающий воздух сначала отводит тепло с внутренней стороны стенки лопатки, затем через профилированные микроканалы выдувается на внешнюю обтекаемую поверхность лопатки. Формирование защитной завесы, экранирующей металл лопатки от контакта с горячими газами, зависит от расположения и геометрии каналов выдува охлаждающего воздуха. Для исследования процессов взаимодействия потоков рабочего тела и воздуха, влияния геометрических и режимных параметров в научно-исследовательской лаборатории кафедры паровых и газовых турбин ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» создан экспериментальный стенд, моделирующий теплофизические процессы на обтекаемых охлаждаемых поверхностях в газовых турбинах [2]. Стенд позволяет моделировать процессы взаимодействия потоков и теплообмена при конвективно-пленочном воздушном охлаждении деталей горячего тракта газовых турбин. На фотографии приведен рабочий участок стенда с моделируемыми отверстиями для выдува воздуха на поверхность охлаждаемой лопатки газовой турбины (рис. 1).

В процессе наладки стенда увеличены верхние границы возможных расходов основного и охлаждающего потоков, температур основного потока, что позволило проводить исследования в большем диапазоне режимов близких к условиям эксплуатации.

Распределение температуры на изучаемой поверхности фиксировалось с помощью инфракрасной камеры (тепловизора). Съемка велась через смотровое окно, которое пропускает инфракрасное излучение. На фотографии приведены результаты распределения температур на охлаждающей поверхности сразу на выходе воздуха из центрального отверстия, полученные для различных значений коэффициента выдува BR.

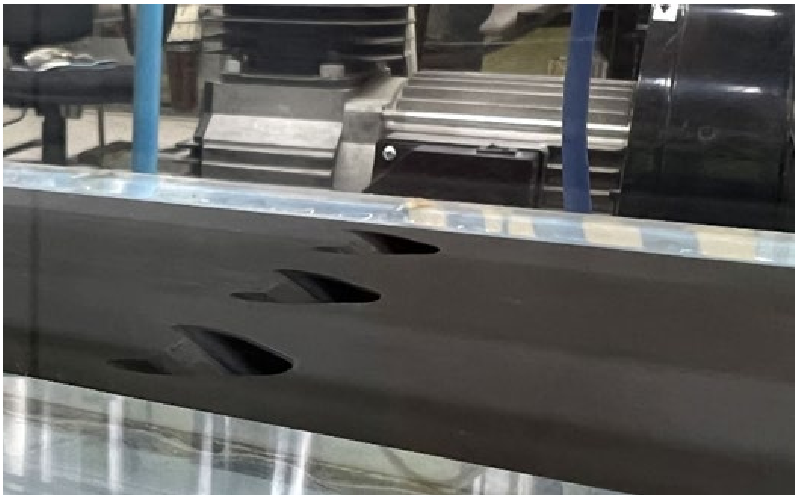


Рис. 1. Рабочий участок стенда с отверстиями для выдува

Коэффициент выдува BR (1) определялся по формуле

$$BR = \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2},$$

где c_1 – скорость вдуваемого охлаждающего воздуха; ρ_1 – плотность вдуваемого охлаждающего воздуха; c_2 – скорость основного потока; ρ_2 – плотность основного потока.

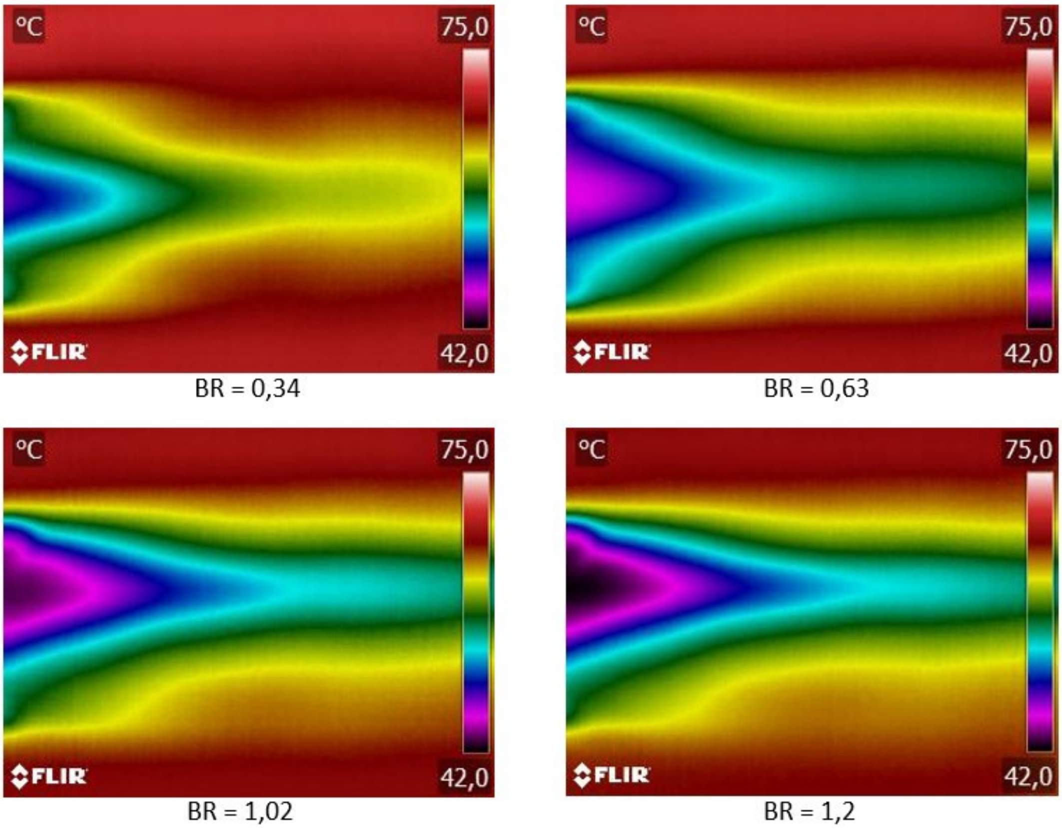


Рис. 2. Температурные поля на охлаждаемой поверхности в зависимости от коэффициента выдува

В зависимости от значений коэффициента выдува меняются температурные поля на охлаждаемой поверхности (рис. 2). Результаты эксперимента позволяют выбрать оптимальные расходы воздуха для различной геометрии канала выдува на охлаждаемую поверхность.

Список литературы

1. Satoshi Hada, Keizo Tsukagoshi, Junchiro Masada, Eisaku Ito. World's First 1,600 °C J-series Gas Turbine // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2012. Vol. 49, No. 1. Pp. 19–24.

2. Макаров А. Ю., Андрианов Д. М., Цой А. В., Грибин В. Г., Тищенко В. А. Исследование формирования заградительной завесы на лопатках газовой турбины: тезисы докладов XXVIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 2022. С. 766.

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОПКЕ

А. А. Дектерев[1, 2‡], В. А. Кузнецов[1, 2], Ар. А. Дектерев[1, 2], Е. С. Тэпфер[1*]

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[‡]dekterev@mail.ru

Работа посвящена численному моделированию факельного сжигания угольного топлива в малогабаритной топке. Представлены результаты расчетного анализа влияния на скорость выгорания пылеугольного топлива размера угольных частиц, температуры окружающего газа, содержания окислителя в газе. Разработана математическая модель горелки, работающей на дизельном топливе с частичной заменой его на уголь микропомола, и обоснована возможность сжигания пылеугольного топлива в малогабаритных камерах сгорания.

Основная причина проблем энергообеспечения в отдаленных районах – это проблема доставки дизельного топлива и ограниченностью сроков сезонного завоза. Частичная замена дизельного топлива на уголь позволит сделать экономически выгоднее работу малых электростанций. Работа посвящена математическому моделированию совместному сжиганию дизельного и пылеугольного топлива, исследуются процессы, происходящие при совместном горении дизеля и угля, а также предлагается конструкция специального горелочного устройства.

В ИТ СО РАН разработана горелка для сжигания жидких топлив [1], в которой топливо распыляется струей перегретого пара, такая горелка обеспечивает хороший распыл топлива, высокую эффективность выгорания топлива и низкую концентрацию вредных выбросов. В работе [2] проводилось численное моделирование горелки ИТ СО РАН, в котором было показано, что в горелке происходит хорошее смешение пара с топливом и образование устойчивого факельного горения.

В предлагаемой работе предложена математическая модель устройства для совместного факельного сжигания дизельного топлива и пылеугольного угля, включающая в себя комплекс взаимосвязанных подмоделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы горения, газификации и движения капель дизельного топлива и угольных частиц и т. д.

Сравнение результатов моделирования с экспериментом показало, что модель с достаточной точностью описывает процессы смешения, горения и теплообмена в горелочном устройстве для совместного факельного сжигания дизельного и пылеугольного угля в рассмотренных в эксперименте режимах. Предложен вариант горелочного устройства, позволяющий проводить совместное сжигание дизельного топлива и угольной пыли в соотношении 50/50 по тепловой мощности. При этом наблюдается стабильное горение факела и относительно низкий недожег угольного топлива.

Исследование поддержано Российским научным фондом (Проект № 19-19-00443).

Список литературы

1. Копьев Е. П., Ануфриев И. С., Шадрин Е. Ю., Лобода Е. Л., Агафонцев М. В., Мухина М. А. Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей // Доклады АН ВШ РФ. 2019. № 2 (43). С. 38–55.

2. Andrey V. Minakov, Viktor A. Kuznetsov, Artem A. Dekterev, Igor S. Anufriev, Evgeny P. Kopyev, Sergey V. Alekseenko Comparative Analysis of Numerical Methods for Simulating N-Heptane Combustion with Steam Additive. Energies 2023, 16 (1). doi.org/10.3390/en16010025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА СО СХЕМОЙ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ НА ОСНОВЕ ВУТ

А. А. Дектерев[1, 2‡], В. А. Кузнецов[1, 2], Л. И. Мальцев[1*]

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[‡]dekterev@mail.ru

Работа посвящена разработке математической модели совместного сжигания рядового пылеугольного топлива и ВУТ в топочной камере энергетического котла Е-500. Представлены результаты тестирования модели с использованием результатов натурных измерений, показывающие хорошее совпадение как по интегральным, так и по локальным характеристикам. Проведено моделирование схем ступенчатого сжигания, показавшее, что использование ВУТ в восстановительной ступени позволяет снизить выбросы оксида азота до 40 %.

В структуре мирового потребления топливно-энергетических ресурсов доля угля по-прежнему остаётся большой. Основным негативным моментом энергетического использования угля является тот факт, что при сжигании угля образуется группа экологически опасных веществ – мелкодисперсные частицы золы, оксиды азота и серы, что делает уголь самым неэкологическим топливом. В связи с этим угольная энергетика требует применения экологически чистых, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий.

Использование математического моделирования дает возможность оперативно проводить исследования по изучению таких технологии и определять целесообразность и широту их проработки для внедрения.

В работе с помощью численного моделирования исследован процесс совместного сжигания водоугольного и пылеугольного топлива в опытно-промышленном котле Е500 с применением схемы ступенчатого дожигания.

Для описания совместного сжигания ВУТ и пылеугольного топлива использовалась модель движения многокомпонентной неизотермической газовой среды (несущей фазы) на основе RANS-подхода, модель движения капель/частиц на основе подхода Лагранжа, модель горения в газовой фазе на основе гибридной модели, сочетающей механизмы химического реагирования и турбулентного обмена.

Проведено тестирование предложенной комплексной математической модели на основе данных натурного эксперимента. Показано хорошее согласие результатов расчёта с экспериментом.

Выполнен сравнительный анализ влияния применения схемы трехступенчатого сжигания и технологии капельно-факельного сжигания ВУТ на физико-химические процессы в топочной камере и экологические показатели. Исследовано изменение режима смешения в восстановительной зоне в зависимости от способа подачи угольного топлива при реализации схемы трехступенчатого сжигания. Установлено, что использование ВУТ вместо базового пылеугольного топлива для создания восстановительной зоны при трехступенчатой схеме сжигания позволяет снизить количество вредных выбросов NOx на 28 % (и более чем на 40 % по сравнению с существующим котлом).

Проведенное моделирование вариантов с минимальной реконструкцией топочной камеры показало возможность внедрения схемы сжигания с использованием ВУТ на существующих энергоблоках.

Расчетные исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-210-140-8

Е. Ю. Дорогов[*], А. В. Лесных, А. В. Кулик[*]

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
[*]dorogov.eyu@dvfu.ru

Проведены предварительные экспериментальные опыты по определению зон максимальных тепловых потоков и температуры уходящих газов в сечении на выходе из топки котлоагрегата БКЗ-210-140 при работе на природном газе.

Объектом исследования является котел БКЗ-210-140 № 14, установленный на Владивостокской ТЭЦ-2. Котел с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, спроектирован и изготовлен ПО «Сибэнергомаш» для сжигания бурых углей в топке с тангенциальной схемой сжигания. В 2021 г. реконструирован для сжигания природного газа и мазута с установкой новой топки со слабонаклоненным подом и шести горелочных устройств. Особенностью конструкции топки является поворот сопел третичного дутья вниз на 15°. Такая конструкция топки приводит к тому, что с повышением доли третичного дутья температура газов на выходе из топки снижается, уменьшая возможности пароперегревателя [1].

Во время режимных испытаний котла после реконструкции в марте – апреле 2022 г. были проведены измерения температуры газов на выходе из топки и измерения падающих тепловых потоков в районе максимального тепловыделения и в районе горелочных устройств.

Испытания проводились на номинальной нагрузке котлоагрегата, при различном соотношении топливо-воздух по горелкам.

Измеренная температура газов на выходе из топки менялась в диапазоне 967–1053 °С, что на 104–190 °С ниже расчетной температуры [2]. Полученные данные по падающим тепловым потокам показали значительную неравномерность на 150–175 Вт/м^2 по ширине топки в районе ядра факела. Максимальные значения 451 кВт/м^2 выявлены в районе пересекающихся струй горелочных устройств первого и второго яруса, на расстоянии 1/3 ширины топки от бокового экрана котла.

По результатам измерений температуры и падающих тепловых потоков был сделан вывод о необходимости внесения изменений в проект реконструкции котла для достижения расчетной температуры газов на выходе из топки и, как следствие, увеличения возможности пароперегревателя котла, и снижение падающих тепловых потоков за счет применения двухстадийного сжигания газа с применением циклонно-вихревых предтопков.

Систематизация, обработка и анализ всего имеющегося материала по теплонапряжениям топочных экранов, полученного в разное время различными исследователями, необходимы для выработки общих частных рекомендаций при проектировании и реконструкциях котлов. Для сравнения значений величин тепловых потоков представлены три котлоагрегата, исследования на которых проводились при сжигании природного газа (рис. 1).

Котел ТМ-200 паропроизводительностью 200 т/ч, топка которого рассчитана на тепловое напряжение qv = 290 кВт/м^3, оборудованный 12 горелками, расположенными в два ряда на фронтовой стене. Максимальные падающие $q_{max}^{пад}$ тепловые потоки составили 440–470 кВт/м^2. Котел ПК-19 паропроизводительностью 120 т/ч с теплонапряжением объема qv = 105 кВт/м^3, оборудованный четырьмя турбулентными горелками, расположенными по две на боковых экранах. Максимальные падающие $q_{max}^{пад}$ тепловые потоки составили 425 кВт/м^2 [3].

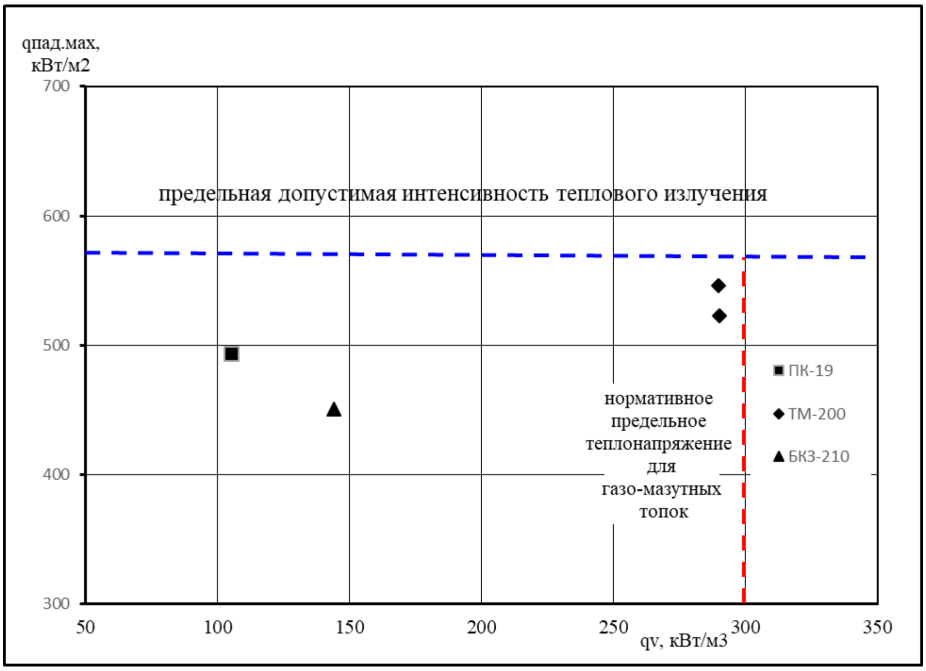


Рис. 1. Зависимость интенсивности теплового излучения факела от объемной плотности тепловыделения в топках с горелками при сжигании природного газа

Котел БКЗ-210-140 паропроизводительностью 210 т/ч, с теплонапряжением объема qv = 143,6 кВт/м^3, оборудованный шестью основными и четырьмя сбросными горелками, расположенными на боковых экранах котла, треугольником вниз. Падающие $q_{max}^{пад}$ тепловые потоки на уровне горелок составили 451 кВт/м^2.

При замене горелок на циклонно-вихревые предтопки (ЦВП) необходимость в соплах третичного дутья отпадает, так как сам предтопок является устройством стадийного сжигания и при их установке тем более в несколько ярусов появляется возможность создания в камере сгорания и топочной камере нестехиометрии любого вида, что позволяет контролировать не только качественные показатели процесса горения, но и воздействовать на генерацию оксидов азота [4].

Список литературы

1. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / ВТИ, АООТ НПО ЦКТИ. СПб., 1996. 270 с.

2. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1998. 257 с.

3. Дорогов Е. Ю. Исследование теплообмена в топках котлов с циклонными предтопками ДВГТУ: автореф. дис. … канд. техн. наук / Дорогов Евгений Юрьевич. Владивосток, 2000. 22 с.

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

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ И БИОМАССЫ

Н. А. Землянский[1⁎], А. В. Жуйков[1, 2], А. И. Матюшенко[1], П. Ю. Гребеньков[3*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт химии и химической технологии СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 24
[3]ООО «СибВТИ»
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 68/2
[⁎]Nikzemln@mail.ru

В работе рассматриваются характерные проблемы при переходе на сжигание твердотопливных смесей на основе угля и биомассы в действующих энергетических установках. Для смесей на основе этих топлив применительно к котельным агрегатам как с камерным, так и со слоевым типом сжигания проводится оценка склонности к шлакованию, которая показывает, что вовлечение биомассы характеризуется снижением склонности к образованию твёрдых соединений.

Твердое ископаемое топливо широко используется при выработке тепловой и электрической энергии, при этом газообразные и твердые продукты сгорания углей негативно воздействуют на окружающую среду. В связи с этим одним из основных направлений современной энергетики является ресурсосбережение и улучшение экологических характеристик. Биомасса же при сжигании выделяет меньше вредных газообразных компонентов, но полная замена ею угля затрудняется из-за отсутствия больших запасов, проблем с доставкой и хранением. Поэтому исследователями как в России, так и за рубежом было предложено смешивать биомассу с углём в различных соотношениях по массе, либо по теплоте сгорания [1].

Основной проблемой при совместном сжигании биотоплива и угля является образование отложений на лучистых и конвективных поверхностях котельного агрегата, а при слоевом сжигании – спекание золы в слое топлива с образованием агломераций. Для исследования образования отложений в котельных агрегатах с камерным сжиганием широко используется методика УралВТИ, по которой определяется склонность топлив к образованию железистых, сульфатно-кальциевых отложений и отложений на основе активных щелочей. Для котлов, имеющих слоевое сжигание, возможно определить склонность к агломерации топлив по зарубежной методике [3].

Цель работы – определение влияния добавления биомассы в уголь на склонность к образованию отложений и агломерацию слоя.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие топлива:

– балахтинский бурый уголь (далее – 3Б);

– хвоя кедра, отход от лесозаготовительной промышленности (далее – ХК);

– солод, углеродосодержащий отход от пивоваренного производства (далее – СОЛ).

Ниже представлены основные теплотехнические характеристики и элементный состав топлив (табл. 1) и химический анализ золы использованных топлив (табл. 2).

Таблица 1

Данные технического и элементного анализа

Топли-во	Технический анализ			Элементный состав					Q_i^r, МДж/кг
	W^a, %	A^d, %	V^{daf}, %	C^{daf}, %	H^{daf}, %	N^{daf}, %	S^{daf}, %	O^{daf}, %	
ЗБ	20,8	6,2	44,6	74,1	5,0	0,9	0,3	19,7	20,5
ХК	14,2	3,4	79,5	56,3	6,7	0,3	0,1	36,6	17,8
СОЛ	59,4	5,2	78,7	52,7	6,6	3,2	0,3	37,2	6,3

Таблица 2

Данные химического анализа

Топ-ливо	Содержание, %							
	SiO2	CaO	K2O	Na2O	Fe2O3	TiO2	MgO	Al_2O_3
ЗБ	46,1	24,1	0,9	0,6	9,1	1,0	3,1	15,1
ХК	15,7	58,5	3,87	–	3,42	0,421	–	3,35
СОЛ	42,9	7,68	4,56	0,76	1,16	–	–	–

Теплотехнические характеристики и элементный состав топлив (табл. 2) определялись в соответствии со стандартами. Для экспериментов были выбраны твердотопливные смеси со следующими массовыми пропорциями: ЗБ 100 %; ХК 100 %; СОЛ 100 %; и ЗБ отдельно с биомассами в пропорциях 25:75, 50:50 и 75:25.

На рис. 1 представлены результаты оценки смесей на склонность к шлакованию экранов по отечественной методике [2]. Балахтинский уголь имеет очень высокую склонность к шлакованию, это обосновано наивысшим содержанием железа и серы. У хвои кедра склонность к шлакованию высокая, применение пивного солода характеризуется низким уровнем образования отложений.

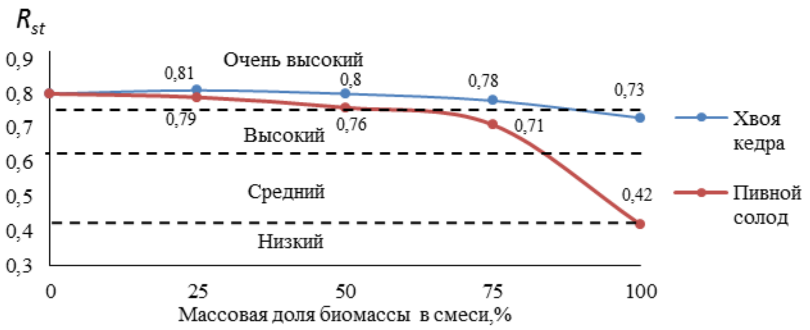


Рис. 1. Комплексная оценка на склонность к шлакованию топочных экранов

Расчёт индекса агломерации слоя для смесей выполнялся согласно формуле (1):

$$ИАС = Fe_2O_3/(Na_2O + K_2O). \quad (1)$$

Результаты представлены в табл. 3, допустимо ИАС > 0,15.

Таблица 3

Оценка возможности агломерации слоя

	БЗ 100%	ХК 100%	СОЛ 100%	БЗ 75%+ ХК 25%	БЗ 50%+ ХК 50%	БЗ 25%+ ХК 75%	БЗ 75%+ СОЛ 25%	БЗ 50%+ СОЛ 50%	БЗ 25%+ ХК 75%
ИАС	6,067	0,884	0,218	5,266	4,231	2,063	4,789	3,399	1,881

Проведенное исследование показало, что при добавлении в уголь хвои кедра и пивного солода склонность к шлакованию топочных экранов понижается за счёт меньшего содержания железа, но повышается склонность к агломерации слоя, потому что биомасса содержит в себе больше активных щелочей и более предрасположена к образованию отложений на сульфатно-кальциевой основе. Хвоя кедра имеет своём составе большую долю калия и кальция, а пивной солод менее склонен к шлакованию за счёт малого содержания кальция и железа при высоком содержании оксида кремния около.

Список литературы

1. Bhuiyan A. A., Blicblau A. S., Islam A. K. M. S., Naser J. A review on thermochemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace // J. Energy Inst. vol. 91(1), pp. 1–18, 2018.

2. Скуратов А. П., Козлов С. Г. Топочные процессы при сжигании шлакующих канско-ачинских углей: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. 172 с. ISBN 978-5-7638-4549-5

3. Ozdemir S., Demir M. S. Biofuel characteristics and combustion emissions of poultry litter and lignocellulosic biomass // Environmental Progress and Sustainable Energy, vol. 40 (3), pp. 12–22, 2020.

ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОНДЕНСАЦИОННОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ КОТЛА С ПРЕДТОПКАМИ

Е. Ф. Кихайогло*, Т. А. Соловьёва, К. А. Штым*

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
**kihayoglo97@bk.ru*

Разработан комплексный подход сжигания природного газа и мазута с утилизацией теплоты уходящих дымовых газов в конденсационном теплообменнике с целью снижения вредных выбросов и парниковых газов, повышения эффективности работы котлов. Рассмотрена постановка исследований процессов теплообмена, происходящих в конденсационном теплообменнике, установленном после водогрейного котельного агрегата марки КВГМ-100-150, оснащенного циклонно-вихревыми предтопками.

Утилизация теплоты уходящих газов даёт возможность повысить эффективность работы энергетического оборудования и рациональнее использовать потенциал невозобновляемых видов топлива. Перевод в 2011 г. котлов Владивостокской ТЭЦ-1 (ВТЭЦ-1) на сжигание газообразного топлива и мазута в циклонно-вихревых предтопках (ЦВП) позволил повысить КПД котлов, снизить расход топлива, а также понизить эмиссию вредных выбросов и парниковых газов. Для утилизации теплоты из уходящих газов за водогрейным котлом КВГМ-100-150 планируется установка конденсационного теплообменника (КТ). Конденсация из дымовых газов водяных паров позволит снизить температуру уходящих газов и потери теплоты с уходящими газами, повысить КПД котла.

Для определения эффективных режимов работы КТ и исследования процессов теплообмена планируется замерять температуры и влажность дымовых газов, температуры охлаждающей воды на входе и выходе в/из ТК, расход охлаждающей воды и образовавшегося конденсата, статическое и динамическое давление дымовых газов (для расчёта объёма дымовых газов), расход воды на впрыск. Впрыск воды в КТ производится с целью интенсификации процессов теплообмена. Конструкция КТ (рис. 1) предусматривает обвод части горячих газов через байпас для получения «безопасной» температуры дымовых газов с точки зрения работы газоходов и дымовой трубы.

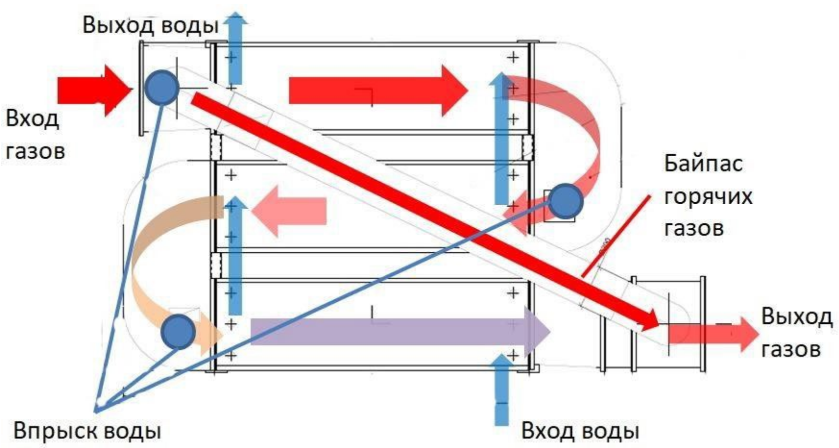


Рис. 1. Схема движения основных потоков экспериментального конденсационного теплообменника

Комплексный подход, совмещающий циклонно-вихревую технологию сжигания топлива с конденсацией водяных паров из дымовых газов, позволит повысить КПД котла приблизительно на 4 % во всем диапазоне нагрузок, снизить выбросы парниковых газов (снижение водяных паров минимум на 40 г/кг. сух. г., диоксида углерода CO_2), утилизировать образовавшийся конденсат путем впрыска в камеру сгорания ЦВП для подавления эмиссии оксидов азота, улучшить работу водоподготовительных установок станции за счёт использования воды, подогретой в процессе охлаждения дымовых газов в КТ.

УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ОТХОДОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Т. А. Кулагина[‡], **С. А. Иванов, Е. Н. Зайцева**[*]

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[‡] *tkulagina@sfu-kras.ru*

Золошлаковые отходы ТЭЦ могут быть ценным вторичным ресурсом для других отраслей промышленности. Технология переработки данных отходов – это совокупность методов воздействия на золошлак с целью повышения его качества как вторсырья (стабилизация состава, прочности) и последующей утилизацией в соответствии с требованиями ресурсосбережения, нормативной и технической документации, например, при обращении даже с радиоактивными отходами.

На данном этапе развития цивилизации увеличение темпов образования отходов уже не может расцениваться как закономерный результат прогресса. Поскольку многие виды отходов являются сырьём для вторичной переработки, простое складирование их на полигонах само по себе контрпродуктивно.

Исключение составляют опасные отходы, в т. ч. радиоактивные, повторное использование которых запрещено законодательно [1]. И пусть количество таких отходов на порядки меньше в сравнении с обычными, но в будущем это может вызвать проблемы с их размещением в силу более жёстких требований к объектам хранения с точки зрения безопасности.

В настоящее время, в основном, используются три технологии кондиционирования с последующим долговременным размещением радиоактивных отходов (РАО) – остекловывание, битумирование и цементирование [2].

Метод остекловывания заключается в смешивании зольной части отходов со стеклофритой и дальнейшем сплавлении компонентов в инертный слиток, подлежащий отправке на полигон долговременного размещения. Неоспоримым преимуществом данного способа является получение упаковок, наиболее устойчивых с точки зрения выхода опасных компонентов в окружающую природную среду, причём эти свойства сохраняются долго. Однако для получения стеклянных матриц необходима высокая температура.

Битумирование представляет собой заливку твёрдых РАО или зольной части жидких органическим веществом высокой вязкости и получение упаковок, пригодных для дальнейшего долговременного хранения. Преимуществом данного способа также является высокое сопротивление выщелачиванию. Тем не менее эти упаковки не так долговечны и, как и предыдущий метод, не позволяют работать непосредственно с жидкими отходами. Также этот метод пожароопасен.

Последний способ не отличается высокой стабильностью упаковок, однако наиболее экономичен и не требует высоких температур и сложных технологий. При этом позволяет иммобилизировать жидкие отходы непосредственно в цементной матрице путем замешивания их с сухими компонентами.

В качестве сухих компонентов при цементировании РАО используются цемент, а также природные инертные материалы, такие как песок и бентонитовые глины [3]. Даже частичная замена этих компонентов на отходы других производств, например на золошлаки угольных ТЭЦ, позволяет значительно увеличить экономическую эффективность способа вместе с сокращением площадей, отчуждённых под золоотвалы, и уменьшением негативного воздействия на окружающую природную среду.

В работе рассмотрен процесс цементирования жидких радиоактивных отходов [4] как наиболее применяемый способ кондиционирования РАО для последующего долговременного размещения.

Целью исследования является определение возможности использования отходов угольных энергетических установок как наполнителя в технологии цементирования РАО. В исследовательской лаборатории по обращению с РАО Политехнического института для подтверждения данной возможности была проведена серия экспериментов с образцами бетонного компаунда, созданного с использованием золы уноса котельной, а также золошлаков угольных ТЭЦ. В качестве жидкости использовалась специально приготовленная кавитационно обработанная в суперкавитационном реакторе вода. При изготовлении образцов использовали следующую схему смешивания компонентов: отходы загружали в пластиковые стаканы в заданных соотношениях и перемешивали. Через 15 минут добавляли расчетное количество цемента и воды и смесь тщательно перемешивали. Полученную смесь вносили в специально изготовленные формы из фторопласта для формирования образцов диаметром и высотой по 20 мм. Путем легкого постукивания по корпусу форм в течение нескольких минут смесь уплотняли и удаляли из нее воздух. После этого формы с образцами помещали на 24 часа в камеру нормального твердения, обеспечивающую при температуре 20–30 °C относительную влажность воздуха 95 ± 5 %. Через сутки образцы извлекали из форм и помещали их обратно в камеру нормального твердения на 28 суток. После выдержки образцы испытывали на механическую прочность при сжатии. Для обеспечения сопоставимости и достоверности результатов характеристики образцов определяли по данным трех опытов.

Результаты экспериментов подтверждают, что увеличение удельной поверхности цемента непосредственно в водной среде с помощью кавитационного диспергирования позволяет полнее использовать его потенциальные свойства и повысить степень гидратации и поверхностную энергию частиц [5]. Удается получить структуру цементного камня даже с использованием отходов тепловой энергетики с характеристиками по прочности выше, чем при приготовлении раствора в обычных смесителях без кавитационной обработки.

Таким образом, показано, что использование данной технологии позволяет заменить природные наполнители на отходы твёрдотопливной энергетики, значительно сократив их количество в золоотвалах без снижения критических показателей безопасности, кондиционированных РАО.

Список литературы

1. Ахмедзянов В. Р., Лащёнова Т. Н. Обращение с радиоактивными отходами. М.: Энергия, 2008. 210 с.

2. Кулагина Т. А., Козин О. А., Матюшенко А. И. Экологическая безопасность техносферных объектов: монография. Красноярск: Гротеск, СФУ, 2015. 323 с.

3. Кулагина Т. А., Кулагин В. А., Матюшенко А. И. Техносферная безопасность в ядерной энергетике: учеб. пособие. Красноярск: Гротеск, 2014. 286 с.

4. Кулагина Т. А., Попков В. А. Влияние кавитационно активированной воды на характеристики цементного компаунда // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8 (3). С. 362-368.

5. Кулагина Т. А., Попков В. А. Подготовка радиоактивных отходов к длительному хранению (захоронению) с помощью цементных компаундов // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8 (7). С. 917-927.

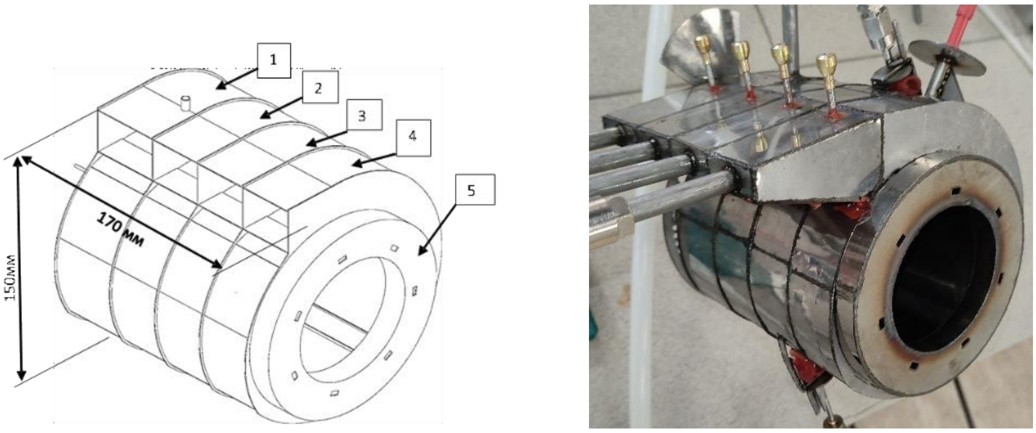
ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОГО ПРЕДТОПКА

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

Дальневосточный федеральный университет
690850, Российская Федерация, Владивосток, ул. Суханова, 8
* *Kulik_av@dvfu.ru*

Представлена разработанная и изготовленная лабораторная модель воздухоохлаждаемого циклонно-вихревого предтопка без огнеупорной обмуровки с меняющимся положением газовых сопел и регулируемыми по высоте воздушными соплами для исследования процессов аэродинамики, теплообмена и определения оптимальных режимов работы.

В ДВФУ создана уменьшенная в пятнадцать раз лабораторная модель (рис. 1) циклонно-вихревого предтопка (ЦВП) без огнеупорной обмуровки с регулируемыми по высоте воздушными соплами для исследования процессов аэродинамики, теплообмена и определения оптимальных режимов работы при сжигании в нём метана и синтез-газа [1–4].

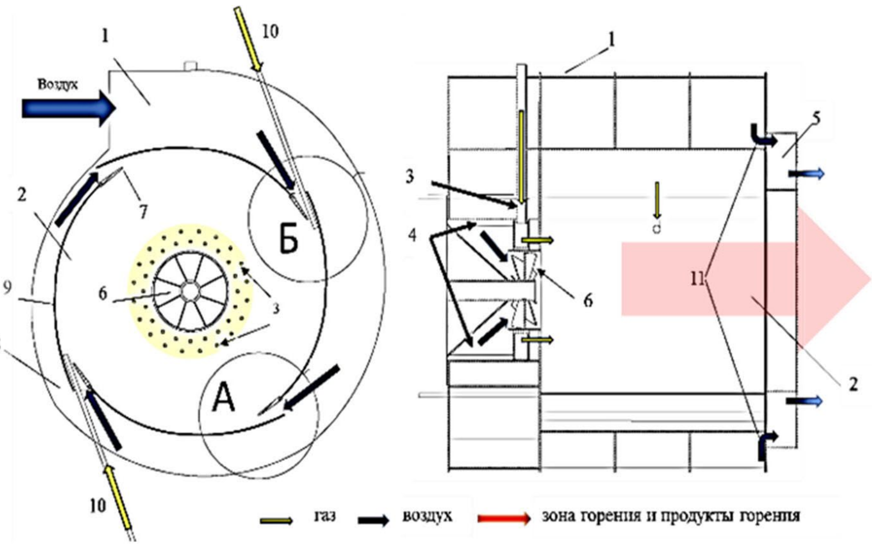


1 – торцевая вихревая камера; 2 – обечайка № 1; 3 – обечайка № 2;
4 – обечайка № 3; 5 – пережим

Рис. 1. Внешний вид лабораторной модели ЦВП

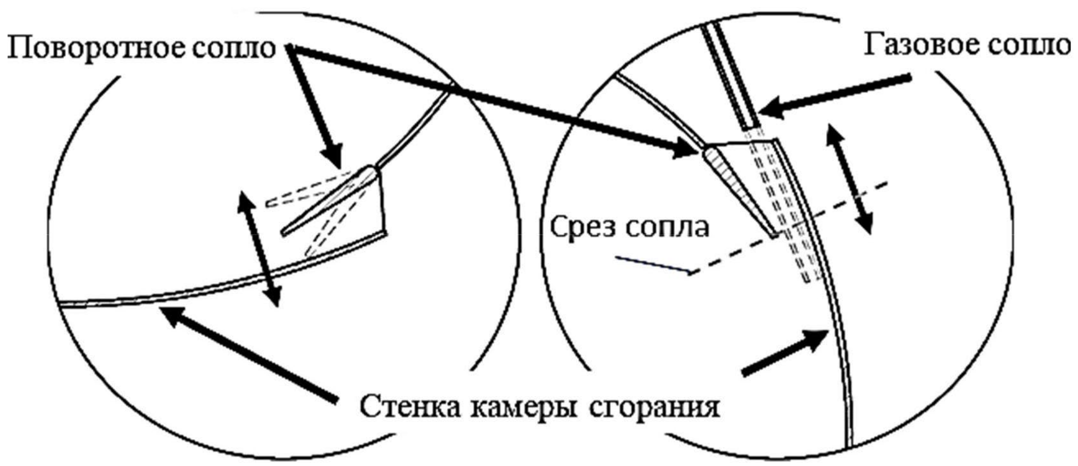
Воздух в ЦВП подается по распределительному воздушному коробу (рис. 2) в камеру сгорания (КС) ЦВП двумя основными потоками – аксиально и тангенциально. Аксиально воздух подается через торцевую вихревую камеру с закруткой воздуха в завихрителе, а тангенциально распределяется через сопла тангенциального ввода воздуха. Газообразное топливо подается в КС через сопловые тангенциальные вводы и через сопла торцевого ввода газа.

Основной особенностью лабораторной модели ЦВП является отсутствие огнеупорной обмуровки, наличие рычагов, позволяющих менять высоту тангенциальных воздушных сопел (рис. 3) и возможность менять положение газовых вводов относительно среза тангенциальных воздушных сопел (рис. 3).



1 – распределительный короб; 2 – камера сгорания ; 3 – осевой ввод газа; 4 – торцевая вихревая камера; 5 – пережим; 6 – завихритель; 7 – сопла тангенциального ввода воздуха; 8 – «улитка»; 9 – стенки камеры сгорания; 10 – тангенциальный ввод газа; 11 – переток воздуха в пережим

Рис. 2. Схема лабораторной модели ЦВП. Поперечный (слева) и продольный (справа) разрезы



Регулируемый зазор

Регулируемое положение газового ввода относительнотангенциального воздушного сопла среза тангенциального воздушного сопла

Рис. 3. Схема регулировки воздушных и газовых сопел

Регулирование высоты тангенциальных воздушных сопел происходит за счёт поворота стенки тангенциального воздушного сопла. Это позволит изменять скорость истечения воздуха в КС ЦВП, контролировать процессы охлаждения стенки КС ЦВП, а также совместно с изменением положения газовых сопел формировать области смесеобразования и горения газа.

Лабораторная модель ЦВП оснащена съёмными стенками КС для их замены в случае повреждения или замены на стенки с нанесённым на них термобарьерным покрытием. Пережим также является съёмным элементом для возможности его замены в случае температурной деформации и повреждения.

Проведены пробные запуски лабораторной модели ЦВП при сжигании метана, которые показали высокую устойчивость развития пламени в КС ЦВП и визуально отсутствие перегрева стенок камеры сгорания и пережима. Результаты исследований, проводимых на лабораторной модели ЦВП, позволят предложить усовершенствованную конструкцию ЦВП и эффективные режимы работы, а также послужат основой разработок камеры сгорания газотурбинных установок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2022-0010).

Список литературы

1. Патент на полезную модель № 207013/11.05. 2021 г. Штым А. Н., Штым К. А., Соловьёва Т. А., Гончаренко Ю. Б. Циклонный предтопок.
2. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками. 2012.
3. 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.
4. Соловьёва Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками: дис. … канд. техн. наук. 05.14.04. Красноярск: ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, 2017.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

А. В. Лесных*, К. А. Штым, Ю. Б. Гончаренко*

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

Предложен метод безмазутной подсветки пылеугольного факела на основе пористых излучателей. Рассмотрена технологическая схема установки. Приводятся результаты пусконаладочных работ и рекомендации по ведению режимов работы.

Пористые материалы и горелки, изготовленные на основе *NiAl*, обладают рядом преимуществ, наиболее важным из которых является повышенная лучистая теплоотдача [1, 2]. В энергетике для подсветки пылеугольных факелов и розжига котлов применяется дорогостоящий мазут. На сегодняшний день с учетом стоимости мазута затратами на транспортировку и эксплуатацию мазутных хозяйств тепловых электрических станций перспективно выглядит его частичная или полная замена.

Для обеспечения необходимым количеством теплоты для подсветки пылеугольного факела предполагается использовать природный или сжиженный углеводородные газы. На текущий момент разработана и собрана установка для безмазутного розжига угольной пыли. Технологическая схема установки приведена на рис. 1.

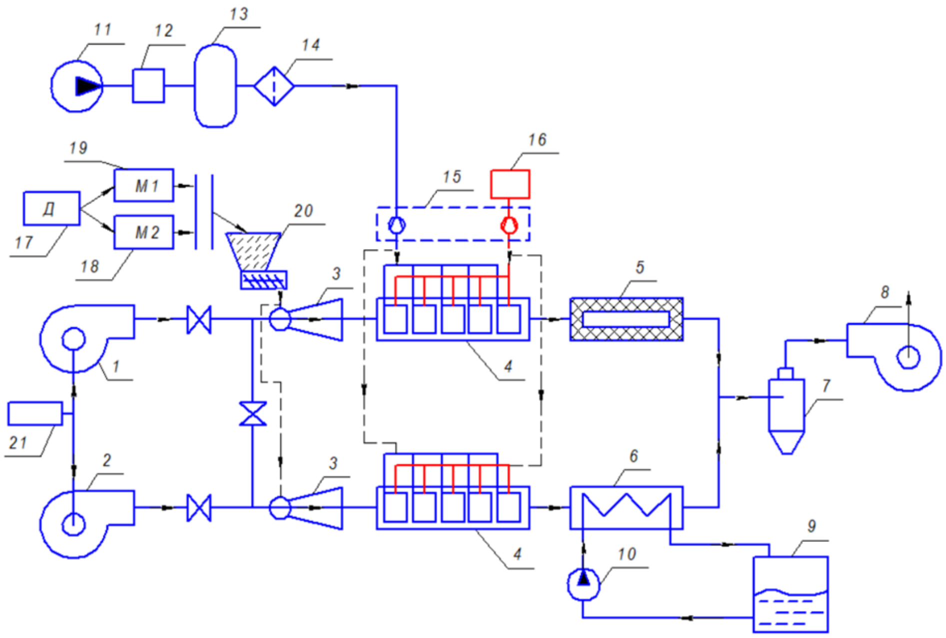


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки:
1 – вентилятор высоконапорный; 2 – вентилятор низконапорный; 3 – эжектор; 4 – модуль для розжига пыли; 5 – футерованная труба; 6 – водоохлаждаемая труба; 7 – золоуловитель; 8 – дымосос; 9 – бак охлаждающей воды; 10 – насос; 11 – компрессор; 12 – осушитель; 13 – ресивер; 14 – блок фильтрации; 15 – узел регулирования к радиационным горелкам; 16 – баллон с пропаном; 17 – дробилка; 18, 19 – дисковый истиратель; 20 – питатель пыли; 21 – калорифер

Пусконаладочные работы проводились с угольной пылью, полученной из угля Хакасского месторождения марки «Д». Характеристики пыли приведены в табл. 1. Во время пусконаладочных работ выявлено отсутствие воспламенения пыли в диапазоне концентраций 0,03–0,1 кг/м^3. С ростом концентрации до значений 0,11–0,15 кг/м^3 наблюдается неустойчивое воспламенение с выгоранием 15–20 % от всего подаваемого топлива. Факел стабилизируется при повышении концентрации пыли до значений 0,16–0,21 кг/м^3.

Таблица 1

Характеристика угольной пыли во время экспериментальных измерений

Параметр	Влажность, $W_{пл}^{r}$, %	Зольность, $A_{пл}^{r}$, %	Низшая удельная теплота сгорания, Q_i^r, МДж/кг	Выход летучих веществ, V^{daf}, %	Остаток на сите R90, %
Значение	5–8	8–15	22,6–23,4	38–42	57–65

При проведении экспериментальных измерений выявлено, что необходимая скорость потока первичного воздуха должна находиться в диапазоне 7–16 м/с, что при различной концентрации угольной пыли позволяет обеспечить силу, превышающую вес угольных частиц и их доставку в зону радиационных излучателей, где за счет сгорания угля и высокой температуры поток еще больше ускоряется и уносит продукты сгорания за пределы камеры. При скоростях менее 7 м/с частицы сепарируются из потока и накапливаются в нижней части камеры сгорания, что приводит к необходимости проводить очистку установки.

Оптимальная температура на стенке радиационного излучателя находится в диапазоне 1025–1100 ºС, при данной температуре происходит надежное воспламенение при соблюдении прочих условий. Снижение температуры на стенке ниже 800 ºС не обеспечивает надежного воспламенения. Поверхности радиационных излучателей способны разогреваться до температур 1300 ºС и выше, однако в этом нет необходимости, так как мощности теплового излучения 175–200 кВт/м^2 вполне достаточно для воспламенения угольной пыли [3]. Кроме того, при высоких температурах поверхность модулей становится более хрупкой и с возможным использованием углей с повышенной абразивностью их износ увеличится. Также высокие температуры опасны для углей с легкоплавкой золой, которая в зоне высоких тепловых напряжений будет переходит в псевдожидкое состояние, а при покидании вышеуказанных зон налипать на относительно холодные стенки и зашлаковывать их.

В настоящий момент проводятся работы по оптимизации конструкции данной экспериментальной установки и ее пилотному внедрению на Биробиджанской ТЭЦ.

Список литературы

1. Fursenko R., Maznoy A., Odintsov E., Kirdyashkin A., Minaev S., Sudarshan K. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni-Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 98. P. 277–284.

2. Патент RU 2640305 / Минаев С. С., Гущин А. Н., Цой К. А., Гущин Д. А., Кирдяшкин А. И., Штым К. А., Мазной А. С., Филиппов Д. А. Радиационная газовая горелка http://www.findpatent.ru/patent/264/2640305.html.

3. Бурдуков А. П., Чернова Г. В., Чурашев В. Н., Коновалов В. В. Проблемы замещения мазута в теплоэнергетике // Новые технологии сжигания твёрдого топлива: их текущее состояние и использование в будущем: всероссийский научно-технический семинар. М.: Изд. ВТИ, 2001.

ВЛИЯНИЕ СЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА НА ШЛАКООБРАЗОВАНИЕ ТОПКИ КОТЛА

Е. Е. Лучкина[1‡], О. А. Сидоркина[1], Ю. В. Караева[2]*

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68
[2]Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Лобачевского, 2/31
‡ yekaterina.luchkina@inbox.ru

Проведена оценка влияния сжигания композиционного топлива, состоящего из угля и лузги подсолнечника, на шлакообразование топки котла. Данные химического состава золы использовались для определения основно-кислотного соотношения, индекса вязкости шлака и коэффициента обрастания. Определена температура размягчения и температура нормального шлакоудаления.

Смешивание угля с лузгой подсолнечника, содержащей различные минеральные вещества, может создавать проблемы, которые не только затрудняют работу котла, но также могут сделать невыгодным совместное сжигание биомассы с углем в традиционных энергетических системах [1]. В данной работе предпринята попытка оценить влияние сжигания композиционного топлива на шлакообразование стен топки котла.

Объектами исследования являлись смеси угля Подмосковного угольного бассейна и лузги подсолнечника (ЛП) в следующих соотношениях: 80 % и 20 %; 85 % и 15 %, 90 % и 10 %. Данные по химическому составу золы угля были взяты из [2]. Химический анализ минеральной части ЛП проводился с помощью энергодисперсионного флуоресцентного рентгеновского спектрометра EDX-800HS2 («Shimadzu», Япония). В табл. 1 представлен химический состав золы угля и лузги подсолнечника.

Таблица 1

Химический состав золы угля и лузги подсолнечника

Компонент	SiO_2	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	P_2O_5	SO_3	Прочие
Уголь	52	0,1	6,8	0,6	30	3,4	0,1	0	5,5	1,5
ЛП	1,213	38,693	26,896	5,004	0	13,658	0	4,649	8,514	1,374

Основными составляющими зольного остатка угля являются оксиды кремния и алюминия, лузги подсолнечника – оксиды калия и кальция. Исследуемый уголь обладает зольностью 5,5 %, лузга подсолнечника – 3,5 %. Из этого следует, что данные образцы относятся к низкозольным.

Для определения энерготехнологических свойств композитов были рассчитаны основные параметры шлакования золы (табл. 2). Формулы для расчёта параметров были взяты из [2; 3].

По данным основно-кислотного соотношения ($R_{B/A}$) можно сделать вывод о том, что исследуемые композиты не будут шлаковаться ($R_{B/A} < 0,6$).

Индекс вязкости шлака (S_R) золы композитов 2 и 3 больше 72, следовательно, они обладают низкой склонностью к шлакованию, в отличие от золы композита 1, который имеет среднюю склонность к шлакованию ($65 < S_R < 72$). Также были рассчитаны температура размягчения $t_в$ и температура нормального шлакоудаления $t_{нш}$, на основе которых зольный остаток рассматриваемых композитов можно отнести к тугоплавким, так как $t_в > 1200°C$. При увеличении содержания угля в композиции температура нормального шлакоудаления повышается незначительно.

Зола лузги подсолнечника обладает экстремально высокой степенью обрастания, однако для нормальной работы котла данный показатель не должен превышать 0,6. Смешиванием лузги подсолнечника с углем удалось достигнуть значительного снижения коэффициента обрастания. Кроме того, температура размягчения золы композитов увеличивается по сравнению с температурой размягчения золы лузги подсолнечника, тем самым уменьшается вероятность образования шлаковых отложений при сжигании.

Таблица 2

Основные параметры шлакования золы

Параметр шлакования	Композит 1 (80 % угля и 20 % ЛП)	Композит 2 (85 % угля и 15 % ЛП)	Композит 3 (90 % угля и 10 % ЛП)
Основно-кислотное соотношение	0,39	0,31	0,25
Индекс вязкости шлака	70,21	73,49	76,67
Коэффициент обрастания	3,08	1,88	1,00
Коэффициент плавления	3,71	4,36	5,18
Температура размягчения	1252	1279	1314
Коэффициент нормального шлакоудаления	1,02	1,09	1,15
Температура нормального шлакоудаления	1407	1426	1445

Анализ полученных результатов показал, что создание композиционного топлива, состоящего из угля и лузги подсолнечника, обеспечивает достаточную эффективность их энергетического использования. Наиболее оптимальными соотношениями угля и лузги подсолнечника являются следующие: 85 % и 15 %, 90 % и 10 %. При данных соотношениях наименьшая вероятность образования шлаковых отложений.

Список литературы

1. Pronobis M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations // Biomass and Bioenergy. 2005. V. 28. N 4. P. 375–383.

2. Федорова Н. И., Исмагилов З. Р. Характеристика химического состава золы сапропелитовых углей различных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 27–32.

3. Цветков М. В. [и др.] Плавкость золы отходов растениеводства в условиях высокотемпературной переработки // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. № 3. С. 371–379.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОССИЙСКИХ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТО-ЛИТИЕВЫХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ В СОСТАВЕ ПАРОГАЗОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ УГЛЯ

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, 20
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[*] mukhindg@mail.ru

Парогазовые энергоустановки с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) являются наиболее эффективными энергетическими установками на твёрдом топливе. Однако для их работы в летний период необходимо охлаждать воздух на входе в ГТУ. Для этих целей наиболее подходящими устройствами являются абсорбционные бромисто-литиевые термотрансформаторы (АБТТ). В качестве оптимального источника энергии для АБТТ, доступного на ПГУ-ВЦГ, предложено использовать синтез-газ после газификатора с температурой около 1000 °С. Располагаемого температурного потенциала синтез-газа достаточно для реализации цикла АБТТ с трехступенчатой десорбцией. На основе выполненных авторами расчетов для ПГУ-ВЦГ предложено использовать АБТТ с трехступенчатой десорбцией и двухступенчатой абсорбцией рабочего тела. Предложенные АБТТ можно изготовить на российских предприятиях путем установки дополнительных блоков на серийное выпускаемое оборудование.

Перспективным направлением развития электрогенерации на твердом топливе является создание парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ). Эти современные высокопроизводительные энергоустановки на твердом топливе позволяют вырабатывать электроэнергию с КПД-нетто 45–47 %. Разработка высокоэффективных ПГУ-ВЦГ относится к приоритетному направлению развития технологий и техники РФ в области энергосбережения и эффективного преобразования энергии на органическом топливе.

В составе ПГУ-ВЦГ (рис. 1) имеются газификатор, вырабатывающий синтез-газ из угля, газотурбинная установка (ГТУ), котёл утилизатор (КУ) и паротурбинная установка (ПТУ). Рабочим параметром, определяющим производительность ПГУ, является температура воздуха на входе в компрессор ГТУ. Номинальная мощность газовой турбины указывается при расчетной температуре воздуха +15 ºС, однако при температуре +35 ºС падение мощности турбины может достигать 15–20 % от номинальной. Повышение эффективности работы ГТУ в жаркий период достигается искусственным охлаждением воздуха на входе в компрессор. Для этого в воздухозаборник компрессора устанавливается теплообменный аппарат и каплеуловитель со сборником влаги. В трубы теплообменника подаётся жидкость, охлаждённая в холодильном устройстве. Для охлаждения жидкости могут быть применены электроиспользующие парокомпрессионные термотрансформаторы (ПКТТ) и теплоиспользующие абсорбционные бромисто-литиевые термотрансформаторы (АБТТ). ПКТТ для данных целей использовать нецелесообразно по причине большого потребления ими электроэнергии. Напротив, использование АБТТ, для работы которого требуется практически только тепловая энергия, представляется наиболее целесообразным.

На ПГУ-ВЦГ для АБТТ имеется в наличии несколько источников высокопотенциального тепла (рис. 1). Первый источник – непосредственное сжигание синтез-газа в десорбере АБТТ при помощи горелки. Однако синтез-газ является топливом для ГТУ. Использование небольшой его части в АБТТ, а не в ГТУ приведёт к снижению выработки электроэнергии. Второй источник – сбросные дымовые газы после ГТУ либо КУ. Этот источник является оптимальным с точки зрения энергосбережения, однако его температура после КУ может быть недостаточной для реализации холодильного цикла АБТТ. Третий источник – теплота синтез-газа после газификатора, которая непосредственно утилизируется в АБТТ (производится охлаждение части синтез-газа). Температура синтез-газа после газификатора может составлять ~ 1000 ºС. Её достаточно для осуществления рабочего цикла АБТТ с трёхступенчатой десорбцией, имеющего эффективность на 30 % выше, чем у АБТТ с двухступенчатой десорбцией. Таким образом, данный источник тепла для работы АБТТ является наиболее оптимальным. Кроме того, перед подачей в ГТУ синтез-газ охлаждается в теплообменных аппаратах – охладителях со сбросом тепла в атмосферу (теплоносители – воздух, охлаждающая вода).

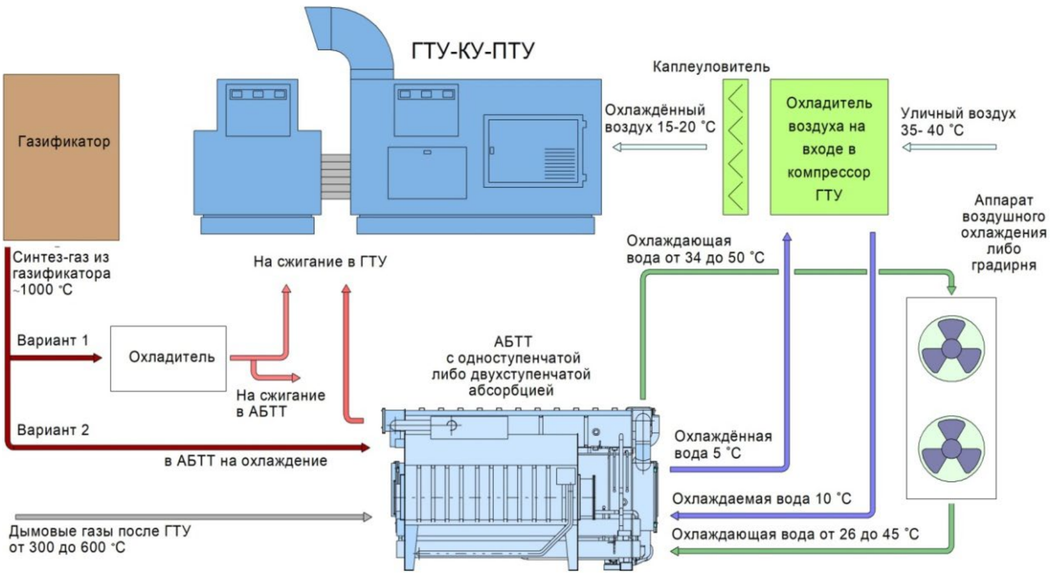


Рис. 1. Схема охлаждения воздуха на входе ГТУ с помощью АБТТ, установленного на ПГУ-ВЦГ

Для ПГУ-ВЦГ может быть предложена установка АБТТ с трехступенчатой абсорбцией и двухступенчатой десорбцией абсорбента. Двухступенчатая абсорбция в АБТТ [1; 2] позволяет достичь большого перепада температур между охлаждающей и охлаждённой жидкостями. Таким образом, для отведения тепла от АБТТ с двухступенчатой абсорбцией можно использовать аппарат воздушного охлаждения (АВО) и отказаться от градирни, для работы которой необходима подпиточная вода с высокими требованиями по ее обессоливанию.

Для АБТТ с трехступенчатой десорбцией и двухступенчатой абсорбцией, работающей в составе ПГУ-ВЦГ, были определены расчетные значения теплового коэффициента при охлаждении воздуха на входе в ГТУ.

В условиях штучного производства АБТТ в России рабочие модификации с трехступенчатой десорбцией и двухступенчатой абсорбцией могут быть изготовлены путем дооснащения стандартного промышленного АБТТ дополнительными блоками, которые могут размещаться отдельно от основной части. Такое решение позволяет значительно расширить область эффективного применения АБТТ в составе энергетических систем.

Список литературы

1. Stepanov K. I., Mukhin D. G. Energy efficiency of an absorption thermotransformer with two-stage absorption as part of a heat and cold supply complex based on a gas boiler house// Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2119, iss. 1. 012–105. 6 p. DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012105.

2. Мухин Д. Г., Степанов К. И., Елистратов С. Л. Перспективы применения российских абсорбционных термотрансформаторов на ПГУ-ТЭЦ // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2022. № 4 (57). С. 39–49. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-4-39-49.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПНЕВМОИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОХОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ КОРПУСОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

П. А. Необъявляющий[1, 2‡], А. А. Дектерев[1, 2], Д. А. Дектерев[1, 2], Д. В. Бойков[1, 2], Д. В. Платонов[1, 2*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
‡ neopan14@yandex.ru

На алюминиевых заводах компании РУСАЛ для предотвращения формирования пылевых отложений в сети газоходов системы газоочистки электролизных корпусов внедряется система автоматической пневмоимпульсной очистки с применением пневмогенераторов. Целью работы являлась разработка рекомендаций по усовершенствованию системы. Были выполнены экспериментальные исследования теплотехнических параметров газовых потоков в газоходах, исследования физико-химических свойств отложений и их поведения в газоходах, разработана математическая модель системы пневмоимпульсной очистки от отложений. Для верификации и адаптации математической модели были проведены исследования параметров работы пневмогенераторов на экспериментальной установке. В результате выполненных расчетных исследований были разработаны рекомендации по типу, количеству, местам установки, режимам и алгоритмам работы пневмогенераторов.

При электролитическом производстве алюминия образуется пылегазовая смесь, которая собирается в укрытии электролизера и после частичного термического обезвреживания смолистых и горючих компонентов газа удаляется системой газоотсоса. Система газоотсоса представляет сложную разветвленную, протяженную сеть газоходов различных диаметров, которая собирает пылегазовые выбросы от электролизеров бригады (порядка 20 электролизеров) и транспортирует их в систему газоочистки. Основные требования, предъявляемые к работе системы газоотсоса, заключаются в обеспечении необходимого объема газоудаления от всех электролизеров бригады.

Основные трудности в эксплуатации системы дожигания и очистки газов, поступающих от электролизеров, связаны с формированием отложений в трубопроводах системы газоотсоса. Рост аэродинамического сопротивления участков газоходного тракта приводит к увеличению неравномерности объемов газоудаления от электролизеров бригады, что, в свою очередь, снижает эффективность дожигания горючих газов и смолистых веществ с канцерогенами. Наблюдается интенсификация роста слоя горючих отложений по тракту, повышается пожаровзрывоопасность и ухудшается атмосфера в зоне обслуживания электролизеров. Все это снижает надежность системы газоотсоса при непрерывном производстве, эффективность очистки газов и приводит к резкому возрастанию ремонтных и эксплуатационных затрат.

В настоящее время на алюминиевых заводах компании РУСАЛ для предотвращения формирования пылевых отложений в сети газоходов системы газоочистки электролизных корпусов внедряется система автоматической пневмоимпульсной очистки. Система представляет собой ряд пневмоимпульсных устройств (пневмогенераторов), установленных на трубопроводах системы газоотсоса корпуса электролиза.

Целью работы являлась разработка технического решения по усовершенствованию системы автоматической пневмоимпульсной очистки.

Для расчетного исследования системы автоматической пневмоимпульсной очистки газоходов была разработана математическая модель газоходов, оборудованных пневмоимпульсной системой очистки от отложений с двумя типами пневмогенераторов ПГ 25/8 и ПиНУ-25-1.

Для верификации и адаптации математической модели были выполнены экспериментальные исследования теплотехнических параметров газовых потоков в газоходах, определены толщины слоя отложений и произведен отбор образцов пыли из отложений в газоходах системы газоотсоса, исследованы физико-химические свойства отложений и их поведение в газоходах.

С целью исследования параметров работы пневмогенераторов ПГ 25/8 и ПиНУ-25-1, а также верификации математической модели была изготовлена и оснащена оборудованием специализированная экспериментальная установка (рис. 1).

Рис. 1. Экспериментальная установка

На специализированной экспериментальной установке были выполнены следующие измерения:

– динамики давления в пневмогенераторах;
– пульсаций давления в газоходе;
– температуры воздуха на входе в газоход;
– скорости в газоходе.

Исследования выполнялись для двух типов пневмогенераторов ПГ 25/8 и ПиНУ-25-1 в зависимости от давления воздуха в форкамере, угла установки выхлопного сопла на газоходе и диаметра газохода.

Также на экспериментальной установке было исследовано влияние скорости потока на интенсивность уноса пыли глинозёма. Установлено, что полный унос отложений глинозема происходит при скорости потока в газоходе 16 м/с и более.

На основе полученных экспериментальных данных была выполнена адаптация математической модели системы пневмоимпульсной очистки от отложений (рис. 2).

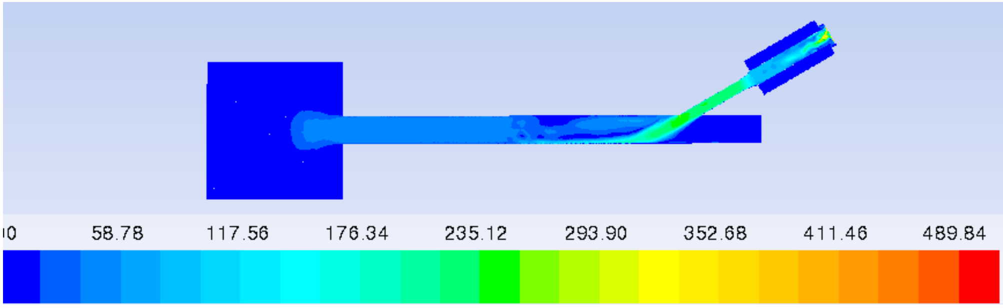


Рис. 2. Модуль скорости в момент времени 30 мс, м/с

В результате выполненных расчетных и оптимизационных исследований системы пневмоимпульсной очистки газоходов от отложений были разработаны рекомендаций по типу, количеству, местам установки, режимам и алгоритмам работы пневмогенераторов на газоходах различных конфигураций электролизных корпусов АО «РУСАЛ Красноярск» и АО «РУСАЛ Новокузнецк».

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

И. С. Садкин[⁑]**, П. А. Щинников**[*]

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
[⁑] *sadkinvanya@mail.ru*

В работе проводится анализ термодинамических особенностей энергетических циклов на углекислом газе, связанных с работой регенеративной установки, которая обеспечивает нагрев рабочего тела перед камерой сгорания топлива и имеет одно из определяющих значений в достижении высокой эффективности подобных энергетических циклов.

Существует понимание, что проблему декарбонизации переходом к зеленой генерации в полном объеме не решить. Поэтому одним из направлений развития энергетики является создание углерод-нейтральных технологий. Это направление развития обусловлено необходимостью обеспечить снижение антропогенного выброса CO_2 в атмосферу при использовании органического топлива, которая, в свою очередь, связана со стремлением мирового сообщества ограничить рост температуры в этом столетии на 2 °С, что зафиксировано в Парижском Соглашении по климату.

Для энергетики на органическом топливе подобные технические решения связаны с созданием кислородно-топливных циклов на углекислоте [1; 2]. Принципиально их можно разделить на четыре типа [3]: с конденсацией рабочего тела; с повышением давления компрессором либо насосом; с двухступенчатым повышением давления компрессором и насосом (рис. 1). Во всех случаях основой рабочего тела является диоксид углерода. Дополнительно рабочее тело может содержать некоторое количество водяных паров, обусловленных водородом топлива.

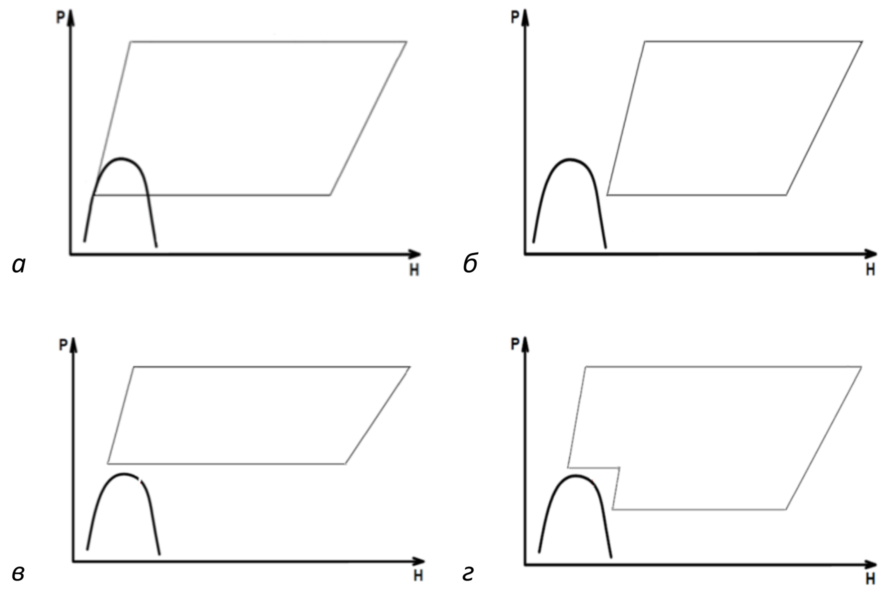


Рис. 1. Ph-диаграммы CO_2-циклов: *а* – с конденсацией рабочего тела; *б* – с одноступенчатым компрессорным повышением давления; *в* – с одноступенчатым повышением давления насосом; *г* – с двухступенчатым повышением давления компрессором и насосом

Представленные углекислые циклы изучены мало, их термодинамические особенности представляют интерес. Далее рассмотрены особенности регенеративного подогрева при организации подобных циклов.

В основе методики исследования лежат уравнения материального и энергетического балансов камеры сгорания и многопоточного теплообменника системы регенерации с учетом допущений [4]: все процессы проходят без теплообмена с окружающей средой; потерями в агрегатах пренебрегают; свойства рабочего тела определяются свойствами диоксида углерода, так как его массовая доля превышает 95 %; температура подвода рабочего тела к камере сгорания не может превышать температуру на выходе из турбины; конструкция регенеративного теплообменника не влияет на передачу теплоты в нем. В качестве топлива для расчета принят метан.

В результате многовариантных расчетов в диапазоне значений начального давления 100–300 бар, начальной температуры 500–1400 °С получено, что для закритических CO_2-циклов доля теплового потока, подведенного через регенеративный теплообменник, в рабочих диапазонах начальных температур и давлений составляет более 50 % от суммарного потока теплоты, подведенного к рабочему телу. При этом введение в состав рабочего тела 1 % воды по массе дает прирост теплового потока регенератора на ~3 %. Удельный теоретический тепловой поток, который может быть направлен в регенератор, имеет близкую к прямо пропорциональной зависимость от начальной температуры рабочего тела, а в зоне рабочих температур 1000–1200 °С составит 600–1100 кДж/кг·CO_2 в зависимости от содержания в рабочем теле водяных паров.

Показано, что температура на входе в камеру сгорания должна составлять от ~1/2 до 4/5 от температуры на выходе из нее для обеспечения высокой эффективности CO_2-циклов. Однако для укрупненных расчетов энергетических установок, реализующих CO_2-циклы температуру подвода рабочего тела к камере сгорания допустимо принимать на уровне 0,7 от температуры на выходе из нее.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00035, https://rscf.ru/project/23-29-00035/

Список литературы

1. Darabkhani H. G., Varasteh H., Bazooyar B. Oxyturbine power cycles and gas-CCS technologies // Carbon Capture Technologies for Gas-Turbine-Based Power Plants. Elsevier, pp. 39–74, 2023. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818868-2.00006-0.

2. Crespi F., Gavagnin G., Sánchez D., Martínez G. S. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review // Applied Energy, vol. 195, pp. 152–183, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.048.

3. Shchinnikov P., Borush O., Frantseva A., Sadkin I. Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration // E3S Web of Conferences, vol. 289, art. no. 02001, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902001

4. Садкин И. С., Щинников П. А. Влияние промежуточной регенерации на эффективность энергетических CO_2 циклов с двухступенчатым подъемом давления // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: материалы 16 международной науч.-техн. конф. «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов», Саратов. 11–13 окт. 2022 г. Саратов: Изд-во СГТУ, 2022. Вып. 11. С. 206–212.

ШЛАКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО ТОПЛИВА

О. А. Сидоркина[1⁑], Е. Е. Лучкина[1], Ю. В. Караева[2*]

[1]*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
420015, Российская Федерация, Казань, ул. Карла Маркса, 68
[2]*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН*
420111, Российская Федерация, Казань, ул. Лобачевского, 2/31
⁑ *leylik.sidorkina@mail.ru*

Проведено исследование шлакообразования при использовании композиционного топлива из угля и шлама биогазовой установки. По данным химического состава минеральной части определен оптимальный состав смеси с минимальной возможностью загрязнения поверхностей нагрева энергетического оборудования при высокотемпературной обработке. Определена температура размягчения золы.

После анаэробного сбраживания остается большое количество шлама. Не всегда его целесообразно использовать в качестве удобрения. В настоящее время одним из перспективных направлений его последующего применения является высокотемпературная конверсия. Особый интерес представляет использование его в составе композиционного топлива. Следует отметить, что шлам по своим характеристикам соответствует биомассе.

В качестве объектов исследования рассмотрены: уголь Кушмурунского месторождения (№ 1); уголь Будаговского месторождения Иркутского бассейна (№ 2); шлам биогазовой установки, образующийся в результате анаэробного сбраживания отходов агропромышленного комплекса (рис. 1).

Рис. 1. Шлам биогазовой установки

Данные по химическому составу золы были взяты из [1; 2]. Основно-кислотное соотношение I, индекс вязкости шлака S и коэффициент обрастания F использовались для определения оптимального состава смеси с минимальной возможностью загрязнения поверхностей нагрева энергетического оборудования при высокотемпературной обработке [3]:

$$I = (\mathrm{Fe_2O_3} + \mathrm{CaO} + \mathrm{MgO} + \mathrm{Na_2O} + \mathrm{K_2O})/(\mathrm{SiO_2} + \mathrm{Al_2O_3}), \quad (1)$$

$$S = 100 \cdot \mathrm{SiO_2}/(\mathrm{SiO_2} + \mathrm{Fe_2O_3} + \mathrm{CaO} + \mathrm{MgO}), \quad (2)$$

$$M = I/(Na_2O + K_2O). \quad (3)$$

Температуру размягчения шлака рассчитали по следующей формуле [1]:

$$t = 1094 + 42.5(SiO_2 + Al_2O_3)/(CaO + MgO + Fe_2O_3). \quad (4)$$

Параметры шлакования для составляющих композиционного топлива представлены в табл. 1. Значение основно-кислотного соотношения, свидетельствующее о том, что топливо не будет шлаковаться, находится в рекомендуемом диапазоне значений для всех композиционных топлив в соотношении уголь-шлам 1:1. Таким образом, доля шлама может достигать 50 %. При этом другие параметры шлакования не подтверждают минимальную возможность загрязнения поверхностей нагрева энергетического оборудования.

Таблица 1

Характеристики шлакования золы компонентов композиционного топлива

Параметр	Уголь № 1	Уголь № 2	Шлам	Рекомендуемые значения
Основно-кислотное соотношение *I*	0,05	0,17	1,76	< 0,6
Индекс вязкости шлака *S*	93,09	82,89	41,14	> 72
Коэффициент обрастания *F*	0,01	0,32	22,70	< 0,6
Температура размягчения *t*	2014	1388	1126	> 1200

На рис. 2 представлена зависимость индекса вязкости шлака от доли шлама в композиционном топливе.

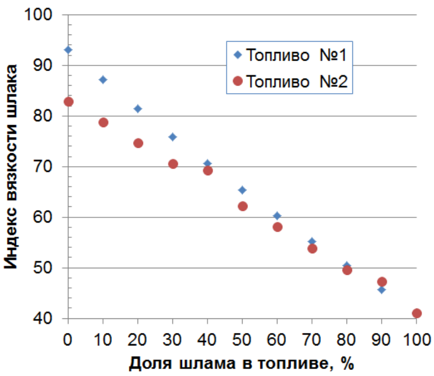


Рис. 2. Зависимость индекса вязкости шлака от доли шлама в композиционном топливе

Учитывая рекомендуемые значения параметров шлакования, определили оптимальный состав композиционного топлива (табл. 2). Следует отметить, что коэффициент обрастания для всех рассмотренных вариантов выше рекомендуемых значений.

Таблица 2

Характеристики шлакования золы компонентов композиционного топлива

Параметр	Топливо № 1	Топливо № 2
Доля угля, %	65	75
Доля шлама, %	35	25
Основно-кислотное соотношение	0,31	0,34
Индекс вязкости шлака	73,22	72,67
Коэффициент обрастания	1,45	1,57
Температура размягчения *t*	1267	1249

Таким образом, доля шлама биогазовой установки в составе композиционного топлива в смеси с углем Кушмурунского месторождения может достигать 35 %; с углем Будаговского месторождения Иркутского бассейна – 25 %.

Список литературы

1. Федорова Н. И., Исмагилов З. Р. Характеристика химического состава золы сапропелитовых углей различных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 27–32.
2. Karaeva J. [et al.] Thermochemical processing of digestate from biogas plant for recycling dairy manure and biomass // Biomass conversion and biorefinery. 2023. Vol. 13. P. 685–695.
3. Цветков М. В. [и др.] Плавкость золы отходов растениеводства в условиях высокотемпературной переработки // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. № 3. С. 371–379.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НОВОСИБИРСКА

А. Ю. Степанов, О. В. Боруш*

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
radiosound8923@mail.ru

В докладе рассмотрены источники теплоснабжения г. Новосибирска, приведено изменение в области теплоснабжения при замене руководителей теплоэлектроцентралей. Сделан анализ данных по значениям расходов натурального топлива по отпуску тепла и электроэнергии ТЭЦ и котельных АО «СИБЭКО». Показано изменение теплового баланса котельных г. Новосибирска и приведены условия для реконструкции котельной в мини-ТЭЦ.

В Новосибирске преобладает централизованное теплоснабжение от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), которые обеспечивают около 61 % бытовых и промышленных потребителей. Новосибирские тепловые станции используют в качестве топлива бурый и каменный угли для генерации тепловой и электрической энергии. Кроме ТЭЦ используются районные и промышленные котельные, работающие на угле и природном газе для обеспечения потребителей тепловой энергией. На балансе Новосибирска около 250 котельных, при этом 160 малых и мелких [1]. Основная доля котельных находится около жилых домов.

С 2013 г. Министерство энергетики России приняло план по переводу нагрузки на ТЭЦ от котельных в Новосибирске. Первоначально строительство котельных делалось с целью в короткий промежуток обеспечить людей тепловой энергией, а на сегодняшний день их содержание обходится дорого. С 2013 по 2018 г. в Новосибирске было выведено из строя 9 котельных, а их потребителей передали ТЭЦ. В конце 2017 г. Сибирская генерирующая компания (СГК) стала обладателем новосибирских ТЭЦ вместо Сибирской энергетической компании (СИБЭКО). СГК сразу поставила себе цель – перевести тепловые нагрузки котельных на ТЭЦ. С 2018 по 2020 г. СГК вывело из эксплуатации 15 котельных, а с 2022 по 2023 г. в планах произвести замену 8 котельных, работающих на угле на газовые котельные [2].

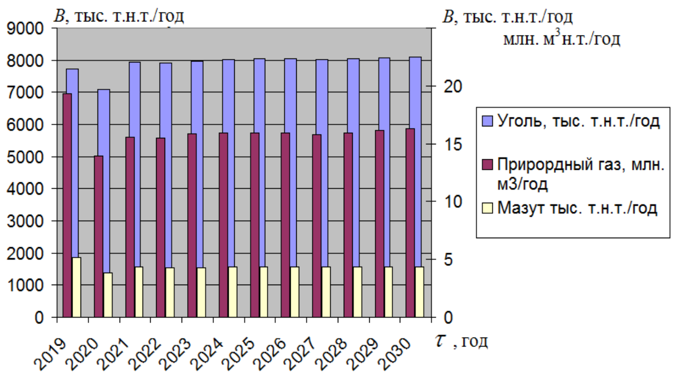


Рис. 1. Прогнозные значения расходов натурального топлива на ТЭЦ

Если смотреть по расходам натурального топлива (рис. 1) ТЭЦ, то видно, что СГК планирует в будущем нарастить расходы угля на выработку электроэнергии и теплоты [1]. При этом доля газа и мазута снизятся. Мазут необходим на станции, так как на котлах имеется мазутный розжиг, хоть и предпринимаются шаги для перехода к безмазутному розжигу.

Если рассматривать расходы натурального топлива котельных АО «СИБЭКО» (рис. 2), то с 2024 г. у них в планах сокращение расходов угля и природного газа в связи с политикой СГК по сокращению числа котельных [1].

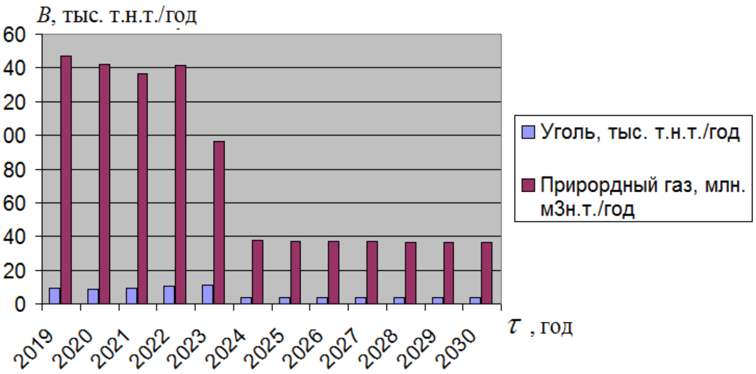


Рис. 2. Прогнозные значения расходов натурального топлива котельными АО «СИБЭКО»

Ниже представлено изменение теплового баланса новосибирских котельных в период с 2012 по 2022 г. (рис. 3). В 2018 г. наибольшее изменение введённых и выведенных мощностей, что связано с приходом СГК в Новосибирск.

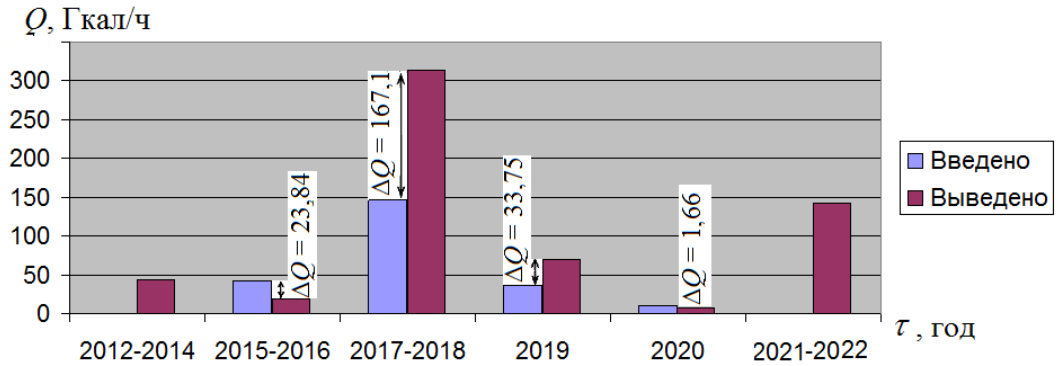


Рис. 3. Тепловой баланс котельных города Новосибирска

Тенденции будущего направлены на развитие малой генерации в российской и мировой энергетике из-за огромного потенциала, представляющего совместную выработку тепла и электроэнергии [3]. Из приведённого анализа видно, что в Новосибирске имеются все условия для создания мини-ТЭЦ:

1) котельная должна быть отопительная и работать на газу;

2) интервал тепловой нагрузки котельной должен располагаться в пределах от 20 до 100 Гкал/ч.

С помощью вырабатываемой электроэнергии можно покрыть:

1) собственные нужды котельной;

2) собственные нужды котельной и отправить на трансформаторную подстанцию удвоенное значение СН;

3) собственные нужды котельной и отправить по новым построенным линиям на трансформаторную подстанцию $N_э < 25$ МВт.

Список литературы

1. Схема теплоснабжения города Новосибирска до 2033 года (актуализация на 2023 год) [Электронный ресурс]. URL: http://www.degkh.ru/shema-ts (дата обращения: 10.01.2023).

2. 15 котельных переключила СГК на теплоснабжение от ТЭЦ в Новосибирске [Электронный ресурс]. URL: https://sibgenco.online/ special/15-kotelnykh-pereklyuchila-sgk-na-teplosnabzhenie-ot-tets-v-novosibirske (дата обращения: 22.01.2023).

3. Хохлов А. А., Мельников Ю. А., Веселов Ф. В., Холкин Д. А., Дацко К. А. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М.: СКОЛКОВО, 2018. 89 с.

ПЕРЕВОД КОТЛА ТПЕ-214 НА СЖИГАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Т. Е. Субботин*, О. В. Боруш*

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
* *tima-sub@mail.ru*

ТЭС на твердом виде топлива на протяжении многих лет были основной частью генерации тепла и электричества во всём мире. На сегодняшний день они играют главную роль в обеспечении теплом и электричеством в восточных регионах нашей страны, около 30 % всех электростанций России работают на твердом виде топлива. Большие запасы природного газа по сравнительно низким ценам и увеличение давления по поводу снижения вредных выбросов и переработки отходов на угольных электростанциях заставляют все больше задуматься об использовании газа.

Существует три пути газификации угольных электростанций:

– полная замена на новую ПГУ;

– демонтаж угольного котла и установка вместо него газовой турбины с котлом-утилизатором, паровая турбина с некоторыми изменениями остается та же;

– перевод угольного котла на сжигание природного газа.

Перевод угольного котла на природный газ влияет на весь газовый тракт котла, будь то котел, работающий под давлением или работающий под разряжением. Влияет на стехиометрию сгорания и количество воздуха для горения. На стороне воды и пара тоже произойдут изменения, возможно сместятся зоны насыщения и перегрева, скорости течения воды и пара в тракте.

Современные газовые горелки способны сжигать природный газ эффективно и полностью. Из-за отсутствия в нем серы, азота и золы при сжигании природного газа образуется значительно меньшее количество выбросов NOx, CO, соединений серы и твердых частиц, чем при сжигании угля.

Перевод котла на газ. Во многих случаях существующие угольные горелки могут быть изменены, чтобы на них можно было сжигать природный газ. Такой подход позволяет использовать существующие заслонки и привода горелки, воздушную коробку, монтажные пластины, что значительно снижает стоимость и время установки.

Правильное распределение воздушного потока на входе в горелку и на выходе из нее является ключевым фактором в любой системе горелок, поэтому необходимо выполнить перерасчет количество и давления воздуха для горелки.

Уменьшение выбросов в атмосферу NOx для горелок, работающих на природном газе, достигается увеличением соотношения воздух-топливо для снижения температуры внутри факела. Увеличение перепада давления в горелке может уменьшить длину пламени горелки. Дутьевые вентиляторы на большинстве угольных котлов имеют достаточную мощность для горелки на природном газе даже с большой потерей давления, хотя производительность дутьевого вентилятора все равно должна быть рассмотрена в технико-экономическом обосновании.

Горелки, установленные в углах котла, работают по-другому, чем горелки, установленные друг против друга. В горелках друг против друга создаются отдельные факелы, независимо управляемые, а тангенциальные горелки сконструированы таким образом, что каждый уровень горелок функционирует как одна единая горелка. Каждая горелка имеет сопла подачи воздуха для горения топлива в топке.

Изменения в касательной горелке для сжигания природного газа являются общими и обычно требуют минимального изменения угла поворота существующих сопел. Угол поворота существующих сопел часто оставляют без изменений.

Методы контроля выбросов. При переводе котла на природный газ, скорее всего, необходимо будет уменьшать предельно допустимые выбросы NOx. Есть несколько технологий, доступных сегодня на рынке для снижения NOx в котлах, работающих на газе.

Представлена эффективность различных методов снижения NOx:
– уменьшение избытка воздуха – 0–20 %;
– использование специальных горелок – 25 %;
– использование третичного дутья – 25 %;
– отключение верхних горелок – 25 %;
– рециркуляция дымовых газов – 25–75 %;
– селективное каталитическое восстановление – 90 %;
– селективное некаталитическое восстановление – 30 %.

Процесс очистки уходящих газов от оксидов азота, основанный на восстановлении оксидов азота аммиаком, аммиачной водой, мочевиной (карбамидом) и другими азотосодержащими соединениями, впрыскиваемыми в газовый тракт котла при температурах 800–1200 °С. Паровой котел марки ТПЕ-214 работает на твердом топливе. Характеристика бурого угля марки 2Б приведена в табл. 1. На ТЭС ряда регионов повысилась доля потребления природного газа. Поэтому при использовании газового топлива и отказе от систем пылеприготовления упрощается эксплуатация и повышается экономичность устаревших котлоагрегатов.

Таблица 1

Характеристика твердого топлива

Характеристика	Бурый уголь марки 2Б
Низшая теплота сгорания (рабочая) $Q_н^р$, ккал/кг	3 969
Влажность на рабочую массу $W_{ср}^р$, %	33
Зольность на рабочую массу $A_{ср}^р$, %	5,12
Выход летучих на рабочую массу $V_{ср}^р$, %	46,2

Применение газового топлива в ряде промышленных предприятий способствует повышению производительности промышленных агрегатов. Природный газ обладает высокой теплотой сгорания и относительно низкой стоимостью, для его хранения нет необходимости в складских помещениях. Имея высокие экологические показатели по сравнению с другими видами топлива, природный газ все более востребован, особенно в связи с все возрастающими экологическими требованиями, которые тесно переплетаются с вопросами по энергосбережению и ставят своей задачей снижение вредных выбросов.

Список литературы

1. Инструкция по эксплуатации котла ТПЕ-214/А.
2. Котельный агрегат ТПЕ-214. Техническое описание (08.0302.402 ТО заводская).
3. Модернизации котлов – перевод на газ [Электронный ресурс]. URL: https://tesiaes.ru/?p=2214.
4. Козак О. А. Перевод котлоагрегата ДКВр-20-13 с мазута на природный газ // Наука XXI века : сб. науч. ст. по итогам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12 апреля 2016 года. СПб., 2016. С. 192–194.

5. Андрусенко К. А. Анализ показателей котла ТП-87 при переводе его на сжигание природного газа // Энергия-2018 : Тринадцатая междунар. науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 6 т. Иваново, 3–5 апреля 2018 года. Т. 1. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2018. С. 9.

6. Трушачкина Е. А., Хасанова А. В., Растворов Д. В., Перекопная Е. А. Перевод котла ПТВМ-50 на сжигание природного газа в циклонных предтопках // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. науч.-техн. конференции студентов, аспирантов, ученых. 2018. Т. 6, № 1. С. 207–210.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПА ТОПЛИВА НА СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА

И. Д. Суворин[1, 2⁑], А. Ф. Рыжков[1], Л. В. Симбирятин[3*]

[1]Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, 19
[2]Группа компаний «ПЛМ Урал»
620131, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Металлургов, 16б
[3]ООО «Промышленный перлит»
620072, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Владимира Высоцкого, 46
⁑ suvorin.ig@yandex.ru

В данной работе проводился анализ структурных характеристик газодисперсных потоков в энергетике. На основе заданных значений порозности были произведены расчеты массовой концентрации частиц различных топлив при стехиометрическом соотношении топливо-воздух. В качестве инструмента исследования приняты балансовые соотношения тепла и массы, используемые в теплотехнических расчетах.

В основе современных энергетических технологий сжигания и газификации твердых топлив лежат процессы в высококонцентрированных и низкоконцентрированных газодисперсных потоках, которые осуществляются в активных гидродинамических режимах. Режимы эти характеризуются высокой подвижностью газовой и дисперсной фаз, их интенсивным перемешиванием и высокими показателями внутреннего и внешнего тепломассообмена. Тип топлива влияет на структурно-динамические характеристики газодисперсного потока и на устанавливающийся гидродинамический режим в промышленном диапазоне давления и температур (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики топлив

Вид топлива	Характеристика								
	W^r, %	A^r, т %	V^{daf}, %	Q_i^r, КДж/кг	C^r, %	H^r, %	O^r, %	N^r, %	S^r (сумм), %
Уголь (Донецкий АШ)	0	0	4	18 230	92,0635	1,7637	2,6455	0,8818	2,6455
Древесина (сосна)	0	0	84	11 300	51,3559	6,1017	41,8644	0,6780	0

Массовая концентрация твердых частиц μ в газодисперсном потоке связана с объемной плотностью $\varphi_0 = 1 - \varepsilon_0$ и порозностью ε_0 соотношением:

$$\mu = \left(\frac{\varphi_0}{\varepsilon_0}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{г}}}\right) \left[\frac{\text{кг твердых частиц}}{\text{кг газа}}\right]. \quad (1)$$

Массовая концентрация топливных частиц в исходной топливовоздушной смеси рабочего состава перед конверсией задается по стехиометрическим соотношениям топливо-воздух:

$$\mu_0 = \frac{1}{L_{\text{гф}}^{0\text{г}}} \equiv \frac{1}{V^0 \cdot \alpha_{\text{ст}} \rho_{\text{В}}^0} \left[\frac{\text{кг топлива}}{\text{кг воздуха}}\right], \quad (2)$$

Здесь $L_{\text{гф}}^{0\text{г}}\ [\frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}]$ – массовый стехиометрический расход воздуха на конверсию 1 кг рабочей массы топлива с коэффициентом расхода $V^0\ [\frac{\text{нм}^3\ \text{воздуха}}{\text{кг топлива}}]$ – объемный расход воздуха на стехиометрическое сжигание 1 кг топлива (при $\alpha = 1$) при нормальных условиях (1 бар, 273 К).

Для условной молекулы сухого беззольного топлива (daf; $W^r = 0$; $A^r = 0$) $C_nH_mO_l$ массой 1 кг стехиометрический расход воздуха на конверсию горючей массы до двухатомных газов H_2 и CO найдется по формуле

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{L_{\text{гф}}^0}{L_{\text{гор}}^0} = \frac{n-l}{2\cdot n+0{,}5\cdot m-l}\ . \quad (3)$$

Для рассматриваемой линейки топлив $\alpha_{\text{ст}}$ плавно снижается от 0,43 (антрацит) до 0,26–0,20 (торф, древесина).

Порозность ε_0 потока топливных частиц в исходной топливо-воздушной смеси с массовой концентрацией μ_0 найдется при подстановке (2) в (1):

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_{\text{Т}}^0\cdot L_{\text{гф}}^{0\text{г}}}{\rho_{\text{Т}}^0\cdot L_{\text{гф}}^{0\text{г}}+\rho_{\text{Г}}^0} = \frac{\rho_{\text{Т}}^0\cdot\alpha_{\text{ст}}\cdot V^0}{1+\rho_{\text{Т}}^0\cdot\alpha_{\text{ст}}\cdot V^0} \quad (4)$$

Был проведен расчет структурно-динамических характеристик потока для сухого беззольного топлива при стехиометрическом расходе воздуха. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные характеристики топлив для сухого беззольного топлива при стехиометрическом расходе воздуха для холодной установки

Вид топлива	Характеристика					
	ε_0				$\alpha_{\text{ст}}$	μ_0
	1 бар	10 бар	50 бар	100 бар		
Уголь (Донецкий АШ)	0,99961	0,99611	0,98084	0,96241	0,467399	0,212683
Древесина (сосна)	0,99750	0,97552	0,88852	0,79940	0,184923	0,971232

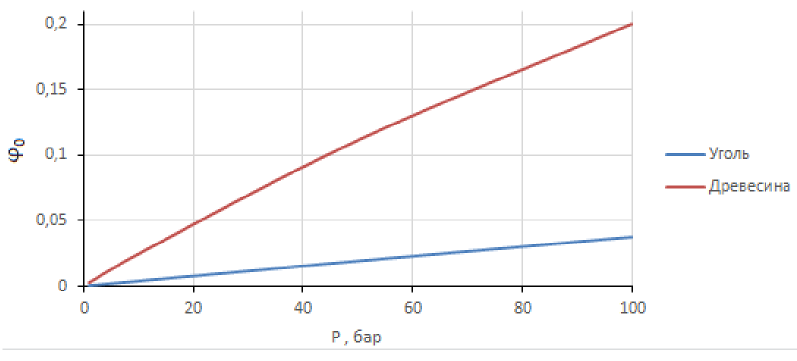


Рис. 1. Зависимость объемной плотности твердых частиц от давления

Применение древесины для газификации при разных давлениях позволяет поддерживать расходную плотность потока почти в 5 раз больше, чем при использовании угля. Это происходит за счет уменьшения $\alpha_{\text{ст}}$ в 2,5 раза, что дает увеличение объемной плотности потока. В дальнейшем планируется провести расчет зависимости массовой концентрации от порозности при произвольных давлениях, а также найти граничные значения температур и давлений быстрого псевдоожижения (ЦКС), плотного пневмотранспорта ($\varepsilon^* = 0{,}99$) и разбавленного пневмотранспорта ($\varepsilon^{**} = 0{,}9997$).

Благодарности. 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».

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ

М. В. Упский*, К. А. Штым, О. Г. Панченко*

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

Предложен метод оптимизации гидродинамических характеристик механической центробежной форсунки с целью изменения расходной характеристики. Приводятся результаты стендовых испытаний степени влияния предложенных изменений.

Одним из самых распространенных типов форсунок для распыла жидкости являются центробежные механические, хотя они имеют некоторые недостатки. Основными недостатками являются: поддержание достаточно высокого давления мазута перед форсункой и существенная неравномерность концентрации капель распыляемой жидкости [1]. Решением этих проблем является применением рассредоточенного распыла через несколько каналов. Многосопловые форсунки характеризуются получением необходимого угла распыления и плотности распыления по сечениям факела за счет взаимного влиянием отдельных факелов друг на друга [2]. По мере увеличения количества единичных сопел распределение жидкости становится более равномерным по сечению (рис. 1).

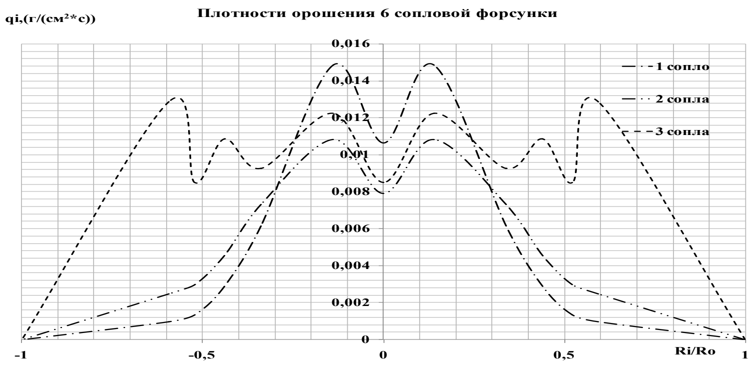


Рис. 1. Изменение плотности орошения по сечению факела жидкости при увеличении количества шнеков

Основным элементом единичного сопла является шнек (рис. 2), каждый типоразмер которого (соотношение диметров и длин) имеет свою расходную характеристику [3], то есть зависимость расхода жидкости от давления.

Рис. 2. Шнек, основной элемент центробежной форсунки

Чем меньше габариты шнека и диаметр выходного сопла, тем меньше средний диаметр капель распыливаемой жидкости. Однако при этом для поддержания необходимого суммарного расхода и невысокого давления жидкости на в ходе в форсунку необходимо существенно увеличивать количество единичных сопел форсунки и поперечное сечение ее увеличивается. Если место установки форсунки в горелочном устройстве проектируется заранее, то это не вызывает проблем при монтаже. При модернизации горелочного устройства сменой штатной односопловой механической центробежной форсунки на многосопловую, диаметр форсунки на замену может оказаться больше посадочного места. Можно уменьшить количество сопел, укрупнив шнеки, но это приведет к ухудшению качества распыла, что негативно отразится на процессах сжигания жидкого топлива. Анализ особенностей работы циклонно-вихревых камер показал высокую эффективность применения комбинированного ввода воздуха (аксиального и тангенциального) [4]. Сделав поправку на плотность среды, можно применить такой ввод к форсункам для распыливания жидкости.

Исследования, проводимые в Департаменте энергетических систем Политехнического института (школы) ДВФУ позволили оптимизировать гидродинамические характеристики форсунок. Не изменяя габаритов единичных шнеков, можно увеличить расход. Изменения в конструкции заключаются в наличии канала в шнеке (обозначен пунктиром) (рис. 2). Было выполнено компьютерное моделирование изменения полей скорости и давления (рис. 3) при наличии и отсутствии данного канала.

Имение распределения скорости Имение распределения скорости

Рис. 3. Изменение параметров потока при отсутствии или наличии канала в шнеке.

Было изготовлено пять одинаковых трехсопловых форсунки со шнеками 14 × 10 мм и каналом в шнеках (диаметрами соответственно 1, 2, 3, 4 мм) и без него. Исследования расходных характеристик проводились на специальном стенде лаборатории департамента. Результаты представлены на диаграмме (рис. 4).

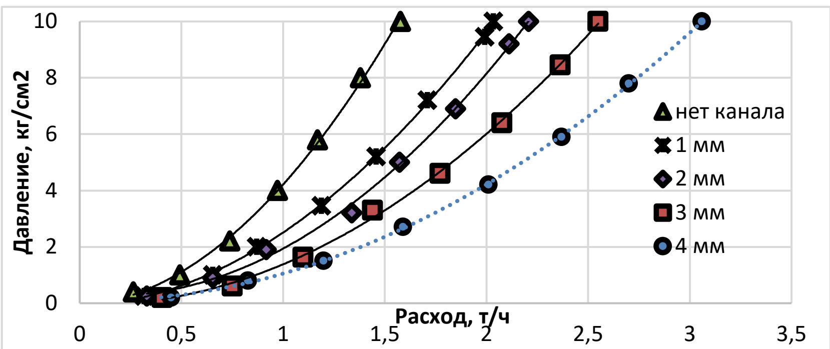


Рис. 4. Изменение расходных характеристик многосопловых форсунок в зависимости от диаметра канала в шнеке

Данная технология позволяет уменьшать суммарный диаметр многосопловых форсунок без снижения качества распыла факела при применении их на теплоэлектростанциях и котельных при замене ими штатных односопловых паромеханических и механических форсунок с минимальными изменениями в конструкции горелочных устройств.

Список литературы

1. Хавкин Ю. И. Центробежные форсунки. Л.: Машиностроение, 1976.
2. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2012. 421 с.
3. Shtym Konstantin A., Dorogov Evgenij Iu., Goncharenko Yuriy B. and Upsky Mikhail V. Experience of multinozzle swirl-type injectors study and application // Journal of Heat and Mass Transfer, 2019 Pushpa Publishing House, Prayagraj, India.
4. Штым А. Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер. Владивосток: Дальневостный ун-т, 1984. 200 с.

РАЗРАБОТКА ОБЩЕГО ПОДХОДА К ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК И СОПЕЛ

М. В. Фоменко[‡], В. Б. Прохоров, Н. Е. Фоменко[*]

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14
[‡] *fomenkomv@bk.ru*

Предложена методика оптимизации схем сжигания с прямоточными горелочными устройствами и соплами. На основании сформулированных рекомендаций с помощью численного моделирования разработана и оптимизирована схема сжигания твердого топлива на примере котла паропроизводительностью 1030 т/ч, обеспечивающая эффективное сжигание топлива.

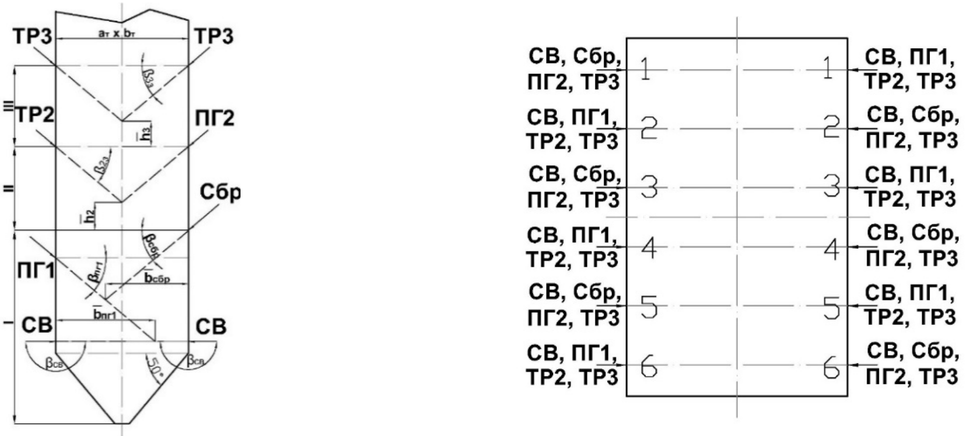
На долю паросиловых установок, работающих на твердом органическом топливе, приходится значительная часть генерируемой электроэнергии в Российской Федерации. Для сжигания твердого топлива используются в основном вихревые горелки. До настоящего времени прямоточные горелки не нашли широкого применения (используются преимущественно в тангенциальных схемах), так как являются горелками группового взаимодействия и требуют детальной проработки аэродинамики топочного объема. С помощью выполненных соответствующим образом схем сжигания с прямоточными горелками возможно достичь высоких экономических, экологических и надежностных показателей работы топочной камеры [1]. Это особенно актуально при сжигании малореакционного твердого топлива, при котором имеют место высокие выбросы оксидов азота NO_x, часто значительно превышающие нормативные значения [2]. На данный момент отсутствует общий подход к разработке подобного рода схем.

Современный уровень компьютерной техники позволяет с помощью пакетов вычислительной гидродинамики проработать аэродинамику топочного устройства на достаточном уровне для использования прямоточных горелочных устройств и сопел [3], а также провести ее оптимизацию для получения лучших показателей работы.

Авторами разработана методика по проведению оптимизации аэродинамики топочного объема с прямоточными горелками и соплами, в соответствии с которой топка делится на зоны по высоте. Оптимизация проводится каждой зоны последовательно, начиная с нижней, с исключением из работы горелок и сопел вышерасположенных зон. Исследование проведено на примере двухкорпусного котла паропроизводительностью 1030 т/ч на сверхкритические параметры пара, сжигающего тощий кузнецкий каменный уголь с твердым шлакоудалением. Основные положения разработки оптимальной схемы сжигания: создание большого количества закрученных потоков, движущихся в противоположных направлениях в смежных сечениях, что способствует хорошему перемешиванию топлива с окислителем в топке; организация зон рециркуляции раскаленных топочных газов к корням топливовоздушных струй горелок, что будет являться надежным источником зажигания; организация восходящего движения основного потока пылеугольных частиц топлива в центральной части топочной камеры и исключение их горения вблизи топочных экранов для уменьшения вероятности шлакования.

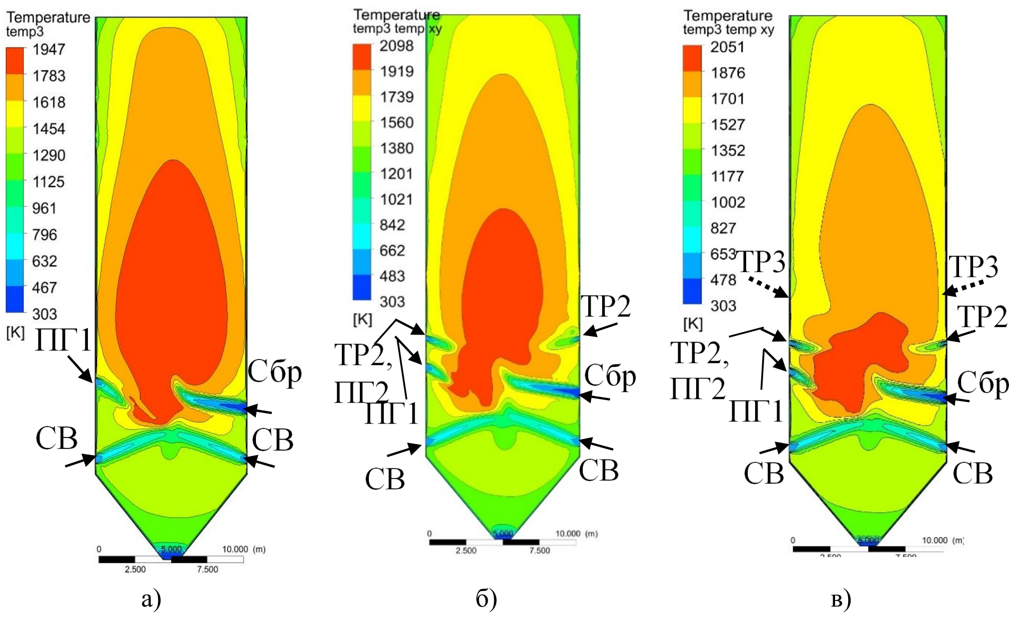
В соответствии со сформулированными рекомендациями составлена схема в общем виде для проведения исследования (рис. 1).

По результатам оптимизации предложенной схемы с помощью численного моделирования в ANSYS Fluent, проведенной последовательно для трех зон (рис. 2), получены высокие показатели ее работы: удельные потери теплоты с механическим недожогом составили q_4 = 1,11 %, удельная концентрация оксидов азота в дымовых газах равна C_{NOx} = 410 мг/нм^3, температура дымовых газов на выходе из модели равна $t_м$`` = 1124 °С.



а б

Рис. 1. Принципиальная схема расположения горелочных устройств и сопел в общем виде: *а* – вид в вертикальных сечениях 2-2, 4-4, 6-6; *б* – вид сверху; ПГ1 и ПГ2 – пылеугольная горелка I и II зоны соответственно; Сбр – сопло сбросного агента пылесистем; СВ – сопло вторичного воздуха; ТР1 и ТР2 – сопло третичного воздуха II и III зоны соответственно



а) б) в)

Рис. 2. Температурные поля схемы в вертикальном сечении 4-4 (рис. 1) после оптимизации: *а* – зоны I; *б* – зоны II; *в* – зоны III

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, https://rscf.ru/project/22-19-00722.

Список литературы

1. Архипов А. М., Липов Ю. М., Прохоров В. Б. Использование прямоточных горелок и сопл в топках котлов: инновационный опыт МЭИ. М.: Изд-во МЭИ, 2013. 240 с.

2. Архипов А. М., Канунников А. А., Киричков В. С. [и др.] Эффективность использования прямоточных горелок и сопл при реализации твердого шлакоудаления в топке котла ТПП-210А // Теплоэнергетика. 2017. № 2. С. 63–70. DOI 10.1134/S0040363617020011.

3. Prokhorov V. B., Fomenko M. V., Fomenko N. E. Solid fuel combustion processes modelling in the furnace in terms of the boiler K-50-14-250 // Journal of Physics: Conference Series. Moscow, 2020. P. 42–50. DOI 10.1088/1742-6596/1683/4/042050.

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПКЕ КОТЛА НА УЛЬТРАСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Н. Е. Фоменко[‡], **В. Б. Прохоров, М. В. Фоменко**[*]

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14
[‡] *fomenko.n.e@yandex.ru*

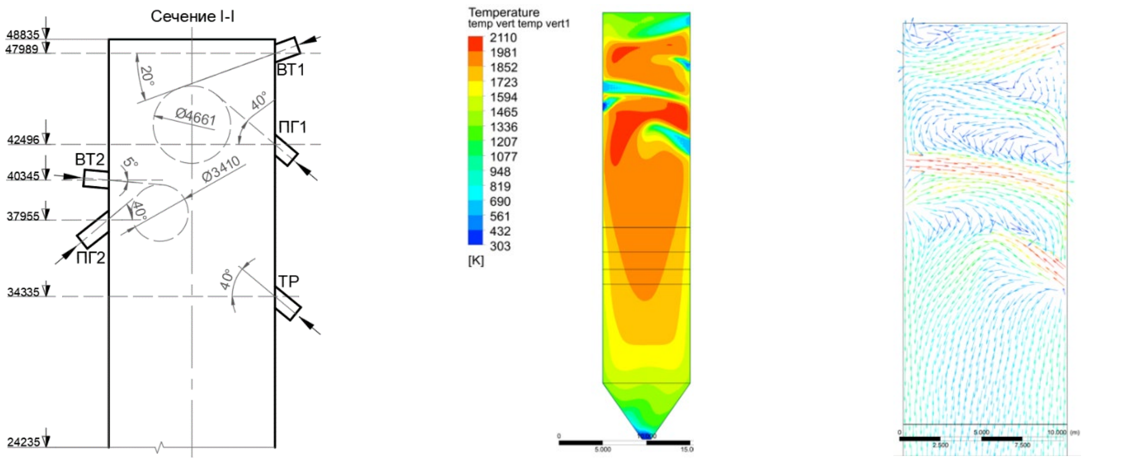
Выполнена разработка схемы сжигания Кузнецкого угля марки ТР с использованием прямоточных горелок и сопел в инвертной топке котла, работающего на ультрасверхкритических параметрах пара. Исследования выполнены в несколько этапов: разработка исходной схемы, оптимизация исходной схемы с помощью авторской упрощенной численной модели и дальнейшая оптимизация с численным моделированием процессов горения твердого топлива в топочной камере. Для окончательной схемы механический недожог топлива составил менее 1%, температура на выходе из топки – 1340 °С, а уровень оксидов азота составил 442 мг/нм^3. Разработанная схема расположения горелок и сопел имеет высокие показатели экологичности и экономичности и рекомендуется к использованию в инвертных топочных камерах.

На сегодняшний день угольные станции в РФ имеют средний возраст около 40 лет, являясь при этом самыми изношенными в стране [1]. Поэтому парк угольных электростанций России остро требует к себе внимания с целью строительства новых энергоблоков с внедрением последних технологических достижений в области угольной генерации для повышения их эффективности и экологичности. В «НИУ «МЭИ» выполнена предварительная проработка схемы сжигания угольного энергоблока, работающего на ультрасверхкритических параметрах свежего пара (700 °С и 35 МПа), что обеспечит низкий удельный расход топлива и минимальные выбросы загрязняющих веществ по сравнению с энергоблоками предыдущих поколений. Наименьших капиталовложений требуют котлы с инвертной топкой (U-образные, М-образные и т.д.), так как значительно уменьшается протяженность дорогостоящих паропроводов острого и промежуточного перегрева пара, выполняемых из никелевых сплавов [2]. Организация сжигания угля с применением прямоточных горелок позволяет получить высокие показатели работы котла. Однако, в существующих исследованиях для сжигания угля в топках котлов УСКП применение получили вихревые горелки.

В настоящей работе выполнена проработка схемы сжигания Кузнецкого угля в инвертной топке котла. Для организации процесса сжигания используются прямоточные горелки и сопла ввиду своей простоты конструкции и дешевизны, а их компоновка направлена на организацию ступенчатого сжигания топлива. Схема состоит из двух уровней горелок ПГ1 и ПГ2, двух уровней подачи вторичного воздуха ВТ1 и ВТ2 и одноярусного расположения сопел третичного воздуха ТР. Инструментом проведения исследований является программный комплекс ANSYS, позволяющий выполнять численное моделирование разнообразных химических и физических процессов, возникающих при горении угля в топочном объеме. Исследование проводилось в несколько этапов: создание исходной схемы сжигания, оптимизация исходной схемы с помощью авторской упрощенной численной модели (УЧМ) для первичной оценки аэродинамики топки энергетических котлов [3], дальнейшая оптимизация с помощью численного моделирования процессов горения до получения окончательной схемы сжигания.

При первом этапе оптимизации топочной аэродинамики с помощью УЧМ исследовано влияние следующих параметров: распределение избытков воздуха по соплам; вариативность углов наклона всех горелок и сопел; высоты расположения горелок и сопел; положение вихря, образуемого ВТ2 и ПГ2, относительно центра топки; целесообразность расположения горелок и сопел одного яруса напротив друг друга; наличие рассекателей в горелках. При оптимизации учитывались такие особенности схемы, как отсутствие повышенных концентраций первичного воздуха у стен топки, наличие рециркуляции потоков к корню горелок, снижение массовых долей горелочных струй, струй вторичного и третичного воздуха по мере проникновения их в топочный объем.

На втором этапе оптимизировалась схема, полученная по результатам исследований с помощью УЧМ. Критериями оптимизации являлись: значение температуры на выходе из топки менее 1340 °С, величина мехнедожога не более 5 % и достижение концентрации оксидов азота NO_x на выходе из топки меньше нормативных значений. Окончательная схема расположения горелок и сопел в инвертной топке (рис. 1) дает довольно растянутый факел по высоте топки с двумя высокотемпературными зонами в области горелок верхнего и нижнего яруса. Отсутствует прямое касание горелочными струями стен топки, что должно уменьшить вероятность шлакования топочных экранов. Отмечается интенсивное вихреобразование в горизонтальных и вертикальных плоскостях. Механический недожог топлива составил менее 1 %, температура на выходе из топки – 1242 °С, а уровень оксидов азота составил 442 мг/нм^3. В целом схема сжигания характеризуется высокими показателями экологичности и экономичности и рекомендуется к использованию в инвертных топочных камерах.



а) б) в)

Рис. 1. Рекомендуемая схема сжигания топлива (ПГ1 и ПГ2 – горелки первого и второго яруса, ВТ1 и ВТ2 – сопла вторичного воздуха первого и второго ярусы, ТР – сопла третичного воздуха): а) расположение горелок и сопел; б) температурное поле в вертикальной плоскости; в) векторное поле в вертикальной плоскости

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00722, https://rscf.ru/project/22-19-00722/.

Список литературы

1. Хохлов А., Мельников Ю. Угольная генерация: новые вызовы и возможности // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО: официальный сайт. 2023. URL: https://energy.skolkovo.ru/ (дата обращения: 01.02.2023).

2. Volkov E. P., ChernovS. L., Fomenko N. E. Development M-shaped profile for A-USC steam boiler // Journal of Physics: Conference Series: 2nd Interna-tional Conference on Fusion Energy and Plasma Technologies, ICFEPT 2019, Moscow, 07– 09 октября 2019 года. Vol. 1370. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012007.

3. Prokhorov V. B., FomenkoM. V., Fomenko N. E. Development of a simplified methodology for furnace aerodynam-ics with vortex combustion of organic fuel modeling // Journal of Physics: Conference Series: 8, Moscow, 18–21 октября 2021 года. Moscow, 2021. P. 012016. DOI 10.1088/1742-6596/2088/1/012016.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТРИГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИКЛА С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Д. Ю. Чирцов*

Новосибирский государственный технический университет
630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20
chirtsov_1999@mail.ru

В рамках разработки автономной системы тригенерации была представлена новая конструкция камеры сгорания и радиатора двигателя Стирлинга двойного действия конфигурации Райдера с приводом от косой шайбы. Представленный тип двигателя включен в систему тригенерации и параллельно обеспечивает нагрев оборотной воды для абсорбционной бромистолитьевой холодильной машины.

Эффективность двигателя Стирлинга зависит напрямую от температуры в камере сгорания, эффективности регенератора и конструкции рабочего контура. На основе анализа литературных данных автором было принято решение применить двигатель Стирлинга двойного действия конфигурации Райдера. Для уменьшения габаритов двигателя было принято решение использовать привод от косой шайбы [2] вместо кривошипно-шатунного механизма, а цилиндры расположить соосно (рис. 1).

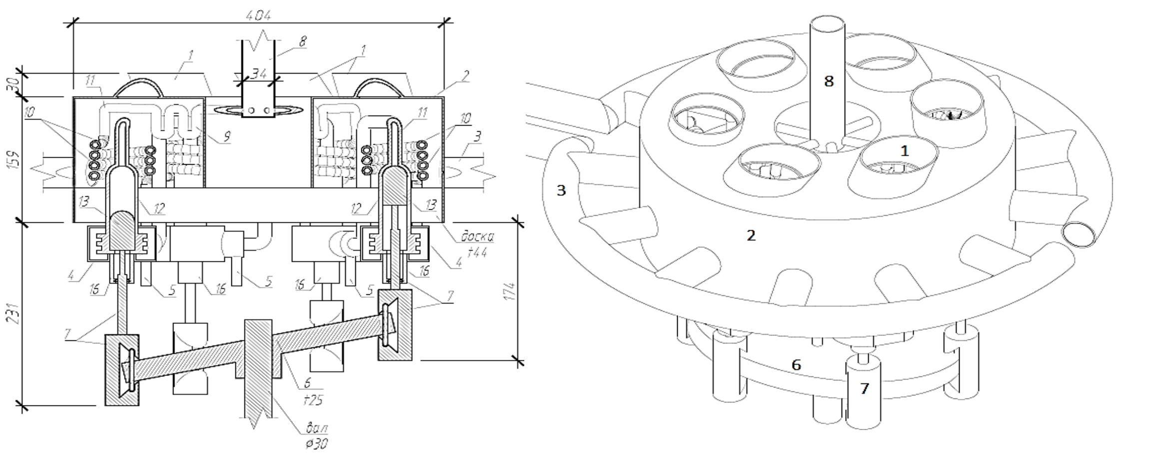


Рис. 1. Чертеж двигателя Стирлинга вид сбоку с разрезом (слева) и общий вид (справа): *1* – отверстия для горелок; *2* – камера сгорания; *3* – выхлопная труба; *4* – водный радиатор; *5* – патрубки для подачи оборотной воды; *6* – косая шайба; *7* – крейцкопфный механизм; *8* – выходная труба горячей оборотной воды; *9* – ширма; *10* – экономайзер (акцептор); *11* – трубка нагревателя; *12* – цилиндр; *13* – поршень; *16* – уплотнительная втулка

«Горячая» и «холодная» стороны двойного двигателя Стирлинга отделены доской-фиксатором, в которой жестко фиксируется весь рабочий контур с цилиндрами, выполняя также функцию теплоизоляции. Конструкция нагревательных трубок двигателя, труб регенеративного водяного контура и передаточного механизма делают его компактным, разборным и простым в техническом обслуживании.

Камера сгорания двигателя представляет собой кольцевой воздушный коллектор, в котором под углом устанавливаются горелки либо подводится газ при температуре 1000–1123 К. Подобная конструкция камеры сгорания позволяет равномерно распределять температурные поля по профилям нагревательных труб [1].

Представленный выше тип двигателя Стирлинга и абсорбционный термотрансформатор (АТТ) в системе тригенерации конструктивно объединены в один агрегат с помощью общего контура циркуляции оборотной воды. Система позволяет получать одновременно тепло, холод и электроэнергию в соответствии с представленной на рис. 2 схемой.

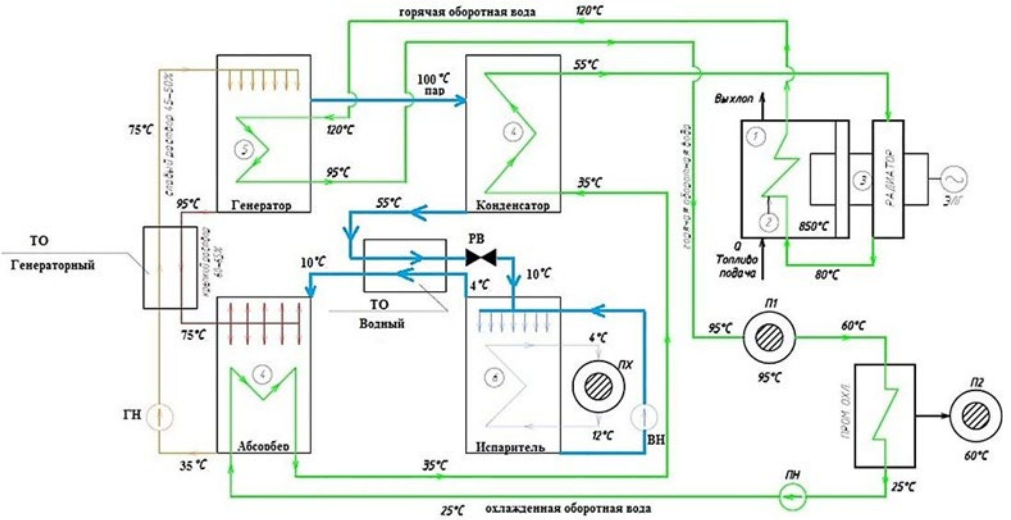


Рис. 2. Система тригенерации на основе представленного типа двигателя и одноступенчатой АТТ:
1 – камера сгорания; *2* – акцептор; *3* – двигатель Стирлинга; *4* – гидропетля; *5* – жаротрубный пучок;
6 – охлаждаемый контур; П1(2) – потребитель тепла; ПХ – *потребитель холода*;
ПН, ГН, ВН –питательный, генераторный и водяной насосы соответственно

По выходной трубе (8) оборотная вода при температуре 393 К поступает в генератор АТТ. При реализации холодильного цикла в системе, АТТ обеспечивает потребителей тепла на двух температурных уровнях 368 К и 333 К. Для систем кондиционирования воздуха производится искусственный холод с температурой 277 К. Благодаря регенерационному контуру оборотной воды решается проблема габаритов радиатора двигателя Стирлинга. Пройдя цикл АТТ, оборотная вода нагнетается насосом в камеру сгорания двигателя через патрубки (5). Затем цикл тригенерации повторяется. На основе представленной схемы (рис. 2) разработана система с двухступенчатой АТТ, генераторы которой работают от теплоты выхлопных газов и водяного контура оборотной воды. В двухступенчатой схеме возможно охлаждение до отрицательных температур, а также увеличение электрической и тепловой мощности системы. В представленной системе тригенерации возможна синергия контуров нагрева и охлаждения.

Заключение. Был составлен чертеж двигателя Стирлинга двойного действия конфигурации Райдера с приводом от косой шайбы. Спроектирована камера сгорания, разработана принципиальная схема системы тригенерации.

Список литературы

1. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции / под ред. В. Я. Гиршфельда. М.: Энергоатомиздат, 1987.

2. Современные технологии увлажнения // Официальный журнал компании Condair. 2013.

3. Walker Graham (1980). Stirling engines //British Library //Oxford University Press.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДЫ В СОСТАВЕ КАПЛИ ВОДОМАЗУТНОГО ТОПЛИВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ФРАГМЕНТАЦИИ

Н. Е. Шлегель[⁎], **П. А. Стрижак**[*]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[⁎] *nes6@tpu.ru*

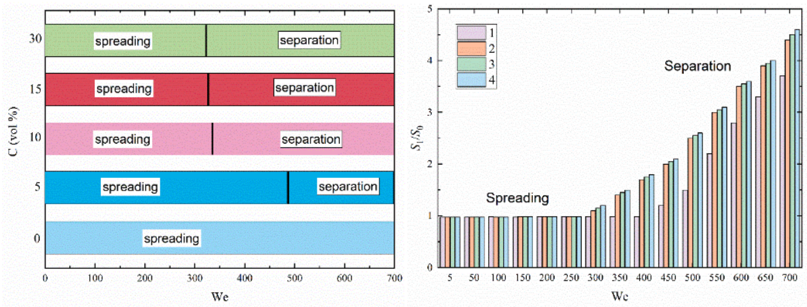
Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик вторичного измельчения капель водомазутного топлива при соударении с твердой подложкой для воспроизведения условий взаимодействия капель топлив с нагретыми стенками камер сгорания, реакторов, смешивающих блоков и завихрителей. Установлены условия стабильной реализации двух режимов взаимодействия подложки и родительской капли, приводящих к ее измельчению или налипанию. Для приближения условий опытов к газопарокапельным технологиям основные параметры варьировались в широких диапазонах: относительные концентрации воды и мазута, размеры капель (0,1–2,5 мм), скорости их движения (0–8 м/с), температура топлива (20–90 °C) и подложки (20–300 °C). Зарегистрированы основные характеристики режимы соударений.

Измельчение капель мазутного топлива играет важную роль в работе горелок промышленных котлоагрегатов, а также двигателей внутреннего сгорания. Капли топлива при вторичном распылении испытывают большую деформацию и последующее дробление из-за действия на них аэродинамических сил. Мазут представляет смесь фракционного сырья и остатков процессов очистки и крекинга нефти и содержит высокий процент дизельного топлива (около 40 %). Количество объектов в теплоэнергетике России, использующих мазут как основной вид топлива: 2 357 котельных и семь ТЭЦ. Для применения мазутного топлива в промышленном оборудовании используются системы распыления с форсуночными и сплинкерными устройствами [1–3].

При распылении мазутного топлива существует ряд технологических сложностей, которые приводят к нестабильности горения факела [4; 5]. Во-первых, важную роль играет неполнота сгорания топлива при нехватке окислителя, приводящая к образованию сажи [6]. Во-вторых, при перерасходе воздуха в форсуночном устройстве капли топлива не успевают выгорать, что приводит к соударению капель с твердыми поверхностями (стенками, перегородками, теплообменными элементами и др.). Соответствующие эффекты способствуют образованию сажи на стенках оборудования, а в дальнейшем при ее выгорании приводит к локальному перегреву. При недостатке окислителя капли соударяются со стенками форсуночного устройства, что приводит к неоднородности факела распыла [4; 5]. Неполное выгорание мазутного топлива приводит к повышенным концентрациям антропогенных выбросов. Один из способов решения сформулированной проблемы состоит в обводнении мазута.

Для проведения экспериментальных исследований использовался стенд, аналогичный [7]. В котельном агрегате зачастую капли топлива долетают до его стенок и рабочих поверхностей, где и происходят соударения. Основные условия взаимодействия капель мазута с такими объектами целесообразно изучать на примере нагретой металлической стенки. Использован типичный для энергетических установок материал. Характеристики металлической подложки: сталь 12Х1МФ (диаметр подложки 80 мм, высота 10 мм); полированная подложка со средним арифметическим отклонением профиля поверхности, не превышающим 0,05 μm; контактный угол подложки составлял около 80 .

Применение мазутного топлива в энергетическом оборудовании предполагает его обводнение на 5–30 %. Добавление воды позволяет снизить концентрацию серы в продуктах сгорания. Также вода в мазутном топливе появляется во время его транспортировки и хранения. Результаты исследования по определению концентрации воды в мазутном топливе для достижения устойчивого режима separation и максимальной площади свободной поверхности после и до взаимодействия представлены на рис. 1.



а б

Рис. 1. Связь режимов соударения капли с твердой поверхностью при варьируемой концентрации воды в топливе (Tf=80 °C) и числе Вебера (*а*); отношение площадей свободной поверхности после и до взаимодействия (*б*): *1* – 94,5 % мазута, 5 % воды, 0,5 % Tween 80; *2* – 89,5 % мазута, 10 % воды, 0,5 % Tween 80; *3* – 84,5 % мазута, 15 % воды, 0,5 % Tween 80; *4* – 69,5 % мазута, 30 % воды, 0,5 % Tween 80.

Определено, что с увеличением концентрации воды снижается вязкость топливной композиции. Такой эффект приводит к увеличению площади и снижению времени растекания капли по подложке практически на 10 %. Установлено, что при обводнении мазутного топлива на 10 % реализуется переход между режимами взаимодействия (spreading and separation) при числе Вебера около 330. Анализируя рис. 1, установили, что для исследуемых составов режим separation достигается при числе Вебера около 300. При снижении же концентрации воды до 5 % граница перехода смещается в сторону больших чисел Вебера практически на 35 %, что приводит к необходимости увеличения скорости движения капель. В связи с высокой вязкостью топлива в промышленных установках увеличение скорости движения капель приводит к удорожанию процесса производства энергии. При увеличении же доли воды в топливной композиции смещение границ режимов взаимодействия небольшое (не более 5–10 %). При обводнении мазута на 15 % и 30 % снижается теплотворная способность в несколько раз, что приводит к ухудшению процесса горения топлива. Поэтому доля воды в составе мазутного топлива должна быть лимитирована с учетом совокупности критериев.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-79-00197, https://rscf.ru/project/22-79-00197).

Список литературы

1. Shebeleva A. A. et al. Deformation of a Droplet of an Organic Water---Coal Fuel in a Gas Flow // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2018. Vol. 59, № 4. P. 653–661.
2. Alekseenko S. V et al. Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot water boiler // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2017. Vol. 328, № 12. P. 16–28.
3. Gad M. S., Mahfouz A., Emara A. Spray and combustion characteristics for light diesel/waste cooking oils blended with fuel additives inside an industrial boiler // Fuel. 2021. Vol. 286. P. 119–247.

4. Зверева Э. Р., Фарахов Т. М. Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах // Теплотехник. 2012.

5. Блинов Е. А. Топливо и теория горения. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.

6. Abe K., Inasawa S. Deformation and coalescence of particle-stabilized oil droplets in drying aqueous NaCl solutions // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2022. Vol. 632. P. 127816.

7. Islamova A. G. et al. The collisions of droplets and particles at the different initial temperatures // Int. J. Heat Mass Transf. 2022. Vol. 196.

Секция 2
«Строительная теплофизика»

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ГАЗОУДАЛЕНИЯ

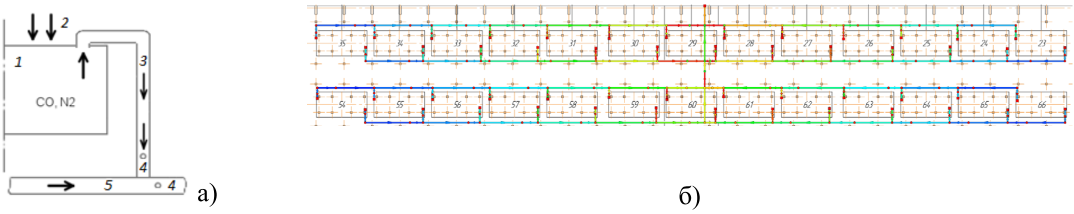
Д. В. Бойков*, А. А. Дектерев*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
* *dimkadim@yandex.ru*

Адаптация методов идентификации теории гидравлических цепей для решения задачи определения неизвестных параметров существующей системы газоудаления по данным экспериментальных замеров. Проверка применимости предложенного алгоритма на системе газоудаления промышленного предприятия.

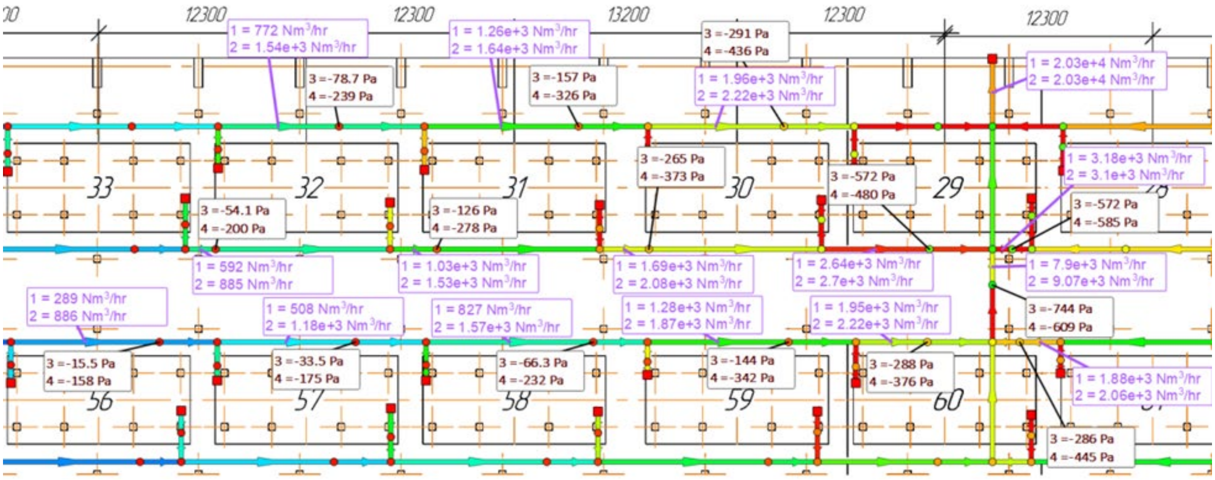
При проведении анализа систем вентиляции применяются разные методы исследования [1]: теория гидравлических цепей [2], методы пространственного моделирования, экспериментальные замеры реальных объектов. Возникает необходимость использования результатов, полученных одним методом при использовании других подходов. Примером может служить задача идентификации сетевой модели по данным экспериментальных замеров существующей вентиляционной системы [3]. В настоящее время существует богатый математический аппарат, направленный на решение таких задач в трубопроводных системах [2,3-5]. Однако применение этих методов для решения задач потокораспределения и идентификации в системах вентиляции сопряженно с некоторыми трудностями. Это связанно с разно масштабностью таких систем и как следствие различными, как исходными данными, так и идентифицируемыми величинами. К примеру, в больших трубопроводных системах пренебрежимо мал вклад динамического давления, что позволяет его не учитывать в задачах идентификации. Очевидно, что в вентиляционных системах, где величины статического и динамического давления одного порядка так поступать нельзя. Кроме того, различается и набор идентифицируемых величин. Если в больших ТПС такой величиной является эффективная шероховатость, то в вентиляционных сетях неопределённы будут коэффициенты местного сопротивления и негерметичности.

Настоящая работа посвящена адаптации методов идентификации ТПС для уточнения неизвестных параметров системы вентиляции. Что позволяет по данным экспериментальных замеров статического давления и расхода в различных точках вентиляционной сети определить неизвестные величины местного сопротивления и степени негермитичности газоходов. На примере расчетно-экспериментального исследования системы газоудаления промышленного предприятия (рис. 1) показана применимость такого подхода (рис. 2).

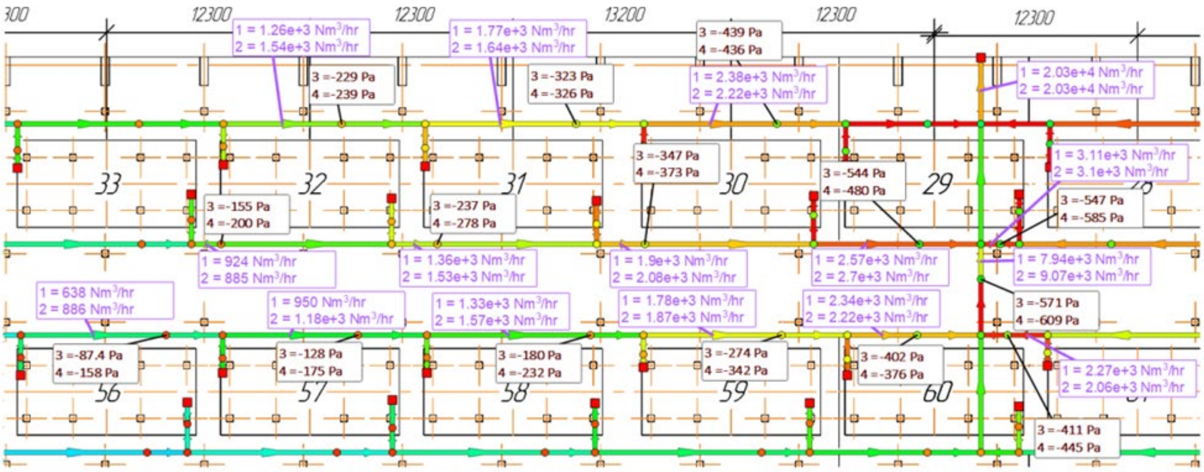


а) б)

Рис. 1. Система газоходов электролизного производства: а) подключение электролизера; 1 – электролизер; 2 – присосы воздуха; 3 – спуск; 4 – точки замера расхода; 5 –сборный газоход; б) сеть



а)



б)

Рис. 2. Сравнение эксперимента с расчетом: а) до идентификации; б) после идентификации; 1– расход, рассчитанный сетевой моделью; 2 – замеры расхода; 3 – статическое давление, рассчитанное сетевой моделью; 4 – замеры давления

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. Бойков Д., Филимонов С., Дектерев А. Трубопроводные системы энергетики. Математические и компьютерные технологии интеллектуализации. Новосибирск, 2017. С. 138–151.

2. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М., 1985.

3. Boykov Dmitriy V., Dekterev Aleksandr A. The identification problem solution of the ventilation system model based on static pressure // Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems 2019 // E3S Web Conf. 102 Article Number 01003 (2019).

4. Епифанов С. Н. Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации. Новосибирск, 2007. С. 27–47.

5. Новицкий Н. Оценивание параметров гидравлических цепей. Новосибирск, 1988. 213 с.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ, СОДЕРЖАЩЕЙ «УМНЫЕ» ЭЛЕМЕНТЫ, МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Д. В. Бойков*, А. А. Дектерев*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
** dimkadim@yandex.ru*

Модель ТПС для моделирования вентиляционной сети была доработана для учета «умных» самоуправляющихся элементов. Построена модель вентиляционной системы, содержащей такие элементы. Разработаны модели элементов для реализации мониторинга и управления в АСУ ТП.

В настоящее время одним из методов моделирования систем вентиляции и газоудаления промышленных зданий [1] и сооружений является метод теории гидравлических сетей, позволяющий задачу распределения потока воздуха свести к задаче потокораспределения на ориентированном графе [2].

Некоторую трудность составляет наличие в такой сети элементов осуществляющих автоматическую регулировку своего режима работы с целью обеспечения заданного режима работы и вентиляционной сети в целом и отдельных её элементов в частности. Примером таких систем может служить «умная» регулирующая заслонка угол положения которой зависит от текущего состояния системы или умный лабораторный шкаф [3], автоматика которого исходя из текущего режима работы шкафа пытается обеспечить необходимый расход.

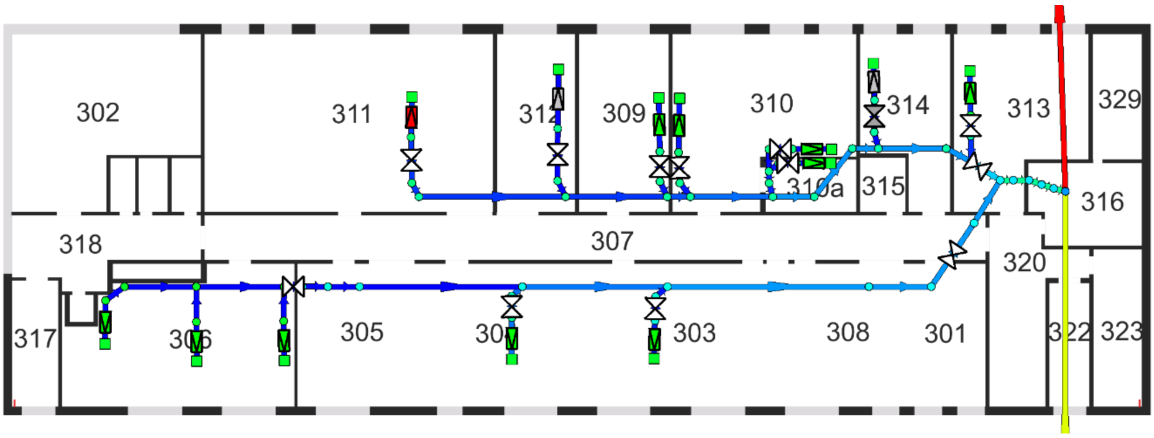
Очевидно, что существующая модель сети должна воспроизводить поведение такого оборудования. Также встаёт отдельная задача разработка алгоритмов для АСУ ТП для учета влияния таких элементов в показаниях телеметрии и для разработки алгоритмов управления.

Настоящая работа посвящена исследованию системы технологической вентиляции, которая из-за подключенного к ней «умного» оборудования, шкафов Waldner SCALA Secuflow, имеет сильную неравномерность работы. В рамках данной работы были предложены алгоритмы управления «умными» заслонками для АСУ ТП и способ для такой сети определить расход на выходных участках сети с достаточной точностью по показаниям двух датчиков статического давления. Для реализации сетевой модели были разработаны модели «умных» элементов сети, позволивших с разной степенью детализации построить модели такой системы (рис. 1). Были выполнены экспериментальные замеры и сравнение с моделью и результатами работы АСУ ТП показавшие хорошее совпадение между всеми ними как по величине расходов (табл. 1), так и по величине управляющего воздействия.

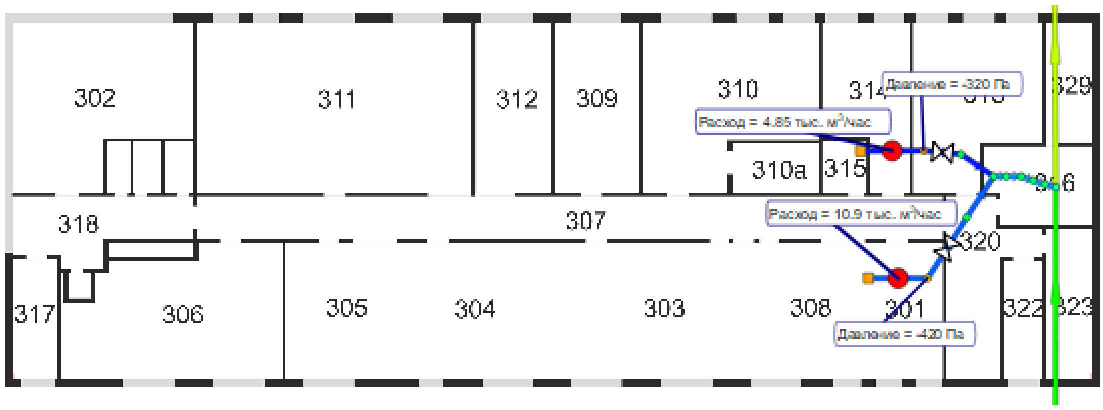
Таблица 1

Расходы в системе вентиляции

	Эксперимент	АСУ ТП			Расчет		
		верх	низ	Суммарно	верх	низ	Суммарно
Подвал+1 этаж	5,1	-	1,7	-	4,5	0,8	5,3
2 этаж	16,5	10,2	7,8	18	10,5	8	18,4
3 этаж	16,2	6	7,8	13,8	6	8	13,9



а)



б)

Рис. 1 Фрагмент модели сети: а) Модель с трассировкой до групп оборудования;
б) Модель с этажным газоходом, редуцированным до одного элемента.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. Бойков Д.В., Дектерев А.А., Филимонов С.А. Использование комплексного подхода при исследовании и оптимизации режимов работы систем газоходов. // Трубопроводные системы энергетики. Методические и прикладные проблемы математического моделирования. Новосибирск: Наука, 2015. С.82-92.

2. Меренков А. П., Хасилев В. Я. и др. Теория гидравлических цепей. М., 1985. 280 с.

3. Технический каталог. Система лабораторной мебели SCALA. URL: https://www.waldner.ru/fileadmin/Landingpages/RU/Products/RS638_Technischer_Katalog-rus-12.2019.pdf

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ И КОНФИГУРАЦИЕЙ ОДИНОЧНОГО ЗДАНИЯ

Е. В. Вдовина[1*], С. С. Добросмыслов[1, 2*]

[1]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]*Красноярский научный центр СО РАН*
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
[*] *doroninalisa21@mail.ru*

В больших промышленных городах наблюдается ухудшение качества атмосферного воздуха. Городская застройка замедляет ход ветра, способствуя скоплению вредных веществ. В данной работе проведено исследование влияния одного здания на ветровой режим при изменении этажности, угла размещения относительно преобладающего потока и размеров здания в плане. Аэродинамические условия описываются размерами ветровой тени и значением условного аэродинамического сопротивления. Выявленная зависимость поможет определить наиболее оптимальную конфигурацию здания, способствующую продуваемости и улучшению качеству атмосферного воздуха. Исследование проводилось по ветровым условиям города Красноярска.

Исследования по вопросу о том, как урбанизация изменяет ветровые поля, проводятся с использованием трех различных подходов: естественное наблюдение с использованием метеорологического оборудования, математическое моделирование процессов в атмосфере и исследования физических моделей в аэродинамических трубах [1]. В данной работе рассмотрено математическое моделирования аэродинамических процессов при изменении конфигурации зданий и планировки квартала.

В ходе исследования будут изменяться следующие параметры здания:

– этажность (9–14-19-25 этажей);

– габариты здания, рассматриваются 1-, 2- и 3-секционные жилые здания, при длине секции 30 м, и при ширине зданий 18 и 21 м.

– угол поворота относительно преобладающего потока (0 ˚, 30 ˚, 45 ˚, 60 ˚, 90˚).

Основным параметром для оценки результатов расчетов по математической 3D-модели является условное аэродинамическое сопротивление и размер ветровой тени.

На подветренной стороне здания образуется вихрь, практически параллельный земле, за зданием образуется область ветровой тени, м^2. Это область возникновения вихрей низких скоростей и отрицательного давления, которая способствует стагнации вредных веществ.

Аэродинамическое сопротивление – лобовое сопротивление, сила, с которой газ (например, воздух) действует на движущееся в нём тело; эта сила направлена всегда в сторону, противоположную скорости, и является одной из составляющих аэродинамической силы [2].

$$R = \frac{\Delta p}{G},, \tag{1}$$

где R – условное аэродинамическое сопротивление, Н$\cdot$ с/кг; Δp – разность давлений, Па; G – плотность потока воздуха, кг/м$^2\cdot$ с;

Для проведения расчетов была построена 3D-модель турбулентного потока в приближении $k - \varepsilon$. Для расчета использовались следующие исходные данные:

– скорость ветра = 2,2 м/с – среднегодовая скорость ветра г. Красноярска;

– общие размеры модели AxBxH = 200x200x235 м;
– используемые материалы: air (воздух), cellular concrete (ячеистый бетон);
– тип расчета – стационарный;
– размер сетки – нормальный.

В ходе исследования получены следующие результаты, представленные на рис. 1.

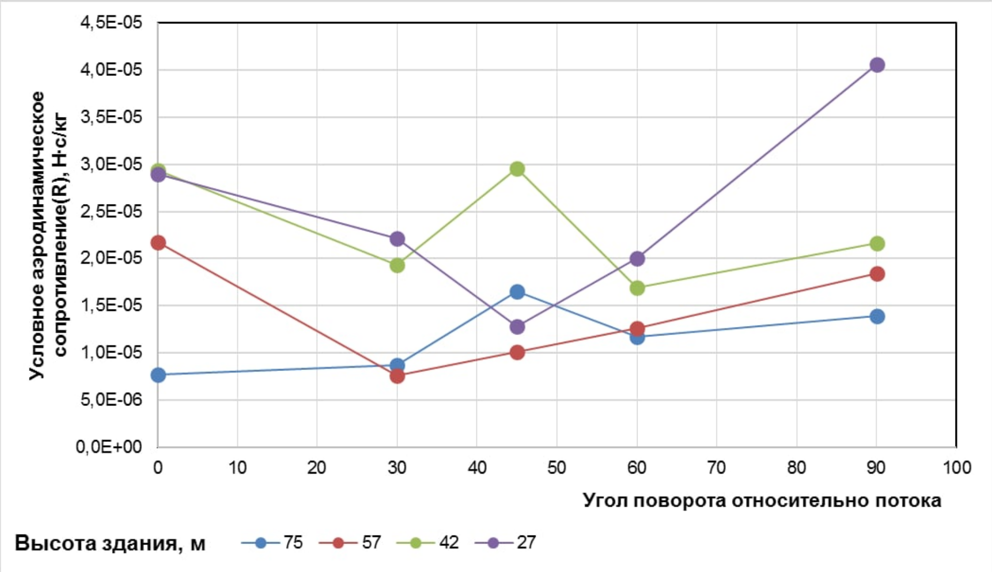


Рис. 1. Зависимость условного аэродинамического сопротивления от угла поворота здания относительно преобладающего потока при разной этажности для односекционного здания, с размерами в плане 30x18м

Данное исследование поможет определить наиболее оптимальные размеры и расположение здания в г. Красноярске для улучшения качества атмосферного воздуха. Полученные зависимости могут использоваться в качестве рекомендаций для проектирования кварталов.

Список литературы

1. Михайлюта С.В., Леженин А.А., Анн Питт, Тасейко О.В. Городские ветровые поля: явления в трансформации // Urban Climate. 2017. С. 1-19.

2. Черепанов К.А. Проблемы выбора оптимальных параметров застройки в зависимости от социальных, экономических и экологических свойств городской среды // Молодой ученый. 2014. № 2 (61). С. 216-232.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДЕРЕВЯННОГО БРУСА С ПОПЕРЕЧНЫМИ КОННЕКТОРАМИ

Г. Г. Волокитин*, А. А. Клопотов,
Н. А. Цветков, А. В. Толстых, В. А. Черемных*

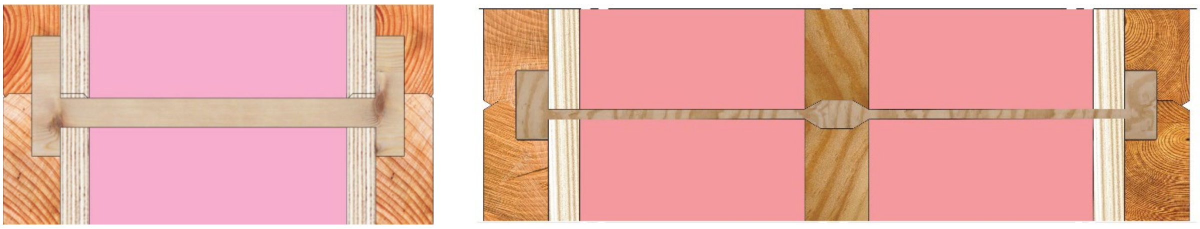
Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Российская Федерация, Томск, Соляная пл., 2
* *vgg-tomsk@mail.ru*

Выполнен детальный анализ результатов теплофизических научных исследований пространственного тепло- и массопереноса в наружных многослойных ограждающих конструкциях зданий из древесины, в том числе из профилированного утепленного бруса с коннекторами. Разработаны и зарегистрированные программы для ЭВМ, которые позволили выполнить сравнительный анализ основных технологий деревянного домостроения с оценкой энергосберегающего эффекта каждой из них, в том числе при использовании наиболее энергоэффективного профилированного бруса с коннекторами. Предложены способы и оборудование для плазменной обработки поверхностей деревянных ламелей бруса с целью снижения энергозатрат на их сушку и улучшения эксплуатационных свойств ограждающих конструкций.

Анализ результатов известных исследований тепло- и массопереноса в ограждающих конструкциях зданий позволил установить, что в работах [1–11] созданы методы и программы для теплофизического расчета деревянных зданий, выполненных по различным технологиям: из оцилиндрованных бревен, цельного бруса; профилированного бруса повышенной прочности с утепляющими вставками (рис. 1, а) из клееных ламелей; утепленного профилированного бруса с ламелями из эффективного утеплителя (рис. 1, б, в); утепленного профилированного бруса с ламелями из эффективного утеплителя с поперечным и вертикальным креплением коннекторами (рис. 2). Наиболее энергоэффективной и ресурсосберегающей является последняя технология с Н-образными (рис. 2, а) и Ж-образными коннекторами (рис. 2, б) [10].

а б в

Рис. 1. Профилированный брус с утепляющими вставками: 1 – из трех элементов (ТГАСУ); 2 – фирмы «Сибрэкс» с утепляющей вставкой ПОЛИСТЕН; 3 – брус ОАО «Томская ДСК» с одной или двумя утепляющими вставками из пенополистирола



а б

Рис. 2. Профилированный брус с утепляющими вставками: 1 – с П-образным коллектором; 2 – с Ж-образным коллектором

Для снижения затрат тепловой энергии на сушку ламелей, которые прямопропорциональны квадрату их толщины, предложено уменьшить толщину ламели до 0,021 м. Для исключения отходов древесины процесс их строгания заменен на процесс плазменной обработки [12, 13]. В работе приведены результаты опытного исследования этого процесса при обработке различных пород древесины, анализ полученных свойств поверхностей ламелей и поставлены задачи математического моделирования процесса.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN2022-0003.

Список литературы

1. Кузин А.Я., Цветков Н.А., Драганов В.А. Нестационарный тепло- и влагоперенос в многослойном наружном ограждении // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 4. С. 599–609.

2. Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Кузин А.Я., Колесникова А.В. Теплоперенос в плоской трехслойной системе с поперечным несквозным включением // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78, № 2. С. 29–35.

3. Кузин А.Я., Хуторной А.Н., Мирошниченко Т.А., Хон С.В. Теплоперенос в трехслойной конструкции с высокотеплопроводной вставкой при циклическом изменении температуры внешней среды // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 1. С. 85–94.

4. Хуторной А. Н. Особенности пространственного теплопереноса в неоднородном угловом фрагменте деревянной брусчатой стены // Известия вузов. Строительство. 2009. № 5. С. 3–8.

5. Кузин А.Я., Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Лесняк И.А. Нестационарный пространственный теплоперенос в неоднородном угловом фрагменте деревянной брусчатой стены // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82, № 4. С. 688–692.

6. Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В. Физико-математическая модель тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // Известия Вузов. Строительство. 2017. №2(698). С. 12–20.

7. Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н. Сравнительный анализ теплозащитных характеристик стен из профилированного утепленного бруса с коннекторами // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. 2018. Т. 20, № 2. С. 124–136.

8. Tsvetkov N.A., Boldyryev S., Tolstykh A.V., Tsvetkov D.N., Doroshenko Ju.N. Refinement and testing of the mathematical model of heat and moisture transfer in envelope structures of profiled insulated timber with connectors. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ, vol. 751, 012094, 2021, DOI: 10.1088/1755-1315/751/1/012094.

9. Tsvetkov N.A., Kozlobrodov A.N., Boldyryev S., Romanenko S.V., Nemova T.N., Tsvetkov D.N. Thermophysical analysis of heat-insulated glued laminated profiled timber for wooden houses // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, vol. 866, 012037, 2021, DOI: 10.1088/1755-1315/866/1/012037.

10. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Kolesnikova A.V., Tsvetkov D.N. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia // Environmental Challenges, vol. 4, 100101, 2021, DOI: 10.1016/j.envc.2021.100101.

11. Цветков Н.А., Толстых А.В., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н. Оценка возможности образования мокрых зон в ограждающих конструкциях из утепленного бруса с коннекторами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022, №4. С. 87–98, DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98.

12. Патент на изобретение 2484951 Российская Федерация, МПК ***В27К 5/00*** (2006.01). Способ получения защитно-декоративного покрытия на древесине / О.Г. Волокитин, Н.А. Черкашина, Г.Г. Волокитин, Н.А. Цветков; ГОУВПО «ТГАСУ». № 2012104467; заявл. 08.02.2012,. опубл. 20.06.2013, бюл. № 17.

13. Волокитин О.Г., Волокитин Г.Г., Цветков Н.А. Перспективы технологии создания защитно-декоративных покрытий на поверхности древесины с использованием плазменной технологии // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. 2012. № 1. С. 112–116.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ЗДАНИЙ

Д. А. Дектерев[1, 2⁑], А. С. Лобасов[2], В. Д. Мешкова[1], К. Ю. Литвинцев[2], Ар. А. Дектерев[1,2], А. А. Дектерев[1, 2*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
⁑ dekterev_da@mail.ru

В работе проведён анализ картин течения при обтекании модели здания кубической формы. Сопоставлены расчетные и экспериментальные данные для задач различного масштаба. Геометрический размер моделей варьируется от 0,025 до 6 м, при этом диапазон чисел Рейнольдса в анализируемых данных составляет от 10^3 до 10^6. Показана масштабируемость задачи, что позволяет говорить об обоснованности проведения лабораторных трубных экспериментов.

Изучение аэродинамики отдельных или групп зданий – весьма важное направление науки, позволяющее дать ответы на вопросы, связанные с архитектурно-строительными нюансами (например, ветровые нагрузки на элементы здания), а также с экологическими и социальными проблемами. Распространение вредных выбросов от автотранспорта, формирование зон запылённости или снежных намётов и пешеходная комфортность, зависящая от ветровых нагрузок, – всё это напрямую связано с аэродинамикой обтекания зданий.

Натурное исследование застройки неинформативно в силу необходимости набора большого количества статистических данных в условиях непостоянности ветровых параметров и влияния множества вторичных факторов. Кроме того, большой интерес имеет предварительный анализ аэродинамики на стадии проектирования зданий или микрорайонов. В связи с этим применяются два традиционных подхода – лабораторный эксперимент с применением аэродинамических труб и численное моделирование.

Несмотря на то, что многими научными коллективами по всему миру проводятся трубные аэродинамические эксперименты, результаты зачастую поддаются критической оценке. В первую очередь это связано с масштабированием физических параметров. Числа Рейнольдса в реальности составляют порядка $Re = 10^6 – 10^7$, в то время как в лабораторном эксперименте значения достигают $Re = 10^4 – 10^5$. Кроме того, важную роль играет профиль набегающего потока и уровень турбулентных пульсаций. При численном моделировании вопрос масштаба практически отпадает, тем не менее остается вопрос задания параметров набегающего потока и, что наиболее важно, выбор математических моделей, позволяющих корректно описывать поставленную задачу. Влияние выбора расчётных моделей наглядно показано в работе [1]. Кроме того, для того, чтобы признать результат численного моделирования верным, необходимо его сопоставление с экспериментальными данными. Отсюда и возникает необходимость оценки влияния масштабного фактора на результаты моделирования обтекания зданий.

В данной работе приводится сопоставление собственных экспериментальных и расчетных данных, а также данных из литературы для обтекания простейшей модели здания в форме куба [1–6].

Первый эксперимент представляет собой исследование куба высотой H = 50 мм в аэродинамической трубе с использованием техники трассерной визуализации PIV.

Скорость набегающего потока составляет 5 м/с, при этом характерное число Рейнольдса, рассчитываемое по высоте H, равняется Re = 16 500. В ходе эксперимента получены двухмерные поля скорости при обтекании куба в центральных продольном и поперечном сечениях. Кроме этого, проводилось численное моделирование данной задачи при Re = 18 000 и Re = 1,6 x 10^6.

Во время второго эксперимента проводилось обдувание куба высотой H = 500 мм посредством аэродинамической стены, здесь с помощью анемометра производились измерения продольной компоненты скорости в центральном сечении. Были построены 15 профилей скорости по 20 точек в каждом и на основе них восстановлено поле скорости. В данном эксперименте скорость набегающего потока составляла порядка 7 м/с, при этом характерное число Рейнольдса составляет Re = 225 000.

Для сопоставления с высокорейнольдсовыми данными используются линии тока, полученные в работах [3] и [5]. Основным преимуществом этих данных является использование в качестве начальных параметров профиля скорости и турбулентных пульсаций, полученных в ходе экспериментального исследования 6-метрового куба в Silsoe [6, 7]. В данных работах в основном изучается распределение давления на поверхности куба, но при этом очень большое внимание уделяется определению характеристик набегающего потока. Расчет производится с помощью неплохо зарекомендовавшего себя в подобных задачах метода ID DES (improved delayed detached eddy simulation). По оценкам, число Рейнольдса в данной работе соответствуют порядка Re = 4 x 10^6.

В качестве сопоставляемых параметров берутся границы формирования вихревых зон, которых согласно [1,3,4] выделяют три: вихрь перед кубом, отрывной вихрь на поверхности куба, и зона аэродинамической тени за кубом.

Сопоставление данных для различных диапазонов чисел Рейнольдса в конечном счёте дают неплохое качественное соответствие, что в свою очередь говорит о возможности моделирования подобных задач в условиях мелкого масштаба на аэродинамических лабораторных установках. На рис.1 приведено сравнение полей скорости для кубов, данные представлены в безразмерно виде, нормировка координаты произведена по высоте H = 50 мм и H = 500 мм, нормировка скорости – по средней скорости потока.

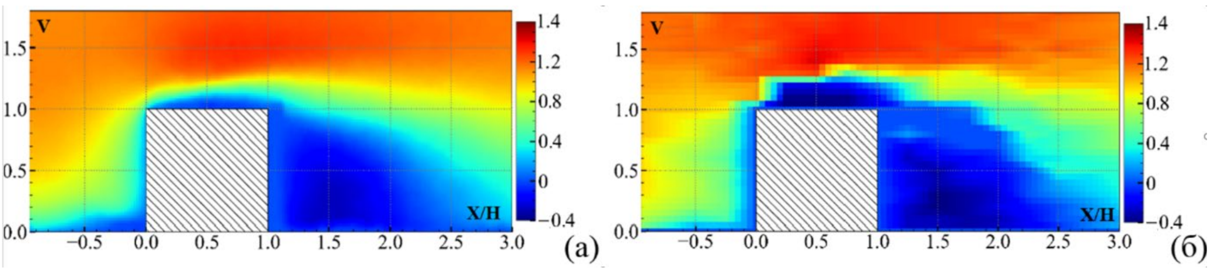


Рис. 1. Поля продольной компоненты скорости при обтекании кубов
H = 50 мм, Re = 18 000 (а) и H = 500 мм, Re = 225 000 (б)

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

Список литературы

1. Rodi, W. Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 1997, 69, 55–75.
2. Castro, I.; Robins, A. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. J. Fluid Mech. 1977, 79, 307 – 335.

3. Pavlidis, C.L.; Palampigik, A.V.; Vasilopoulos, K.; Lekakis, I.C.; Sarris, I.E. Air Flow Study around Isolated Cubical Building in the City of Athens under Various Climate Conditions. Appl. Sci. 2022, 12, 3410.

4. Martinuzzi, R.; Tropea, C. The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow (Data Bank Contribution). J. Fluids Eng. 1993, 115, 85–92.

5. Hu, J.; Xuan, H.B.; Kwok, K.C.S.; Zhang, Y.; Yu, Y. Study of wind flow over a 6 m cube using improved delayed detached Eddy simulation. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 2018, 179, 463–474.

6. Richards, P.J.; Hoxey, R.P.; Short, L.J. Wind pressures on a 6m cube. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 2001, 89, 1553–1564. doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00139-8.

7. Richards, P.J.; Hoxey, R.P.; Connell, B.D.; Lander, D.P. Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 2007, 95, 1384–1399.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Дорохов[*], С. С. Кропотова, П. А. Стрижак[*]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[*] *vvd11@tpu.ru*

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик термического разложения и состава продуктов сгорания типичных отделочных материалов. Эксперименты проведены на стенде, основными элементами которого являлись трубчатая муфельная печь (диапазон температуры 700–900 °C) и газоанализатор с группой сенсоров для регистрации совокупности газов: CO_2, CO, CH_4, H_2, SO_2 и NO. Установлены тренды изменения основных антропогенных выбросов в течение всех стадий реагирования исследуемых материалов. Вычислены средние значения концентраций основных продуктов сгорания. Определены характеристики термического разложения типичных отделочных материалов методом термогравиметрического анализа.

Выделение дымовых газов при горении отделочных материалов помещений является одной из наиболее частных причин летальных исходов при возгорании объектов инфраструктуры и жилых домов. Угарный газ является наиболее опасным газовым компонентом при пожарах, при 30-минутном воздействии CO на человека при концентрации порядка 5700 pm наступает смерть [1]. Углекислый газ (CO_2) в продуктах сгорания так же опасен, поскольку он увеличивает частоту дыхания человека, из-за чего происходит вдыхание опасных ядовитых газов в больших концентрациях [2]. Учитывая эти и другие факторы, появляется необходимость в проведение исследований в области противопожарной классификация строительных материалов для получения более достоверной информации.

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда. Процессы зажигания и горения отделочных материалов протекали в горизонтальной электрической печи Nabertherm R 50/250/13 (диапазон варьирования температуры 20–1200 °C; температура регулируется по сигналу встроенной термопары типа S). Диапазон варьируемых в эксперименте температур составлял 500–900 °C. Контроль и измерение состава газа, образующегося при сжигании рассматриваемых топлив, осуществлялись с применением газоаналитической системы Тест 1 («Бонэр-ВТ», г. Новосибирск). Для определения характеристик термического разложения использовался ТГА анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+.

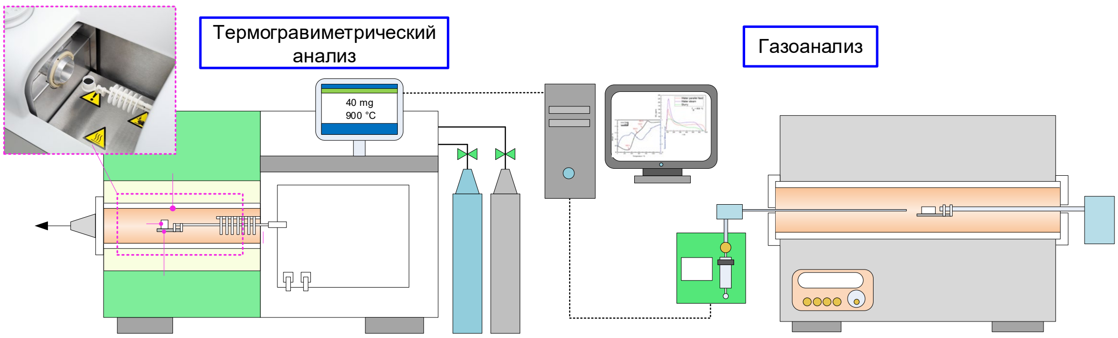
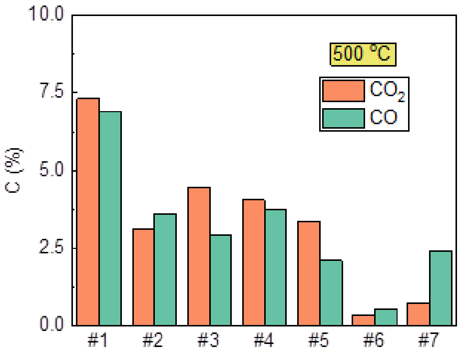
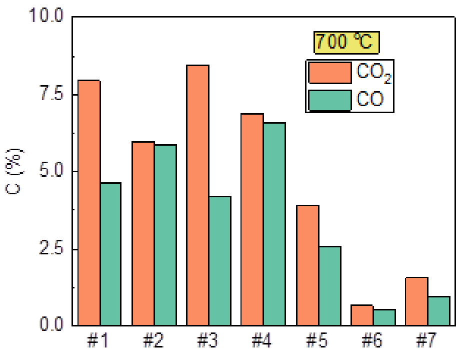


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

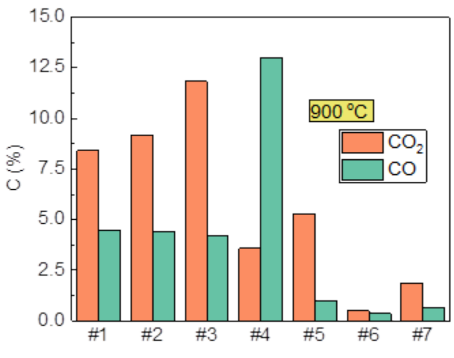
На рис.2 представлены концентрации углекислого и угарного газов, образующиеся при горении исследуемых отделочных материалов при различных температурах окислительной среды. Отчетливо видно, что повышение температуры окислителя приводит к изменению соотношения CO_2/CO для всех видов исследуемых отделочных материалов. Так, при температуре окислителя 500 °C, концентрации моно- и диоксида углерода при горении исследуемых образцов являются достаточно близкими, а горение линолеума сопровождается даже большими концентрациями CO, чем CO_2. В свою очередь, увеличение температуры окислительной среды приводит к росту концентраций CO_2 в составе дымовых газов и уже при 700 °C в камере сгорания CO_2 является доминирующим компонентом газовой смеси при горении всех исследуемых образцов. При этом, данная тенденция сохраняется и при температуре окислителя 900 °C для всех отделочных материалов, кроме полипропилена. В данном случае содержание CO оказалось выше в 3.6 раза по сравнению с CO_2. Причиной этого служит термохимическая конверсия полипропилена при высокой скорости прогрева образца, в результате которой регистрировались значительные изменения в прогоревшем остатке. Так, при температурах в камере сгорания 500 и 700 °C остаток после термического разложения представлял собой кристаллизовавшийся расплав образца. В свою очередь, при температуре в камере сгорания 900 °C, остаток образца полипропилена после эксперимента представлял собой твердую частицу, практически не потерявшую своей формы после термического разложения.



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Концентрации оксидов углерода в зависимости от температуры окислителя:
а – 500 °C; б – 700 °C; в – 900 °C (#1 древесина, #2 линолеум, #3 ПВХ, #4 полипропилен, #5 стекломагнезитовый лист, #6 минеральная вата, #7 гипсокартон)

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 21-19-00009

Список литературы

1. ISO 13344 – Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents, (2015). https://www.iso.org/standard/68029.html (accessed December 31, 2021).
2. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // Energy Build. 2011. Vol. 43, № 2–3. P. 498–506.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СЕЛЬСКОГО ДОМА

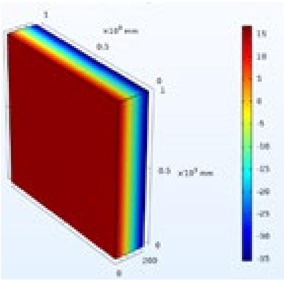
М. В. Драница[1*], А. С. Орешонков[1,2]*

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38
[*] mari.dranitsa@mail.ru

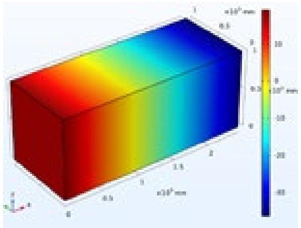
В данной работе выполнено сравнение классических и альтернативных вариантов наружных ограждающих конструкций, применяемых для строительства жилых помещений в сельской местности. Среди анализируемых параметров рассмотрены: толщина конструкции; теплопроводность используемых материалов и тепловое сопротивление варианта стеновой конструкции; соответствие теплового сопротивления наружной ограждающей конструкции нормативам в рассматриваемом регионе (Красноярский край); стоимость.

Дерево и кирпич являются наиболее популярными материалами для возведения стеновых конструкций жилых зданий в сельской местности [1]. Одним из древнейших строительных материалов является саман – блок (кирпич) с добавкой материалов доступных в сельской местности (солома, навоз). Если при производстве бетонных блоков в качестве заполнителя используются отходы лесозаготовок, лесопиления и деревообработки (до 80–90 % от объёма), то такой материал называют арболитом. В качестве органических утеплителей могут использоваться блоки из прессованной соломы зерновых культур (ячмень, рожь, пшеница, овёс) [2]. SIP-панель представляет собой теплую и прочную трехслойную конструкцию, состоящую из двух деревянных плит, между которыми вклеен слой утеплителя. Набирают популярность стеновые EPS сэндвич-панели, которые представляют собой легкую энергосберегающую конструкцию, заполненную смесью цемента и вспененного утеплителя [3].

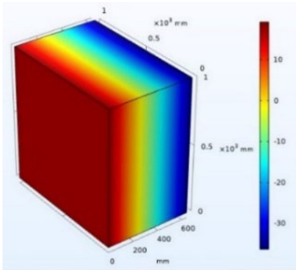
В данной работе, в пакете Comsol, выполнены расчеты температурного состояния стеновых конструкций (рис. 1). Результаты расчетов рассмотренных конструкций показаны в табл. 1.



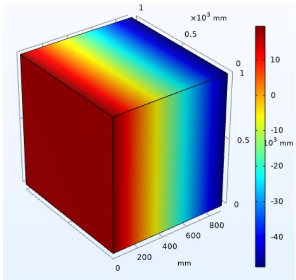
а)



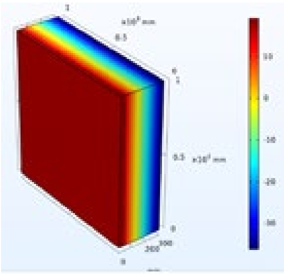
б)



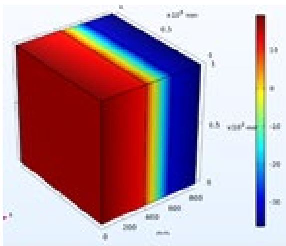
в)



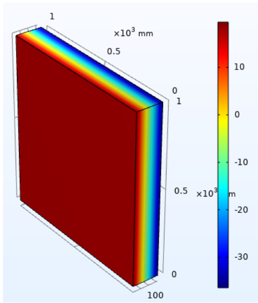
г)



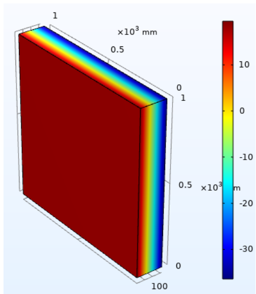
д)



е)



ж)



з)

Рис.1. Распределение температуры в ограждающей конструкции: а) дерево; б) обыкновенный глиняный кирпич; в) арболит; г) саман; д) дерево, утеплитель (прессованная солома), дерево; е) кирпич, утеплитель (прессованная солома), кирпич; ж) СИП-панель; з) цементная EPS сэндвич-панель

Таблица 1

Результаты теплотехнических расчетов и экономическая оценка рассматриваемых конструкций

Конструкция	Предельное тепловое сопротивление (г. Красноярск), Вт/(м·К)	Тепловое сопротивление ограждающей конструкции, Вт/(м·К)	Размер конструкции в расчете, $м^3$	Стоимость конструкции, руб.
Деревянная ограждающая конструкция		1,59 (не удовлетворяет требованиям)	1x1x0,2	3600
Обыкновенный глиняный кирпич		3,67	1x1x2,46	18252
Арболит		4,42	1x1x0,64	1161,2
Саман		3,71	1x1x0,9	350,43
Дерево, утеплитель (прессованная солома), дерево	3,66	3,67	1x1x0,3 дерево – 25мм, утеплитель – 250мм, дерево - 25мм	2267
Кирпич, утеплитель (прессованная солома), кирпич		3,8	1x1x1,01 кирпич – 380мм, утеплитель – 220мм, кирпич - 250мм	9126,3
СИП-панели		4,48	1x1x0,168	1062,4
Цементная EPS сэндвич-панель		4,37	1x1x0,160	764,85

Граничные условия (табл. 2), используемые в расчёте, были взяты в соответствии с СП 50 [4].

Таблица 2

Граничные условия, используемые в расчете

Условия	Температура,℃	Коэффициент теплопередачи, $Вт/м^2 \cdot ℃$	Влажность, %
Внутренние, t_{int}	+21	8,7	55
Внешние, t_{ext}	-37	23	12

Наиболее экономически выгодными вариантами наружных ограждающих конструкций (из рассмотренных в данной работе), удовлетворяющих критерию по тепловому сопротивлению, являются: конструкция из самана толщиной 900 мм; цементная EPS сэндвич-панель толщиной 160 мм и СИП-панель толщиной 168 мм. Результаты данной работы могут быть использованы при поиске альтернативных вариантов наружных ограждающих конструкций, не уступающих классическим по своим характеристикам.

Список литературы

1. Росстат: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru (дата обращения 19.01.2023).

2. Голова Т. А. Строительство энергоэффективных малоэтажных зданий с многослойной конструкцией «Сельская стена» // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. 2015. № 7(19).

3. Tawil H., Tan C. G., Sulong N. H. Z., Nazri F. M., Sherif M. M. and El-Shafie A. Me-chanical and thermal properties of composite precast concrete sandwich panels: a review // Buildings, vol. 12(9), pp. 1429, 2022.

4. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ. 2013-07-01. М.: Минрегион России, 2012.

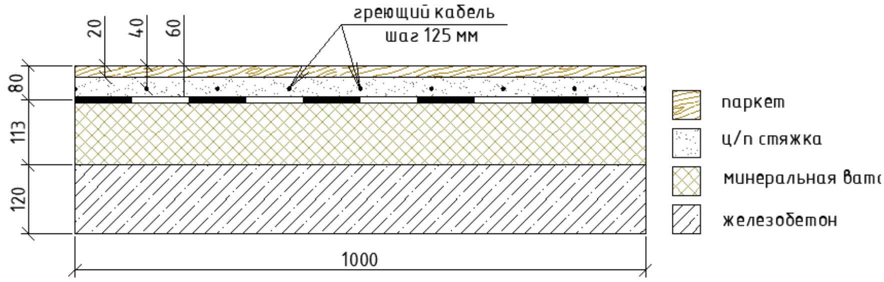
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОЛОВ ПЕРВЫХ ЭТАЖЕЙ ЗДАНИЙ НАД АВТОМОБИЛЬНОЙ ПАРКОВКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ ВИДОВ МАТЕРИАЛОВ

А. М. Жжоных*, И. В. Тарасов,
П. Ю. Веде, Д. В. Тараненко*

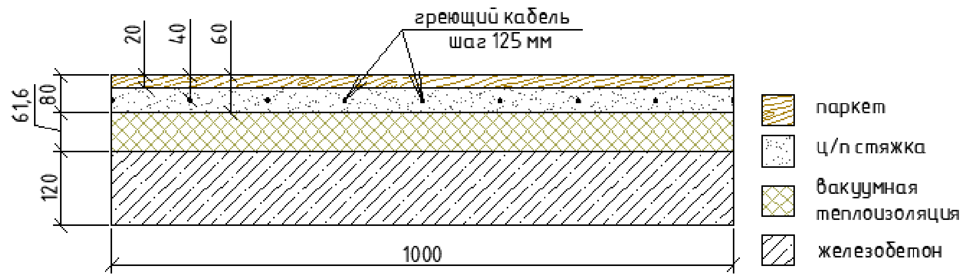
Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
* *AZhzhonykh@sfu-kras.ru*

В работе представлены сравнительные результаты теплотехнических расчетов конструкций полов с использованием различного типа утеплителей: обыкновенной минеральной ваты, вакуумной теплоизоляции и материала с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС). Установлена перспективность использования новых видов утеплителя в композиции с разработанной вакуумной теплоизоляцией и МИФС.

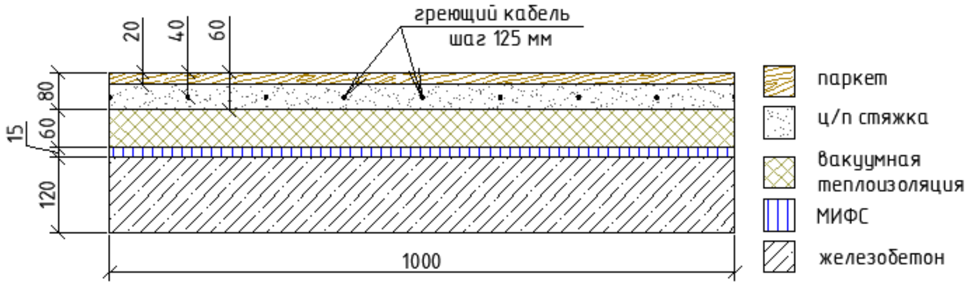
В настоящей работе представлены результаты нестационарных расчетов полов первого этажа для жилых зданий с подземной автостоянкой. Конструкция полов представлена на рис. 1.



а)



б)



в)

Рис. 1. Принятые к расчету конструкции полов: а – образец для сравнения;
б – конструкция с вакуумной теплоизоляцией; в – конструкция с вакуумной теплоизоляцией и МИФС

Нижние и верхние граничные условия для схем, изображенных на рис. 1, одинаковы и представляют собой условия третьего рода с переменной температурой, с периодом колебаний 24 часа. Средняя температура внутреннего воздуха принята 20±5°С, средняя температура воздуха холодного подвала установлена как 5±10°С.

За образец сравнения принята конструкция пола на рис. 1, а, рассчитанная в соответствии с руководством по проектированию и устройству обогреваемых полов жилых и общественных зданий, строящихся в северной строительно-климатической зоне, разработанным Красноярским ПромстройНИИпроектом с учетом экономической целесообразности и с применением современных тарифов. Сопротивление теплопередачи для всех вариантов принято одинаковым 3,68 $m^2 \cdot K/W$.

В этой и других представленных конструкция теплотехнические свойства материалов взяты из Приложения Т СП 50.13330 для условий эксплуатации А. Низковакуумная теплоизоляция (рис. 1, б) разработана на кафедре проектирования зданий и экспертизы недвижимости ИСИ СФУ и имеет теплопроводность 0,018 W/m·K.

В конструкции на рис. 1, в использован модельный материал с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) с теплотой фазового перехода 190 Дж/кг. Температура фазового перехода варьировалась от 2 до 100°С. На рис. 2 представлены результаты расчета относительного количества претерпевшего фазовый переход материала в зависимости от температуры.

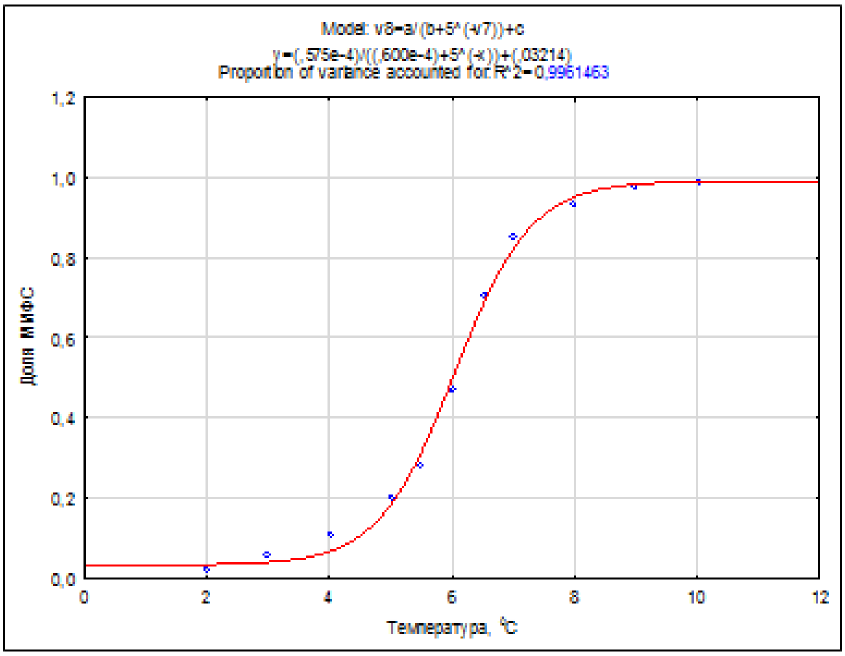


Рис. 2. Зависимость относительной доли модельного МИФС в исследуемой конструкции в зависимости от принятой температуры фазового перехода

Основные выводы:

1. Применение вакуумной теплоизоляции позволяет снизить толщину конструкции или увеличить высоту этажа более чем на 5 см.

2. Применение МИФС в конструкциях под слоем вакуумной теплоизоляции практически не влияет на нормируемую теплоту поверхности пола, однако в значительной степени способствует перераспределению тепла в толще конструкции.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Д. П. Касымов*, В. В. Перминов, Е. Н. Голубничий, А. С. Якимов*

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 36
* *denkasymov@gmail.com*

Проблема пожаров на природно-урбанизированной территории с каждым годом усиливается. Исследования в данной области сводятся к изучению процесса конструкционного возгорания и способов снижения воздействия огня. Основными причинами таких возгораний преимущественно являются воздействия потока тепла от пламени и различных точечных источников возгорания. Поскольку конструкционные материалы и растительность в населенных пунктах подвержены горению, то они могут внести существенный вклад в распространение пожара в зоне застройки. Таким образом, целью работы является изучение пористых горючих материалов различной конфигурации в результате теплового воздействия.

Исследование пожаров на природно-урбанизированной территории, которые случаются в местах, где сосуществуют сообщества и дикая растительность, из года в год становится все больше актуальным. Это вызвано существенным увеличением числа загородной застройки, где дома часто возводятся на границе с лесом.

Основная проблема, рассматриваемая в исследованиях таких пожаров, – это проблема конструкционного возгорания. При строительстве домов на таких территориях для каркаса здания часто используют материалы из сосны, ели или лиственницы, а для обшивки здания – фанеру, ориентированно-стружечную плиту, древесно-стружечную плиту. В этом случае лучшим подходом будет снижение потенциала конструкционного возгорания для решения данной проблемы.

При подготовке лабораторных экспериментов для исследования воздействия точечного источника горения на угловую конструкцию использовались образцы строительных материалов на основе древесины и слоя теплоизоляционного материала. Такая конструкция моделирует случай, когда источники возгорания, образующиеся во время природного пожара, оказывают воздействие на углы зданий как снаружи строения, так и при воздействии источника пожара изнутри. Для анализа динамики изменения температуры на поверхности исследуемых образцов использовался бесконтактный метод ИК-диагностики, который активно применяется в данной области [1, 2].

По результатам экспериментов по воздействию точечного источника пожара на модель угловой конструкции было отмечено, что наиболее подвержен воздействию пламени участок, образующий угол и торцы уголка. Температура на поверхности угловой конструкции в результате воздействия на него точечного очага горения, полученная методом ИК-диагностики, составила 590–607 K на торцах и 607–622 K на участке, образующем угол. При равных условиях эксперимента (температура источника воздействия, влагосодержание образцов конструкции) воспламенения торцевой части конструкции не наблюдалось, участок, образующий угол, воспламенялся с последующим горением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00068.

Список литературы

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М. : ИД Спектр, 2009. 544 с.

2. Rios O., Pastor E., Valero M. M., Planas E. Short-term fire front spread prediction using inverse modelling and airborne infrared images // Int. Jour. of Wildland Fire. 2016. V. 25. P. 1033–1047.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Ю.О. Кривошеин*, Н. А. Цветков, А. В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко*

Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Российская Федерация, Томск, Соляная пл., 2
** krivoshein@npowest.tom.ru*

Представлены результаты годового натурного исследования эффективности гибридных солнечных систем горячего водоснабжения в жилых домах энергоэффективного городского округа «Жатай» (Якутск). Показано, что солнечная фракция в горячей воде за год не превышает 28%, в то время как проектный показатель этой величины составлял 51%. Установлены причины столь низкой эффективности таких систем ГВС, связанные с возникновением естественной конвекции в ночное время. Разработан способ управления тепловыми режимами гидравлических контуров коллекторов, позволяющий получать максимальную годовую солнечную фракцию при минимальных тепловых потерях с исключением замерзания теплоносителя в гидравлических контурах коллекторов в ночное время.

Реализация планов развития богатых полезными ископаемыми огромных северных территорий России с низкой плотностью населения [1] требует решения множества задач, в том числе связанных со строительством жилых и общественных зданий и неизбежным увеличением производства тепловой и электрической энергии.

Конечность ископаемых видов топлива и экологический вред для природы и людей при их сжигании ограничивают возможности использования углеродосодержащих источников. Более того, северные территории весьма чувствительны к любым загрязнениям, а самоочищение этих территорий требует значительно больше времени, чем южных. Зеленый переход в энергетике, поддерживаемый стратегией научно-технологического развития России, связан с разработкой, совершенствованием и использованием безуглеродных технологий, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Преобразование потока солнечной инсоляции устройствами для получения электрической и тепловой энергии в сочетании с использованием теплонасосных установок для извлечения тепловой энергии из верхнего слоя земной коры – наиболее развиваемые и применяемые в строительстве технологии. Для северных территорий с вечной мерзлотой применение теплонасосных установок для получения тепловой энергии малоэффективно. Использование же гибридных солнечных водонагревательных установок (солнечные коллекторы и газовые котлы) для систем горячего водоснабжения (ГВС) может быть эффективным [2], но ограничено малой изученностью их при круглогодичном использовании.

В работе представлены результаты натурных годовых исследований [3], связанных с повышением эффективности гибридных солнечных систем ГВС в энергоэффективном квартале «Жатай» г. Якутска. Доля солнечной энергии в потребленной горячей воде за год (солнечная фракция) в этих системах не превышает 28% и значительно ниже проектных показателей 51%.

При натурных исследованиях, выполненных на опытно-промышленной системе ГВС в с. Кафтанчиково (Томская область), установлены причины снижения солнечной фракции за счет возникновения свободно-конвективного движения теплоносителя в гидравлическом контуре коллекторов в ночное время [1].

Рассмотрены возможности энергосбережения при управлении работой циркуляционного насоса [4]. Разработаны алгоритмы управления гибридными системами ГВС с исключением замерзания теплоносителя ночью в гидравлических контурах коллекторах при температурах наружного воздуха ниже точки замерзания пропилен-гликолевых теплоносителей [5].

Суть управления (рис. 1) заключается в том, что в дневное время пропилен-гликолевый теплоноситель с температурой замерзания –30 ºС поступает в первый из двух коллекторов. В ночное время после охлаждения одного из коллекторов до установленной температуры -5 ºС соленоидный клапан открывается и возникает обратное течение теплоносителя – от второго коллектора к первому. При установленной температуре 0 ºС соленоидный клапан закрывается. Оба коллектора охлаждаются.

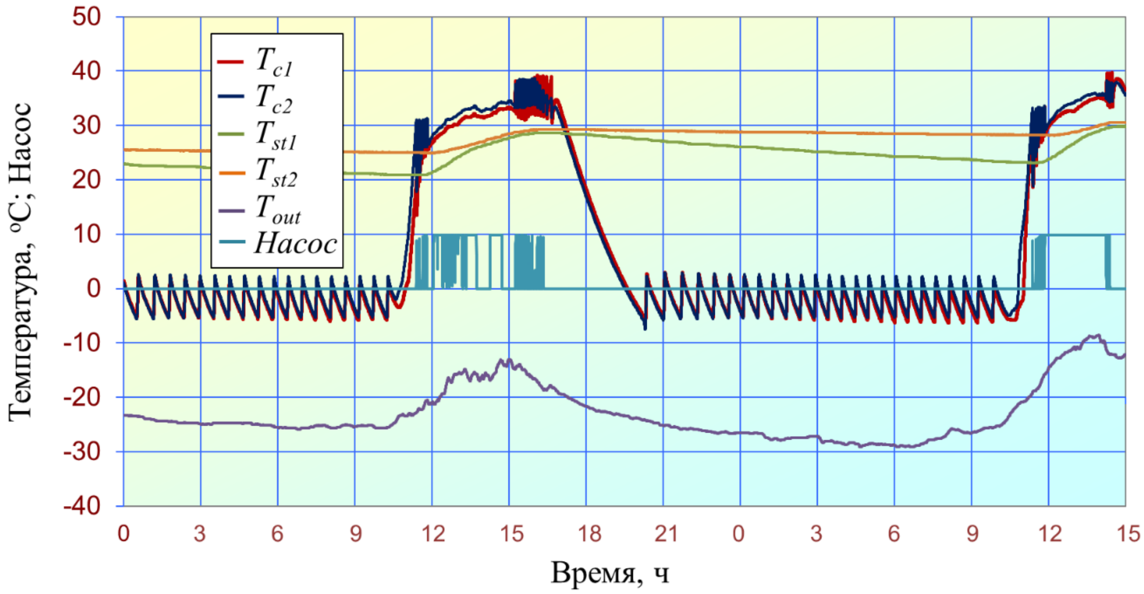


Рис. 1. Изменение температурных режимов в центре коллекторов
в ночное время 14–15 января 2022 года

Такое управление позволяет устанавливать нижний предел регулирования температуры коллекторов на 5 ºС выше точки замерзания теплоносителя [6].

Для Томска, Красноярска, Иркутска и Якутска определены рекомендуемые точки замерзания для использования пропилен-гликолевых низкозамерзающих жидкостей.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN2022-0003.

Список литературы

1. Tsvetkov N.A., Krivoshein U.O., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S. The calculation of solar energy used by hot water systems in permafrost region: An experimental case study for Yakutia // Energy, vol. 210, 118577, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118577.

2. Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Петрова Эффективная солнечная система горячего водоснабжения для северных территорий // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. 2020, Т. 22, № 6. С. 119–131.

3. Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Petrova A.V. Development of the Computer-Aided Application for the Use of Solar Energy in the Hot Water

Supply System of Russian Permafrost Regions, Chemical Engineering Transactions, vol. 81, pp/ 943–948, 2020, DOI: 10.3303/CET2081158.

4. Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Петрова А.В., Толстых А.В., Немова Т.Н. Возможности энергосбережения при работе циркуляционного насоса в гидравлическом контуре коллекторов солнечных водонагревательных систем // Вестник гос. архит.-строит. ун-та. 2021. Т. 23, № 4. С. 100–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-100-111.

5. Tsvetkov, N.; Boldyryev, S.; Shilin, A.; Krivoshein, Y.; Tolstykh, A. Hardware and Software Implementation for Solar Hot Water System in Northern Regions of Russia // Energies, vol. 15, 1446, 2022, DOI: 10.3390/en15041446.

6. Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Толстых А.В., Колесникова А.В. Управление гидравлическим контуром коллекторов в солнечных системах ГВС в ночное время // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития: материалы IX on-line Международ. науч.-практ. конф. 28–29 апр. 2022 года / под науч. ред. Л.А. Каверзиной, И.П. Нужиной, С.А. Астафьева. Братск: Изд-во БрГУ, 2022. С. 494–501.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПО СОСТАВУ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

С. С. Кропотова[1], Г. В. Кузнецов[1], Н. П. Копылов[2], П. А. Стрижак[1], А. О. Жданова[1]⁎*

[1] Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[2] Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России
143903, Российская Федерация, Балашиха, мкрн ВНИИПО, 12
⁎ zhdanovaao@tpu.ru

Изложены особенности методологии и процедуры исследования состава продуктов пиролиза и горения типичных для помещений синтетических и природных материалов. Газовая и газожидкостная хроматография, масс-эффузиоспектрометрия, ИК-спектрометрия, газоаналитическое оборудование (лабораторные и промышленные газоанализаторы) позволяют идентифицировать широкий спектр соединений в составе газов. Выделены закономерности детектирования различных компонентов в смеси продуктов пиролиза и горения, а также особенности изменения последних. Обоснована необходимость измерения концентраций газов с использованием группы методик, так как каждая из них позволяет проанализировать определенную совокупность соединений и исключить ложные срабатывания и большую инерционность детектирования возгораний веществ и материалов.

При анализе статистических данных [1–3] сформулировано заключение о том, что наибольшее количество пожаров происходит в зданиях и сооружениях. Основными факторами, угрожающими жизни людей, являются размер очага пожара, скорость распространения горения, интенсивность образования дыма, а также токсичность продуктов пиролиза (термического разложения) и горения. Пожары, приводящие к гибели людей и порче имущества, в большинстве случаев имеют беспламенную форму (как правило, доминирует режим тления). Это приводит к быстрому накоплению в объёме помещения токсичных продуктов пиролиза, концентрации которых существенно превышают предельно допустимые. Актуальным является определение состава продуктов термического разложения и горения материалов в помещениях с применением совокупности передовых методик. Это позволит оценить поведение различных материалов в условиях возгораний и пожаров, диапазоны выделения токсичных продуктов при пиролизе и горении материалов, а также оценивать воздействие пожаров на окружающую среду, идентифицировать возгорание на его ранней стадии [4–7]. Целью настоящего исследования является получение базы экспериментальных данных с концентрациями газообразных продуктов пиролиза, образующихся при термическом разложении типичных материалов помещений. Новизна исследования заключается в том, что значения концентраций токсичных газов определены с использованием газовой и газожидкостной хроматографии, масс-эффузиоспетрометрии, ИК-спектрометрии, лабораторных и промышленных газоанализаторов. Впервые проведено сравнение данных методик по группе регистрируемых соединений. Полученная база экспериментальных данных важна для прогнозирования газообразных продуктов пиролиза, образующихся при пожарах в помещениях различного назначения.

Определение молекулярной массы компонентов проводилось с использованием хромато-масс-эффузиометра. Исследования продуктов горения для легких компонентов проводились методом газовой хроматографии с использованием термохимического детектора хроматографа. Определение диоксида углерода, этилена, этана проводилось при той же системе детектирования на хроматографической колонке длиной 3 м, заполненной полисорбом I зернением 0.1–0.3 мм. Большинство токсичных газов, выделяющихся при термическом разложении твердых горючих материалов, имеют известные ИК-спектры. Концентрацию отдельных соединений в сложных многокомпонентных газовых смесях позволяет измерять метод ИК-Фурье спектроскопии (FTIR).

Полученные в настоящей работе результаты измерения концентраций продуктов, образующихся при термическом разложении и горении типичных для помещений материалов, позволили сформулировать заключение о том, что с использованием различных методик измерения концентраций газов предоставляется возможным идентифицировать материал в очаге пожара, а также по конкретному горючему материалу (или нескольким материалам) оценить токсическую опасность помещения при пожаре. Например, с использованием таких методик, как газовая хроматография, хромато-масс-эффузиометрия, инфракрасная спектроскопия, установлено, что наибольший выход токсичных веществ происходит при термическом разложении кожи, шерсти, поролона, бумаги. Помещения, в которых данные материалы присутствуют в большом количестве (являются преобладающими), целесообразно оснащать дополнительными системами вентиляции (в частности, перспективными на сегодняшний день аспирационными системами) и высокоточными газоаналитическими системами [8,9] (промышленными газоанализаторами, высокоточными газовыми датчиками с быстрым откликом и др.), а также дополнительными системами подачи огнетушащего состава (за счет увеличения веток распределительных трубопроводов, форсуночных устройств, спринклеров).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00009, https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/)

Список литературы

1. V. Kodur, P. Kumar, M.M. Rafi. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety // PSU Res. Rev., vol. 4, pp. 1–23, 2019.

2. G.P. Araujo Lima, J.D. Viana Barbosa, V.E. Beal, M.A. Marcelo, B.A. Souza Machado, J.Z. Gerber, B.S. Lazarus. Exploratory analysis of fire statistical data and prospective study applied to security and protection systems // Int. J. Disaster Risk Reduct., vol. 61, 102308, 2021.

3. Y. Luo, Q. Li, L. Jiang, Y. Zhou. Analysis of Chinese fire statistics during the period 1997–2017 // Fire Saf. J., vol. 125, 103400, 2021.

4. K. Mróz, I. Hager, K. Korniejenko. Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing // Procedia Eng., vol. 151, pp. 284–291, 2016.

5. C.D. Litton, I.E. Perera, S.P. Harteis, K.A. Teacoach, M.I. DeRosa, R.A. Thomas, A.C. Smith, Some relevant parameters for assessing fire hazards of combustible mine materials using laboratory scale experiments // Fuel, vol. 218, pp. 306–315, 2018.

6. T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard, F. Jabouille, Kinetic and mechanism of the thermal degradation of a plywood by using thermogravimetry and Fourier-transformed infrared spectroscopy analysis in nitrogen and air atmosphere // Fire Saf. J. vol. 58, pp. 25–37, 2013.

7. T. Fateh, F. Richard, B. Batiot, T. Rogaume, J. Luche, J. Zaida, Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter – FTIR apparatus // Fire Saf. J., vol. 82, pp. 91–100, 2016.

8. J. Dang, H. Yu, F. Song, Y. Wang, Y. Sun, C. Zheng, An early fire gas sensor based on 2.33 μm DFB laser // Infrared Phys. Technol. vol. 92, pp. 84–89, 2018.
9. S. Chen, J. Ren, Y. Yan, M. Sun, F. Hu, H. Zhao, Multi-sourced sensing and support vector machine classification for effective detection of fire hazard in early stage // Comput. Electr. Eng. vol. 101, 108046, 2022.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРОДСКОМ КВАРТАЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К. Ю. Литвинцев, А. А. Дектерев, А. А. Филимонов*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

В статье рассматривается влияние солнечного и теплового излучения на формирование ветрового режима в условиях городской застройки г. Красноярска в зимнее время.

Протекающий в мире процесс урбанизации закономерно привел к появлению исследований с применением как физического, так и численного моделирования процессов тепломассопереноса, протекающих в городской среде [1–5], основная конечная цель которых – повышение комфортности проживания людей. В рамках данных исследований изучаются такие вопросы как: городской остров тепла [5]; формирование аэрационного режима при обтекание ветром городских кварталов и отдельных зданий [2]; распространение загрязнений [3]; влияние городской застройки на уровень пешеходной комфортности [1]; процессы тепломассообмена в городской среде [3, 4].

В данной работе рассматривается влияние излучения (солнечного и теплового) на формирование ветрового и теплового режима на примере городского района Красноярска, содержащего здания разной высотности, которые также являются источником тепла. Исследуемый район, представляет собой крупный торговый центр, расположенный среди жилой застройки, который обтекается слабым ветровым потоком в зимнее время.

Моделирование проводилось на основе микромасштабной модели городской атмосферы, основанной на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса для несжимаемых течений в неупругом приближении [6]. Система уравнений для осредненных метеорологических величин включает:
уравнение неразрывности

$$\nabla(\rho_h \boldsymbol{V}) = 0,$$

уравнение движения

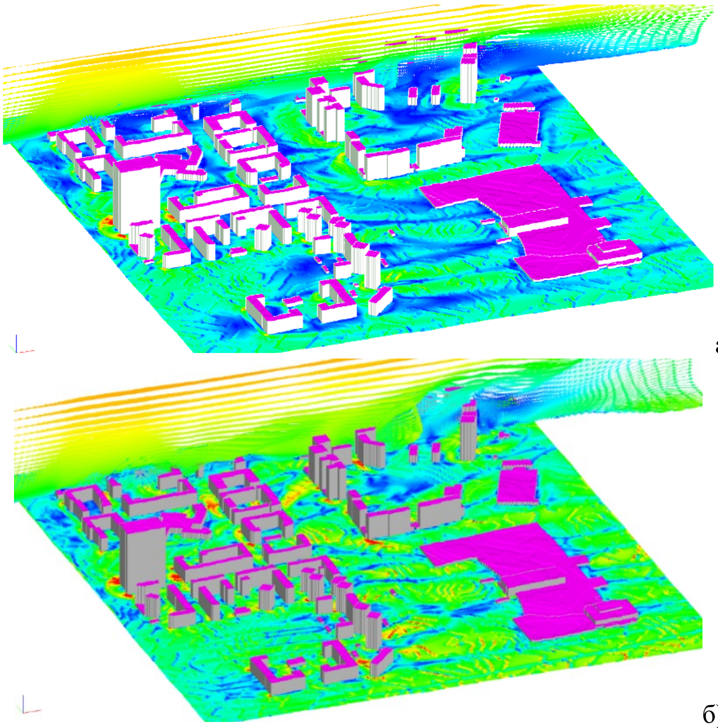
$$\frac{d(\rho_h \boldsymbol{V})}{dt} = -\nabla p + \boldsymbol{g}\rho_h \,{(\theta_h - \theta)}\big/{\theta_h} + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla \boldsymbol{V} + \nabla \boldsymbol{V}^{\boldsymbol{T}})],$$

уравнение сохранения энергии, которое записывается через потенциальную температуру θ, K:

$$\rho_h C_p \frac{d\theta}{dt} = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{\mathrm{Pr}_t}\right)\nabla\theta\right] + S_\theta,$$

где $\frac{d}{dt}$ – субстанциональная производная; $\boldsymbol{V}$ – вектор скорости, м/с; ρ_h – гидростатическая плотность, кг/м^3; p – осреднённое давление, Па; μ – динамическая вязкость, кг/(м·с); C_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность, Вт/(м·К); S_θ – дополнительный тепловой источник, μt – турбулентная вязкость; $\boldsymbol{g}$ – ускорение свободного падения; Pr_t – турбулентное число Прандтля.

Для расчета солнечного и теплового переноса излучения использовался модифицированный метод конечного объема [7] с граничными условиями, описанными в работах [8, 9]. В рамках метеорологической модели поле излучения разделяется на коротковолновое солнечное излучение и длинноволновое излучение атмосферы и поверхности земли, для каждого из которых отдельно решается свое уравнение переноса излучения. Солнечное излучения в значительной степени определяет процессы тепломассопереноса в городской среде и соответственно, аэрационный режим. В дневное время в условиях ясного неба это приводит к интенсификации конвективных течений в приземной области (рис. 1). Солнечная энергия интенсифицирует конвективные потоки в приземной области, снижая аэродинамическую тень от зданий и увеличивая подъемную компоненту скорости.



а)

б)

Рис. 1. Поле скорости вблизи поверхности (скалярное, от 0 до 2 м/с) и в вертикальном сечении (векторное, от 0 до 5 м/с): а) в ночное время; б) в дневное время (14.00)

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

Список литературы

1. Robinson D. Computer modelling for sustainable urban design-physical principles, methods and applications. L.: Earthscan, 278 p., 2011.

2. Tominaga Y., Shirzadi M. Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment // Building and Environment, Vol. 206, 108389, 2021.

3. Gaoa Z., Bressona R., Y.Qua Y., M. Maya, Munckb C., Carissimoa B. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse // Urban Climate, Vol. 23, pp. 114-130, 2018.

4, Toarlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. CFD simulation and validation of urban microclimate:

A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam // Building & Environment, Vol 83, pp. 79-90, 2015.

5. Wang X., Li Y. Predicting urban heat island circulation using CFD // Building and Environment, Vol 99, pp. 82-97, 2016.

6. Ogura Y., Charney J.G. A numerical model of thermal convection in the atmosphere. // Proc. Int. Symp. on Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan, Meteorological Society of Japan, pp. 431–451, 1962.

7. Litvintsev K.Yu., Sentyabov A.V. Application of the finite volume method for calculating radiation heat transfer in applied problems // Bulletin SUSU MMCS, V. 14(3), pp. 77-91, 2021.

8. Bird R. E. A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. SERI/TR, 642 (761), 38 P.

9. Psiloglou B.E., Santamouris M., Asimakopoulos D.N. Atmospheric Broadband Model for Computation of Solar Radiation at the Earth's Surface. Application to Mediterranean Climate // Pure appl. Geophys, Vol. 157, pp. 829 – 860, 2000.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СНЕГОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К. Ю. Литвинцев[1,2], А. А. Гаврилов[1,2], А. А. Дектерев[1,2], Д. А. Дектерев[1,2], Ю. Н. Захаринский[1], В. Д. Мешкова[1], А. В. Минаков[1], С. А. Филимонов[1,2], К. А. Финников[1]*

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

В статье рассматривается применение методов численного и физического моделирования процесса переноса снеговетрового потока для разработки снегозащитных мероприятий с использованием компьютерной обработки метеоданных и цифровой модели рельефа.

Значительная часть территории Красноярского края расположена в области Крайнего Севера и на территориях, приравненных к нему. Развитие данных территорий имеет большой экономический потенциал, но требует больших вложений из-за сложных климатических условий.

При развитии северной инфраструктуры необходимо решать множество проблем и одной из них является формирование снежных заносов. Заметание снегом дорог, зданий и других объектов инфраструктуры приводит к существенному ухудшению уровня жизни населения и большим экономическим потерям. Мировой и российский опыт снегоборьбы с метелевыми заносами показывает, что более эффективной мерой является организация дополнительных снегозащитных мероприятий на основе: снегозащитных лесных полос, снегозадерживающих или снегопередувающих устройств [1,2].

В России методы борьбы с образованием снежных заносов и создание теоретических основ для прогнозирования снегопереноса и осаждения снега активно разрабатывались примерно до 70-х годов XX века. Существующая на данный момент в России методология проектирования и способы реализация снегозащитных мероприятий основаны на накопленных к тому времени опыту борьбы со снегом и знаниях о механизмах переноса и осаждения снега [1]. Приведенные в них методики опираются на полуэмпирические модели и не позволяют полноценно учитывать локальный характер переноса снеговетрого потока. Современные методы вычислительной гидродинамики и обработки цифровых данных уже позволяют более эффективно проектировать снегозащитные мероприятия для конкретных условий. В данной работе представлены результаты применения численного моделирования переноса снеговетрового потока для анализа снегозащитной системы для реального участка дороги на основе [3].

В основе математической модели переноса снеговетрового потока лежат осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье – Стокса и диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц [4] для моделирования переноса снежной взвеси. Для расчета осаждения и уноса снега из слоя снежной взвеси используется допущение равновесности слоя сальтации, которое предполагает, что интенсивность осаждения снега из слоя сальтации на неподвижную поверхность равна интенсивности эрозии. Данное допущение может применяться при низких метелевых скоростях. Используемая модель снеговетропереноса позволяет оценивать только начальный этап образования снежных отложений, так как не учитывает влияние динамики формы поверхности снежного покрова.

Расчетная область, учитывающая рельеф и объекты инфраструктуры, строится на основе цифровой карты местности и открытых ГИС сервисов [5].

В ходе выполнения работы были проведены численные и физические исследования влияния геометрических параметров снегозадерживающих заборов на интенсивность осаждения снега на начальном этапе формирования снежных отложений. Данные исследования показали, что основными геометрическими факторами, определяющими интенсивность осаждения снега вблизи заборов, являются просветность (отношение общей площади панели/обрешетки забора к площади просветов в ней) и высота нижнего зазора (расстояние между землей и панелью забора) при сохранении общей высоты забора. В то же время геометрия самих панелей оказывает слабое влияние на интенсивность осаждения снега. На рис. 1 представлено распределение концентрации снега в слое сальтации, которая напрямую определяется значением напряжения на поверхности и, соответственно, связана со скоростью в приземной области. Максимальные концентрации достигаются в области торможения перед забором и в низкоскоростной области с подветренной стороны забора и, наоборот, для нижнего зазора, в котором происходит ускорение потока. Полученные концентрации снега в слое сальтации согласуются с данными из работы [6].

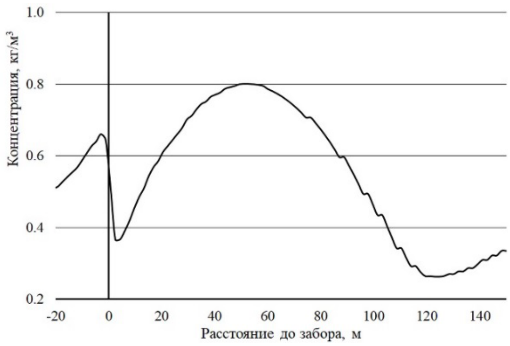


Рис. 1. Распределение концентрации снега в слое сальтации вблизи забора с просветностью 50%.

Также было проведено исследование, направленное на оценку эффективности расположения снегозадерживающих заборов, расположенных вдоль автомобильной дороги на участке с высоким уровнем снегоприноса. Оценка проводилась на основе анализа рельефа, естественных снежных отложений и влияния заборов на их перераспределение. Из-за больших размеров расчетной области (4,5км x 4,5км по горизонтали) моделирование заборов осуществлялось в виде пористой среды.

Полученные результаты, показали, что использование комплексного компьютерного анализа, включающего в себя: численное и физическое моделирование переноса снеговетрового потока; обработку данных ГИС; инструменты визуального анализа, позволяет более эффективно организовывать снегозащитные мероприятия по сравнению с используемыми на данный момент в России подходами.

Список литературы

1. Зимнее содержание автомобильных дорог / под ред. А.К. Дюнина. М.: Изд.-во Транспорт, 1983. 197 с.

2. Controlling blowing and drifting snow fences and road design / R. D. Tabler. Final Report for NCHRP, 307 p., 2003.

3. Литвинцев К. Ю., Гаврилов А. А., Дектерев А. А., Захаринский Ю. Н., Минаков А. В., Филимонов С. А., Финников К. А. Численное моделирование осаждения снега вблизи снегозадерживающих заборов // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 539–550.

4. Zaichik L. I. Drobyshevsky N. I., Filippov A. S., Mukin R. V., Strizhov V. F. A diffu-sion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows // Int. J. Heat Mass Transf. 2010. Vol. 53, № 1–3. P. 154–162.

5. Филимонов С. А., Литвинцев К. Ю., Дектерев А. А., Минаков А. В., Мешкова В. Д., Шарафутдинов Р. А., Захаринский Ю. Н. Применение методов компьютерного моделирования при проектировании снегозащитных систем // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 3 (101). С. 46–55.

6. Pomeroy J. W., Gray D. M. Saltation of Snow // Water Resour. Res. 1990. V. 26, № 7. Pp. 1583–1594.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Р. А. Назиров, А. М. Жжоных,
П. Ю. Веде‡, А. Г. Андюсева*

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

В работе приведены результаты численного расчета температурного распределения по свае и грунту вдали от свайного поля через 10 лет эксплуатации нового здания. Показано, что свайное поле при нормативной эксплуатации подвального помещения способствует стабилизации температуры грунта под зданием, а основной причиной деградации грунтового основания под зданием может является субъективный фактор.

Глобальное повышение температуры в арктической зоне приводит к увеличению протаивания и деградации вечномерзлых грунтов. Согласно данным наблюдений на площадках на территории РФ в рамках Международной программы мониторинга CALM, в XXI веке происходит устойчивое увеличение глубины оттаивания вечной мерзлоты [1].

Увеличение глубины протаивания вечной мерзлоты и соответствующие процессы деградации грунтов приводят к значительным рискам для существующей инфраструктуры городов севера. Исследования Н.С. Никифорова и А.В. Коннова [2] несущей способности свайных фундаментов и деформаций основания зданий в Норильске, возведенных по 1 принципу (многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения, или с допущением их промораживания в период строительства и эксплуатации), показали, что на текущий момент для зданий 60–80-х гг. постройки снижение несущей способности свайного основания достигает 25 %, а в среднем по регионам остается на уровне 10–20 %. Также есть риски снижения несущей способности до 50% за 60 лет. Так, в Норильске количество зданий, получивших повреждения в последние 10 лет, оказалось выше, чем за предшествующие 50 лет. Эти изменения можно сопоставить с имевшими место изменениями температуры воздуха в криолитозоне России, региональные особенности которых рассмотрены в ряде работ [3].

С другой стороны, авторы работы [4] на основании анализа собственных расчетов делают вывод о «сохранении вечной мерзлоты даже при негативном сценарии потепления климата».

Таким образом, актуальной представляется задача выявления причин потери устойчивости эксплуатируемых зданий, возведенных по первому принципу на свайных фундаментах.

Основной целью настоящей работы являлась расчетная оценка температурного режима грунта под подошвой свай с учетом основных требований строительных правил и результатов последних исследований. Расчет производился в специализированном мультифизическом программном комплексе численным методом.

На рисунке представлены температуры на десятый год эксплуатации по свае и «свободному» грунту вдали от свайного поля. Хорошо видно, наличие сваи в грунте снижает его температуру. Это, в том числе, обусловлено более высокой теплопроводностью железобетона.

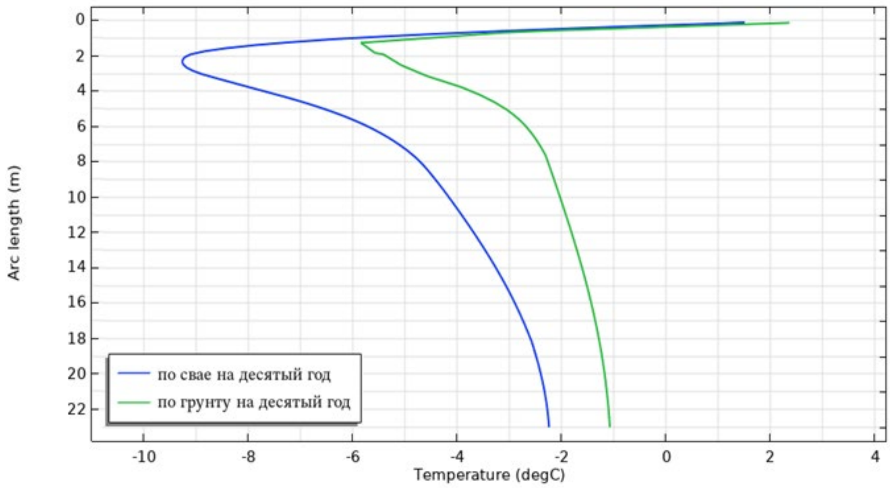


Рис. 1. Распределение температур по глубине

Основные выводы:

1. Устройство конструкции свайного фундамента, при принятых к расчету характеристиках грунта и граничных условий, способствует снижению температуры грунтового основания под подошвой свай относительно «свободного» грунта почти на 1,5°С, а на глубине 23 м – на 1,1°С. Растепления многолетнемерзлых грунтов, вызываемого фундаментом здания, расчетом не установлено.

2. Основным фактором, влияющим на изменение температурного поля под подошвой свайного фундамента, является коэффициент конвективной теплоотдачи от окружающего воздуха к поверхности строительных конструкций, грунта и температуры в подвальном помещении, которые могут регулироваться реализацией строительно-технических мероприятий и правилами эксплуатации подвальных помещений.

3. Потеря устойчивости зданий может быть обусловлена в основном субъективными причинами, связанными с деятельностью людей: изменение окружающего ландшафта, связанного со строительством новых зданий; отсутствием аварийных стоков систем водоснабжения и водоотведения в повальных помещениях; уменьшению проветриваемости последних и др.

4. Для гарантированного обеспечения несущей способности свай рекомендуется снижение температуры в подпольном пространстве среднемесячных положительных температур наружного воздуха.

Список литературы

1. НИУ Росгидромета «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год», 2022.

2. Никифорова, Н., Коннов, А. Прогноз деформаций основания и снижения несущей способности свайных фундаментов в криолитзоне // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 18(1), pp. 141–150, 2022 .

3. РОСГИДРОМЕТ «Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации», 2017 (стр. 45).

4. 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. Vol. 8, No. 10. Pp. 51–65.

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

М. И. Низовцев*, А. Н. Стерлягов*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
* *nizovtsev@itp.nsc.ru*

В докладе будут представлены результаты численных расчетов совместного применения фазоизменяемых материалов с разными температурами фазовых переходов для повышения теплоинерционности стен из легких теплоизоляционных материалов и снижения перегрева внутренних помещений в летний период при циклических суточных колебаниях температуры наружного воздуха.

В различных технических приложениях, связанных с тепловыми процессами, возникают задачи аккумулирования тепловой энергии и последующего ее выделения, снижения перегрева оборудования, уменьшения амплитуды температурных колебаний. При решении этих задач в настоящее время активно начинают применяться фазоизменяемые материалы. Под фазоизменяемыми материалами понимают материалы, в которых в результате тепловых процессов происходят обратимые фазовые переходы с поглощением или выделением тепловой энергии.

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) за счет высоких значений теплоты фазовых переходов от 90 до 330 кДж/кг находят широкое применение в различных технических приложениях. Широкое применение получили ФИМ в строительной отрасли [1]. Используют добавки ФИМ в цемент при производстве бетона для повышения его теплоинерционных свойств в определенном температурном диапазоне. Фирма «BASF» освоила выпуск панели «Micronal PCM Smartboard», в состав которой входит парафин с температурой плавления 23°C [2]. По теплоинерционным свойствам такая панель эквивалентна теплоинерционности 9 см бетона или 12 см кирпичной кладки. ФИМ используют в виде добавок в легкие теплоизоляционные материалы для повышения теплоинерционных свойств стеновых конструкций [3,4].

Нестационарные тепловые процессы в различных средах могут происходить в широком температурном диапазоне, поэтому перспективным может оказаться предложение об использовании совместно нескольких фазоизменяемых материалов с различными температурами фазовых переходов. Цель данной работы – на примере использования ФИМ в конструкции стены здания из легкого теплоизоляционного материала для снижения перегрева внутренних помещений показать эффективность совместного применения фазоизменяемых материалов с разными температурами фазовых переходов.

Рассматривалась наружная стена здания из вспененного полиуретана (ВПУ) толщиной 100 мм. В летний теплый период времени стена здания находилась под воздействием периодически изменяющейся в течение суток ($\tau_{сут}$) наружной температуры воздуха $T_н(°C) = 25+10\sin(2\pi t/\tau_{сут})$, а помещение с внутренней стороны стены – в режиме кондиционирования с постоянной температурой воздуха равной 21°C.

Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения «COMSOL Multiphysics» методом конечных разностей. Рассматриваемая стена здания плоская, изменение температуры происходит в одном направлении, поэтому рассматривалась одномерная задача.

Согласно результатам расчетов, температура наружной поверхности изменялась в течение суток от 15 до 35°C, при этом плотность теплового потока на наружной поверхности стены периодически изменялась от -3,5 до +7,5 Вт/м^2. За положительное направление теплового потока было выбрано его направление в сторону помещения. Проходя через слой ВПУ интенсивность тепловых колебаний снижалась, и амплитуда изменения температуры на внутренней поверхности составила 0,5°С, при этом максимум плотности теплового потока на внутренней поверхности стены изменялся от 3 Вт/м^2 в дневное время до -1 Вт/м^2 в ночное время

В докладе рассматривается использование ФИМ для снижения колебаний температуры и теплового потока на внутренней поверхности стены, что позволяет снизить энергозатраты на кондиционирование воздуха в помещении. В качестве ФИМ используем парафин, при этом в расчетах варьировалась средняя температура фазового перехода T_m и диапазон изменения температуры фазового перехода ΔT_m. В расчетах для упрощения принимали теплофизические параметры ФИМ в твердом и жидком состоянии одинаковыми. Слой фазоизменяемого материала толщиной 4 мм устанавливался в различных сечениях ВПУ и по результатам расчетов определялось изменение температуры и теплового потока на внутренней поверхности наружной стены.

На рис.1 показаны результаты расчета при разделении ФИМ на две равные части, при этом одна часть располагалась на внутренней поверхности, и для нее температура фазового перехода была равна температуре внутреннего воздуха, а вторая размещалась в средней области ВПУ, и для нее средняя температура фазового перехода принималась средней между средними температурами воздуха наружного и внутреннего, T_m=23°С. Из результатов расчетов следует, что такое расположение ФИМ и выбор соответствующих температур фазовых переходов привел к падению в 2 раза амплитуды колебаний температуры на внутренней поверхности, по сравнению с расположением всего ФИМ на внутренней поверхности, и соответственно к двукратному снижению максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности.

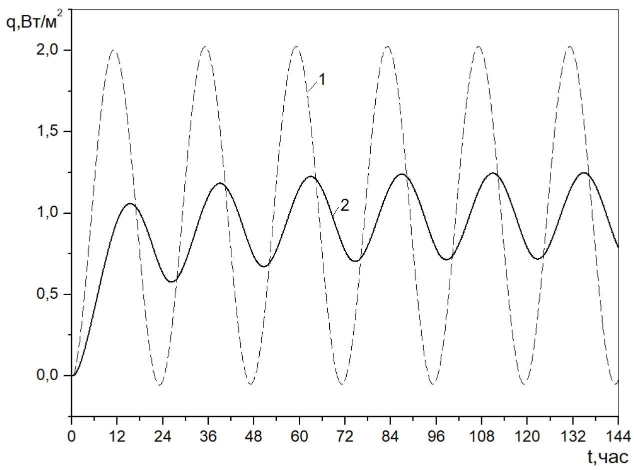


Рис.1. Изменение плотности теплового потока на внутренней поверхности: 1 – 4мм ФИМ на внутренней поверхности, 2 – по 2 мм ФИМ на внутренней поверхности и в центре

Работа выполнена при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. F. Souayfane, F. Fardoun, P.H. Biwole. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review// Energy Build., vol. 129, pp. 396–431, 2016.

2. Kant Karunesh, Shukla A., Sharma Atul, Biwole Pascal Henry. Heat transfer study of phase change materials with graphene nanoparticle for thermal energy storage// Solar Energy, vol. 146, pp. 453–463, 2017
3. V.Yu. Borodulin, M.I. Nizovtsev Heat-inertial properties of walls of lightweight thermal insulation with phase change materials// Journal of Physics: Conference, Series Ser. 1105 012108, 2018.
4. A. Anand, A. Shukla, A. Sharma. Recapitulation on latent heat hybrid buildings// International Journal of Energy Research, vol. 44, pp. 1370–1407, 2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ВОЗДУШНЫХ ПОЛОСТЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Е. В. Панкратов[*], А. Д. Воеводин, С. С. Петухов[*]

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
163002, Архангельск, набережная Северной Двины, 17
[*] *e.pankratov@narfu.ru*

Проведено экспериментальное и численное исследование влияния формы воздушных полостей на эффективность тепловой изоляции на основе пенополистирола. При проведении физического эксперимента был использован метод плоской пластины. Для численного моделирования использовалась программа ANSYS Fluent 15.0. Показан эффект влияния естественной конвекции в воздушных полостях, который стоит учитывать при рассмотрении термического сопротивления строительных конструкций.

Повышение энергоэффективности строений напрямую зависит от совершенства используемых теплоизоляционных материалов. Одним из способов повышения термического сопротивления является применения замкнутых воздушных полостей в ограждающих конструкциях. Например, в работе [1] исследовали многослойную систему изоляционных панелей с теплоотражающими поверхностями, установленными на каркасе для формирования воздушных зазоров. Помимо этого теплообмен через полые строительные блоки был численно исследован в работе [2]. Однако, недостаточно исследовано применение воздушных полостей в тепловой изоляции, что обуславливает актуальность данной работы. Исследуемая геометрия тепловой изоляции на основе пенополистирола с воздушными полостями, схематично представлена на рис. 1.

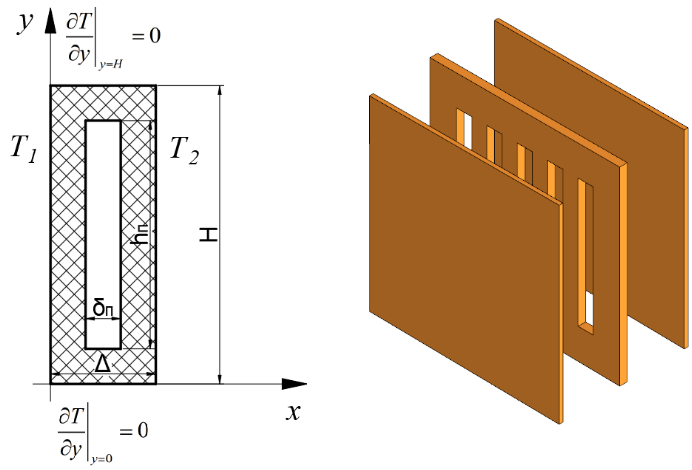


Рис. 1. Схема исследуемой геометрии

Тепло переносится от нагретой поверхности T_1 = 293,15 К при x = 0 к холодной поверхности T_2 = 233.15 К при $x = \Delta$ через твёрдое тело посредством теплопроводности и естественной конвекцией в воздушной полости.

В экспериментальном исследовании использовался метод плоской пластины. Испытуемый образец помещался между нагревателем и радиатором с воздушным охлаждением. Тепловой поток через испытуемый образец обеспечивался плоским электрическим нагревателем квадратной формы и измерялся двумя калиброванными датчиками теплового потока. Разница температур на образце измерялась с помощью специального датчика, состоящего из набора термопар.

В качестве программного обеспечения для численного моделирования был выбран ANSYS Fluent. Модель описывает процесс теплопередачи в сложной геометрии с помощью двумерных уравнений теплопроводности с граничными условиями первого порядка.

Для анализа термической эффективности строительных конструкций удобно использовать эквивалентное термическое сопротивление, которое описывает комбинированные эффекты конвекции и теплопроводности через твердотельный каркас и воздушные полости. Эквивалентное термическое сопротивление сложной геометрии пустотелых строительных конструкций может быть рассчитано с использованием закона Фурье как

$$R_{экв} = \frac{T_1 - T_2}{q}. \tag{1}$$

По итогам численного моделирования для конструкции с одним рядом воздушных полостей были получены эквивалентные значения плотности теплового потока, коэффициентов теплопроводности и термического сопротивления. На рис. 2 показано распределение изотерм для одного ряда воздушных полостей при различной геометрии.

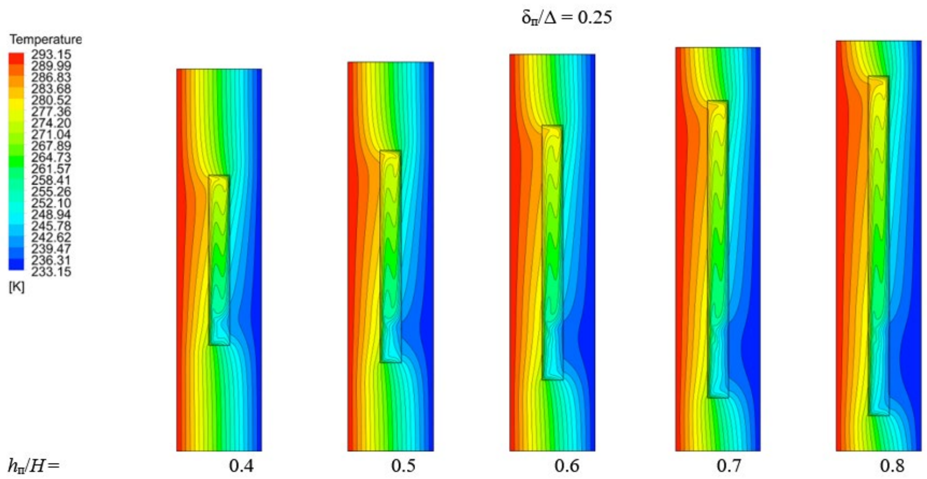


Рис. 2. Изотермы для одного ряда воздушных полостей

Анализируя рис. 2, следует отметить, что при $\delta_п/\Delta = 0.25$ в воздушных полостях хорошо проиллюстрирован эффект естественной конвекции, который нельзя игнорировать при рассмотрении термического сопротивления пустотелых строительных конструкций. Для конструкции с одним рядом воздушных полостей были получены значения термического сопротивления, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета для ребра с одним рядом воздушных полостей

№ п/п	$\delta_п/\Delta$	$h_п/H$	$R_{экв}$
1		0.4	0.4586
2		0.5	0.4873
3	0.25	0.6	0.5196
4		0.7	0.5556
5		0.8	0.5978

Как видно из полученных данных термическое сопротивление стенки может быть улучшено путем использования полостей, заполненных воздухом. Дальнейшее развитие тематики направлено на создание новых композитных материалов с разной конфигурацией воздушных полостей и вакуумированных утеплительных плит.

Исследование поддержано грантом министерства экономического развития, промышленности и науки Архангельской области.

Список литературы

1. Bruno R., Bevilacqua P., Ferraro V., Arcuri N. Reflective thermal insulation in non-ventilated air-gaps: experimental and theoretical evaluations on the global heat transfer coefficient // Energy and Buildings. 2021. Vol. 236 P. 110769. Doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110769.

2. Sun J., Fang L. Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume meth-od // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52, N 23. P. 5598–5607. Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.008.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

П. В. Петров[1*], В. А. Кулагин[1],
А. П. Стариков[2], Е. М. Резанов[2*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Омский государственный университет путей сообщения
644046, Российская Федерация, Омск, пр. Карла Маркса, 35
[*] ppv55@mail.ru

В докладе освещается актуальное исследование, обусловленное тем, что в настоящее время современные нормы сбережения тепловой энергии и теплозащиты зданий ориентированы на применение весьма ограниченного набора решений по снижению энергетического потребления, не всегда отвечающих конкретным условиям строительства и зачастую весьма дорогостоящих. В связи с этим предложена методика исследования эффективного утепления ограждающих конструкций стен зданий, учитывающая взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей.

Целью является определение оптимального значения толщины утепления теплоизоляционным материалом объекта с учетом отпускаемой ему тепловой энергии. Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Для подключения систем вентиляции и отопления в проекте предусмотрен блочный ИТП с теплообменником (заводского изготовления). ИТП состоит из блока ввода ТС, блока отопления и вентиляции, блока ГВС.

Параметры теплоносителя (вода):

– на входе в теплообменник: Т1=130°С, Т2=70°С, Р1=4,8 кгс/см^2, Р2=2,4 кгс/см^2;

– на выходе из теплообменника в систему вентиляции Т1=130°С, Т2=70°С; в систему отопления Т1=85°С, Т2=70°С; в систему ГВС: Т3=65°С, Т4=5°С.

Система отопления помещений принята двухтрубная, тупиковая.

Наружные стены по проекту: наружные стены выше отметки 0.000 – кирпичная кладка из полнотелого кирпича, толщиной 510 мм с коэффициентом теплопроводности 0,7 Вт/(м·°С), также с вентилируемым фасадом и утеплением минераловатными плитами Технониколь ТЕХНОВЕНТ СТАНДАРТ толщиной 120 мм. с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С);ветрозащитная мембрана – 0,0015 м, 0,4 Вт/(м·°С).

Численные исследования влияния изменения толщины теплоизоляционных сэндвич-панелей из минеральных плит на основе базальтового волокна с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С) и стоимостью 5090 р./м^3, на технико-экономическую эффективность, показали: уменьшение затрат Ист при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии с оптимальной толщиной 0,036 м (рис. 1).

Результаты численного исследования (рис. 1) подтверждают рациональность применения технико-экономической оптимизации утепления стен здания: получен минимум приведенных затрат при снижении расхода тепловых потерь через ограждающие конструкции, потребления тепловой и электрической энергии на систему «отопление, вентиляция». Рекомендации были приняты в проектируемом объекте исследования: «Поликлиника ГБ №3 по адресу: Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Мухачева, 5/1».

Результаты расчетов (рис. 1) показывают, что наиболее эффективный процесс регулирования отпускаемой тепловой энергии – «количественное регулирование» (дает экономию по расходу электрической энергии на привод насосного оборудования), для исследуемого объекта.

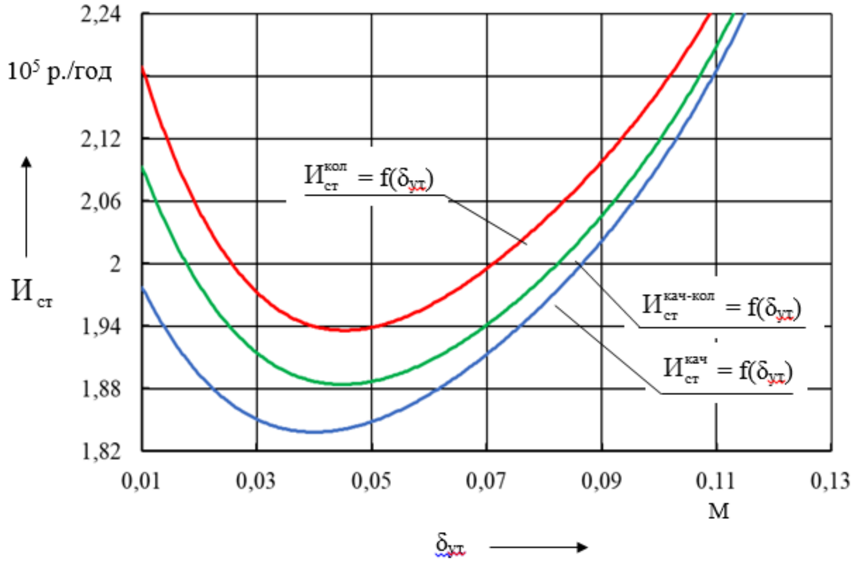


Рис.1. Зависимости $И_{ст}^{кач}$, $И_{ст}^{кач-кол}$ и $И_{ст}^{кол}$ от δут: $И_{ст}^{кач}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год; $И_{ст}^{кач-кол}$ – затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен здания при качественно-количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год; $И_{ст}^{кол}$– затраты по утеплению наружных ограждающих конструкций стен при количественном регулировании отпускаемой тепловой энергии, р./год

Если принять эффективную величину утепления тепловой изоляции 0,13 м, что на 0,01 м больше чем уже установленная (0,12 м), то разность в 10 мм снизила бы тепловые потери через ограждающие конструкции здания, расход электрической энергии , в среднем на 2-5 %.

Проведя анализ данных эксперимента и расчета, можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели и алгоритма «определение оптимальной толщины утепления тепловой изоляцией ограждающих конструкций стен здания».

Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии и направлены на повышение класса энергоэффективности зданий.

Список литературы

1. Резанов Е. М., Петров П. В. и др. Методика эффективного расчета утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта // Омский научный вестник. Омский гос. техн. ун-т. 2016. № 6(150). С. 109-113.

2. Шахин В. П. Энергоэффективность и энергосбережение в России: состояние, проблемы, пути решения // Энергонадзор и энергоэффективность. 2003. №10. С. 7-13.

3. Фролова А. А. Выбор теплозащиты офисных зданий с учетом энергетических и экономических показателей систем климатизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03. М., 2017. 147 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ НАРУШЕНИЯХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Т. А. Рафальская[1,2⁑], В. Я. Рудяк[1,2], Е. Е. Литвинова[3*]

[1]Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
630008, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[3]Структурное подразделение Новосибирского государственного университета – Специализированный учебно-научный центр Университета
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, 11/1
⁑ rafalskaya.ta@yandex.ru

Проведено исследование режимов работы теплового пункта при теплоснабжении в аварийных условиях работы тепловой сети. Рассмотрены факторы, влияющие на тепловой режим зданий с наружными ограждениями различной конструкции. Разработан метод расчета скорости охлаждения внутренней поверхности наружного ограждения и температуры на этой поверхности в заданный момент времени. Получены расчетные зависимости для определения допустимой продолжительности работы системы теплоснабжения при сниженных параметрах теплоносителя.

Крупные аварии на источнике теплоты или в тепловой сети обычно приводят к отключению теплоснабжения. Известные методы расчета снижения внутренней температуры помещений [1, 2 и др.] разрабатывались для случаев полного отключения системы теплоснабжения при аварии.

При авариях на отдельных блоках ТЭЦ или участках тепловых сетей обычно не отключают теплоснабжение, но снижают температуру воды в тепловой сети. Количество тепла, поступающее в систему отопления, в этом случае будет меньше, чем требуется для компенсации тепловых потерь помещений. Кроме того, работа теплообменников системы горячего водоснабжения (СГВ) будет оказывать влияние на работу системы отопления. Актуальность настоящего исследования заключается в определении допустимой продолжительности работы системы теплоснабжения со сниженными параметрами, т.е. времени снижения температуры внутреннего воздуха помещений до точки росы, что требует изучения возможностей теплозащиты строительных конструкций.

Такой расчет можно выполнить при использовании предложенного авторами метода моделирования [3]. Однако этот метод является трудоемким, расчет по нему выполняется в компьютерных программах. Задачей настоящей работы является анализ результатов моделирования и получение зависимости, позволяющей напрямую проводить оценочные инженерные расчеты снижения температуры внутреннего воздуха помещений.

На темп снижения внутренней температуры при снижении тепловой нагрузки основное влияние оказывают: соотношение расчетных тепловых нагрузок на горячее водоснабжение и отопление, тепловая аккумуляция наружных ограждений и температура наружного воздуха.

От соотношения тепловых нагрузок на горячее водоснабжение и отопление $\psi = Q_h/Q_{omax}$ зависит количества теплоты, которое дополнительно можно направить в систему отопления при отключении второй ступени теплообменника горячего водоснабжения. Таким образом, чем больше соотношение ψ, тем больше резерв тепловой мощности системы отопления.

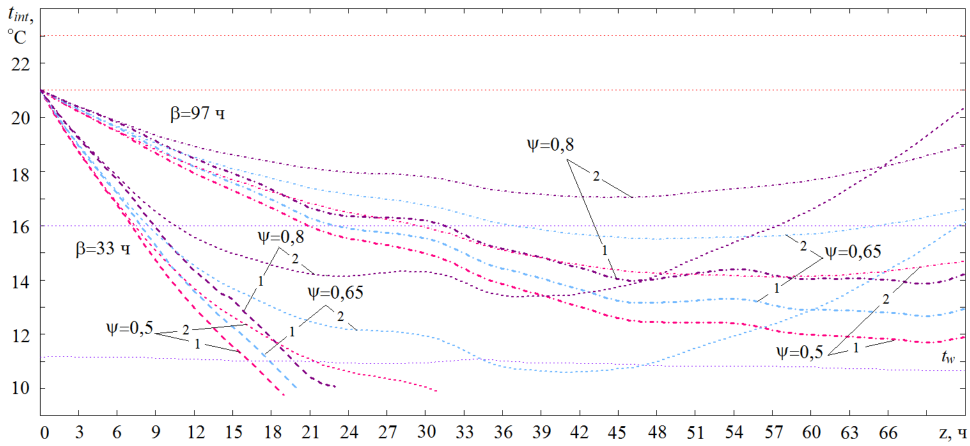
Тепловая аккумуляция здания – свойство накапливать теплоту, характеризуется коэффициентом тепловой аккумуляции β, зависящим от теплотехнических свойств всех наружных ограждений и инфильтрации наружного воздуха.

Результаты моделирования показали, что при различных наружных температурах t_{ext} влияние соотношения тепловых потоков ψ и тепловой аккумуляции зданий β на снижение температуры внутреннего воздуха t_{int} будет различно.

При относительно высоких наружных температурах t_{ext} снижение внутренней температуры t_{int} определяется, в основном, соотношением тепловых потоков ψ.

При среднезимних наружных температурах t_{ext} снижение внутренней температуры t_{int} будет зависеть как от соотношения тепловых потоков ψ, так и от коэффициента тепловой аккумуляции зданий β. Например, на рис. 1 видно, что для зданий, имеющих низкие значения $\beta = 33$ ч отключение II ступени подогревателя СГВ будет эффективно при больших соотношениях ψ, хотя будут наблюдаться большие температурные колебания. В то же время отключение II ступени подогревателя СГВ при $\psi = 0{,}5$ и $\beta = 33$ ч не окажет заметного воздействия на температуру внутреннего воздуха.

При низких температурах наружного воздуха t_{ext}, близких к расчетной температуре $t_{ext.o}$, снижение температуры внутреннего воздуха t_{int} будет определяться только коэффициентом тепловой аккумуляции β. В то же время показано, что при достижении температуры точки росы внутреннего воздуха t_w наружные ограждения утрачивают способность аккумулировать теплоту. Эти особенности необходимо учитывать при расчете допустимого времени остывания помещений при аварии.



1 – при работающей II ступени подогревателя СГВ; 2 – при отключении II ступени подогревателя СГВ
Рис. 1. Температура внутреннего воздуха помещений для зданий с различной тепловой аккумуляцией

При обработке результатов моделирования было получено соотношение (1), позволяющее напрямую провести расчет времени z снижения температуры внутреннего воздуха до заданной температуры t_{int}^{ass} с учетом коэффициента тепловой аккумуляции и соотношения тепловых потоков:

$$z = -\beta ln\left[1 - \frac{t_{int}^{req} - t_{int}^{ass}}{t_{int}^{req} - t_{ext}} \cdot \frac{1}{1{,}28 - 0{,}16\psi - 0{,}008 t_{upper}^{cut} + 0{,}014(t_{ext.o} - t_{ext})}\right], \quad (1)$$

где t_{int}^{req} – требуемая температура внутреннего воздуха; t_{upper}^{cut} – температура воды в подающей магистрали теплосети при расчетной температуре наружного воздуха $t_{ext.o}$.

Список литературы

1. Малявина Е.Г., Цыганков А.В. Влияние различных факторов на темп остывания помещения после отключения теплоснабжения // Известия вузов. Строительство. 2015. № 1. С. 53–59.

2. Самарин О.Д. О расчёте охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия вузов. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50.

3. Rafalskaya T.A., Rudyak V.Ya. Modeling of characteristics of heat exchangers of heat supply systems in variable operating modes // J. of Phys.: Conference Series, vol. 1565, 0120052020, 2020.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В НЕОТАПЛИВАЕМОМ ТЕХПОДПОЛЬЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ «ТЕПЛЫЙ ПОЛ»

А. Н. Стерлягов[⁑], **М. И. Низовцев**[*]

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[⁑] *sterlyagov@itp.nsc.ru*

Представлена методика для определения температуры воздуха в неотапливаемом техподполье при эксплуатации системы «теплый пол». Получено аналитическое выражение для определения плотности теплового потока, поступающего от теплого пола в техподполье. Методика основывается на сравнении потока тепла, поступающего в техподполье от теплого пола, и потерь тепла через стены и пол техподполья, и определении температуры воздуха техподполья, при которой наблюдается их тепловой баланс.

В последнее время большую популярность приобрели системы отопления «теплый пол» [1]. В качестве преимуществ по сравнению с традиционными системами отопления можно отметить более равномерное распределение температуры воздуха в помещении и меньшее энергопотребление [2]. На практике наиболее часто встречаются ситуации, когда системой «теплого пола» оборудуется 1 этаж жилых зданий [3]. В этом случае для зданий с неотапливаемым техподпольем возникают вопросы определения целесообразной толщины утеплителя перекрытия в целях энергосбережения [4]. Кроме того, в связи с поступлением тепла от системы «теплого пола» в техподполье повышается температура воздуха и ограждающих конструкций фундаментов и возникают вопросы, связанные с их теплообменом с грунтом [5]. Таким образом, вопрос определения температуры воздуха в техподполье являются актуальной и комплексной теплофизической задачей.

Методика определения температуры воздуха в техподполье основывается на балансе тепла, поступающего от теплого пола, и потерь тепла через стены и пол техподполья. Суть методики заключается в том, что для различных значений температуры воздуха в техподполье рассчитываются мощности потока тепла, поступающего в техподполье от теплого пола, и мощности потерь тепла через стены и пол техподполья.

Согласно данной методике на первом этапе определяют потери тепла через стены и пол техподполья при различных температурах воздуха в техподполье на основании теплотехнических расчетов, например, с использованием программного комплекса Therm [6]. В расчетах граничные условия определяют с учетом строительных требований и теплотехнических характеристик материалов ограждающих конструкций техподполья, а температуры наружного воздуха и грунта принимаются на основании справочных данных для рассматриваемых климатических условий.

На следующем этапе рассчитывается мощность потока тепла, поступающего в техподполье от теплого пола первого этажа при различных значениях температуры воздуха в техподполье. Для определения плотности теплового потока, поступающего от теплого пола в техподполье, используется расчетная схема, представленная на рис.1.

Рис. 1. Расчетная схема перекрытия над техподпольем с системой теплого пола

В соответствии с представленной расчётной схемой рассмотрена система уравнений:

$$q = q_1 + q_2, \tag{1}$$

$$q_1 = \alpha\left(t_{в1} - t_1\right), \tag{2}$$

$$q_2 = \alpha\left(t_2 - t_{в1}\right), \tag{3}$$

$$q_1 = \frac{\left(t - t_1\right)}{R_1}, \tag{4}$$

$$q_2 = \frac{\left(t - t_2\right)}{R_2}, \tag{5}$$

где q – общая плотность теплового потока от теплого пола, q_1 – плотность теплового потока от поверхности пола в помещения комнат 1-го этажа или плотность теплового потока через слой материалов перекрытия выше плоскости тепловыделений, q_2 – плотность теплового потока от нижней поверхности перекрытия в помещения техподполья или плотность теплового потока через слой материалов перекрытия ниже плоскости тепловыделений, α – коэффициент теплоотдачи поверхности перекрытия, t – температура в плоскости системы теплого пола – плоскости тепловыделения, t_1 – температура верхней поверхности перекрытия, t_2 – температура нижней поверхности перекрытия над техподпольем, $t_{в1}$ – температура воздуха в помещении комнат 1-го этажа, $t_{в2}$ – температура воздуха в помещении техподполья, R_1–термическое сопротивление слоя материалов перекрытия выше плоскости тепловыделений, R_2 – термическое сопротивление слоя перекрытия ниже плоскости тепловыделений.

В результате последовательного выделения и подстановки переменных из системы уравнений получено выражение для определения плотности теплового потока q_2:

$$q_2 = \frac{\left[q\left(R_1 - \frac{1}{\alpha}\right) + t_{в1} - t_{в2}\right]}{R_1 + R_2} \tag{6}$$

С использованием данного аналитического выражения рассчитывают несколько вариантов мощности потока тепла, поступающего в техподполье от теплого пола первого этажа, при различных значениях температуры воздуха в техподполье.

На заключительном этапе, сравнивая разные мощности потока тепла, поступающего в техподполье от теплого пола первого этажа, и различные мощности потерь тепла через стены и пол техподполья, определяется температура воздуха в техподполье, при которой наблюдается их тепловой баланс.

Список литературы

1. Olesen B. W. Теория и практика напольного лучистого отопления // АВОК. 2003. № 1. С. 44–52,
2. Bearzi V. Теплые полы. Теория и практика // АВОК. 2005. №7. С. 70–82.
3. НП «АВОК» 4.4-2013 Рекомендации «АВОК». Системы водяного напольного отопления и охлаждения жилых, общественных и производственных зданий. М.: ООО ИИП «АВОК-ПРЕСС», 2013.
4. Писарев Е. Теплый пол. Водяной или электрический. М.: Издательство Самиздат, 2012.
5. Bojić M. et al. Performances of low temperature radiant heating systems // Energy and buildings. 2013. V. 61. P. 233-238.
6. Blanusa P. et al. Comparison between ASHRAE and ISO thermal transmittance calculation methods // Energy and buildings. 2007. V. 39, №. 3. P. 374-384.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КЕРАМИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Г. Н. Харук, С. И. Непомнящих[*]*

Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 82
[*] *swetmush@mail.ru*

Возрастающий спрос на различные строительные материалы и изделия влечет за собой необходимость развития рациональной технологии получения строительной керамики из низкокачественного техногенного и природного сырья. В работе исследовались особенности физико-механических свойств строительной керамики, обусловленные формированием ее структуры при обжиге в зависимости от содержания в керамической массе отходов обогащения цветных металлов и плавня. Полуколичественное содержание минералов определялось по изменению линий их интенсивностей на рентгенограммах. Определена возможность использования таких отходов и плавня для формирования структурных новообразований и повышения прочности строительной керамики.

Значительное внимание исследователей привлечено к изучению различных возможностей использования техногенных отходов и вторичного сырья для производства строительных материалов и, в частности, к разработке составов керамических масс и всестороннему изучению процессов обжига керамических изделий [1-3]. Керамика является очень перспективным современным материалом, имеет исключительно многообразные физические и химические свойства по сравнению с другими типами материалов. Свойства керамик зависят как от химического, минералогического состава сырья, так и от режима термообработки, поскольку при этом может формироваться разный фазовый состав.

В исследованиях использовались легкоплавкая глина Первомайского месторождения (в составах 1, 2), тугоплавкая глина Компановского месторождения (в составах 3, 4), белый КЕК, образующийся в результате обезвоживания маточных растворов аффинажного производства ОАО «Красцветмет» (г. Красноярск), и натрий–силикатное стекло. Глину после сушки размалывали до остатка на сите 0,05 мм не более 5% и смешивали с КЕКом и натрий-силикатным стеклом в нужной пропорции. Образцы формовались при давлении 20 МПа, после сушки они обжигались при температурах от 700 °С до 1150 °С (составы 1, 2) и от 750 °С – 1200 °С (составы 3, 4) с интервалом 50 °С и выдержкой при конечной температуре 20 мин. Составы 1 и 3 – глина 85%, КЕК 10%, стекло 5%; составы 2 и 4 – глина 75%, КЕК 20%, стекло 5%.У обожженных образцов исследовались физико-химические свойства. Фазовый состав и полуколичественное содержание минералов определялись на основании рентгеноструктурного анализа.

Известно [4], что в керамических массах при обжиге происходят сложные процессы, связанные не только с выходом свободной и химически связанной воды, выгоранием органических остатков, выделением оксидов железа и CO_2, полиморфными превращениями минералов, но и с образованием новых кристаллов. С 800 °С в керамической массе идет образование стеклофазы, в которой зарождаются в основном кристаллы анортита и волластонита, а в температурном интервале 950-1050 °С начинают зарождаться кристаллы муллита. Жидкая фаза, даже в небольшом количестве, играет очень важную роль в повышении спекания черепка, как бы «склеивая» минеральные частицы керамической массы в единое целое. Анортит, волластонит и муллит имеют пластинчатые, длинностолбчатые и игольчатые кристаллы и вместе с нерастворившимися кристаллами ангидрита и кварца придают прочность керамическим изделиям.

Анализируя кривые поведения минералов при обжиге, а также данные изменения усадки, водопоглощения и прочности образцов в зависимости от температуры обжига (табл. 1), можно сказать, что увеличение количественного содержания КЕКа в керамических массах с легкоплавкой и с тугоплавкой глинами приводит к смещению температуры максимума интенсивности спекания и начала жидкофазового спекания в область более низких температур. В составе 2 происходят более интенсивные формирование анортита, структурные изменения кварца, распад кристаллических решеток, составляющих массу минералов, и плавление альбита. Однако состав 1 показывает более высокие прочностные характеристики и меньшее водопоглощение. Прочность обожженных при 1100 °С образцов состава 1 больше в 2 раза по сравнению с составом 2 и составляет около 30 мПа. При температуре 1150 °С образцы уже оплавились, поэтому прочность для состава 1 еще больше. Прочность на сжатие у образцов с тугоплавкой глиной, обожженных при 1150–1200 °С, достигает 30–60 МПа. Однако прочность обожженных при 1200 °С образцов больше для состава 3 с меньшим содержанием КЕКа.

Причиной более низких прочностных показателей образцов составов с большим содержанием КЕКа может быть нехватка жидкой фазы (добавление одинакового количества стекла в разные составы не оптимально). Эта гипотеза может быть подтверждена также по поведению водопоглощения (табл. 1) и по кривым поведения минералов при обжиге.

Таблица 1

Физико-химические свойства образцов

Температура, °С	Огневая усадка, %				Водопоглощение, %				Прочность на сжатие, МПа			
	Составы				Составы				Составы			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
700	0,35	0,00	–	–	17,09	20,67	–	–	18,26	12,14	–	–
750	–0,35	0,18	0,00	–0,32	17,01	21,15	18,62	22,51	22,39	14,28	26,51	15,52
800	–0,52	–0,16	0,49	0,30	16,99	21,73	18,51	22,87	20,83	11,89	25,53	18,40
850	0,84	0,96	0,50	0,48	16,54	21,77	18,20	21,87	17,99	12,20	24,20	15,73
900	–0,01	0,80	1,00	1,12	15,91	20,96	15,91	19,79	17,92	12,39	23,30	13,56
950	0,85	0,64	0,83	1,29	15,80	21,24	15,59	19,32	18,82	10,88	20,76	11,32
1000	0,52	0,80	1,33	1,29	15,70	20,95	15,70	18,42	20,23	11,89	16,24	12,52
1050	0,99	0,48	1,15	1,28	17,59	21,39	14,48	19,58	22,23	12,42	19,84	12,74
1100	1,60	0,32	0,67	0,79	13,63	19,65	14,30	19,14	27,72	13,57	21,18	15,01
1150	7,23	7,97	2,47	2,90	2,16	0,51	11,31	13,56	89,87	23,67	25,03	29,05
1200	–	–	4,55	1,93	–	–	1,02	0,49	–	–	61,13	40,10

Проведенные исследования показали, что введение добавок КЕКа и стекла в составы на основе глин вполне оправданно и приводит к увеличению образующейся жидкой фазы, что предопределяет формирование и рост новообразований (анортита, волластонита и муллита), армирующих структуру керамического черепка и увеличивающих его прочность. Однако оптимальные составы керамических масс (соотношения глины, отходов цветных металлов и стекла) нужно подбирать особенно тщательно. Использование вторичного сырья экономически целесообразно как с точки зрения снижения энергозатрат на производство керамики, так и с позиции экологии окружающей среды.

Список литературы

1. Макаров Д.В., Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Кумарова В. А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254–281.

2. Гурьева В.А.,Прокофьева В.В. Структурно-фазовые особенности строительной керамики на основе техногенного магнезиального сырья и низкосортных глин // Строительные материалы. 2014. №4. С.55-57.

3. Зубехин А.П., Яценко Н.Д. Теоретические основы инновационных технологий строительной керамики // Строительные материалы. 2014. № 1-2. С. 88-92.

4. Горшков В.С., Савельев В.Г., Федоров Н.Ф. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.

ВЗАИМОСВЯЗАННЫЙ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В НАРУЖНОЙ СТЕНЕ ИЗ ГАЗОБЕТОНА СО СЛОЯМИ ШТУКАТУРНОГО РАСТВОРА НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТЯХ

Н. А. Цветков⁑, А. В. Толстых, Д. Н. Цветков, Ю. Н. Дорошенко*

Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, Российская Федерация, Томск, Соляная пл., 2
⁑ tolstbu@yandex.ru

Представлены результаты численного моделирования нестационарных процессов тепловлагопереноса в плоской однородной стене из газобетона D400 с различными вариантами наружного и внутреннего оштукатуривания для климатических условий г. Томска. В результате проведения расчетов установлено, что внутренний штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации стены, не оказывает существенного влияния на тепловлажностный режим ограждающей конструкции, а наружный штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации, может привести к существенному накоплению влаги.

Увеличение потребления энергии и других материальных ресурсов, а также растущие экологические требования к возведению и эксплуатации зданий делают актуальными исследования тепловлажностного режима эксплуатации ограждающих конструкций, выполненных из материалов с хорошими конструкционными характеристиками и высокими теплозащитными свойствами, к которым можно отнести и газобетон.

Пористая структура газобетона является причиной того, что увлажнение может привести к существенному изменению его теплозащитных свойств. Результаты экспериментов, выполненных авторами [1], показали, что избыточное увлажнение газобетона при сверхсорбционной влажности дает значительное увеличение коэффициента теплопроводности. Полное аналитическое описание процессов совместного тепловлагопереноса в пористых материалах достаточно сложно, а соответствующие упрощенные расчетные методы не учитывают многие факторы, оказывающие влияние на процессы. Расчетное определение тепловлажностных режимов эксплуатируемых ограждающих конструкций следует выполнять с использованием эффективных физико-математических моделей [2–3], учитывающих взаимодействие механизмов паропроводности и влагопроводности и основанных на известных экспериментальных данных.

Значительный интерес представляет выяснение влияния штукатурных слоев на тепловлажностный режим ограждающих конструкций из газобетона, например, в [4] выполнено моделирование влагопереноса с использованием стационарной и нестационарной постановок для фасадных систем с наружными штукатурными слоями.

Моделирование процесса тепловлагопереноса проводилось на основе одномерной нестационарной постановки задачи [3]. В качестве материала исследований использовался автоклавный газобетона марки D400. Коэффициент теплопроводности газобетона принимался зависящим как от влагосодержания, так и от температуры.

Наличие штукатурки на внутренней и наружной поверхности в уравнении влагопроводности моделировалось увеличением коэффициента сопротивления паропроницанию на внутренней $R_{пв}' = R_{пв} + \delta_ш/\mu_ш$ и наружной $R_{пн}' = R_{пн} + \delta_ш/\mu_ш$ поверхностях. Здесь $\delta_ш$ – толщина штукатурного слоя, $\mu_ш$ = 0,12 мг/(мчПа) – коэффициент паропроницаемости штукатурки.

В уравнении теплопереноса тонкий слой штукатурки не учитывался.

Принялы следующие обозначения вариантов по наличию штукатурки:

00 – нет штукатурки ни с внутренней и ни с наружной поверхности;

10 – штукатурка толщиной 5 мм только с внутренней поверхности с начала эксплуатации ограждения: $R_{пв}' = 0{,}069$ м^{2}чПа/мг, $R_{пн}' = R_{пн} = 0{,}013$ м^{2}чПа/мг;

11 – штукатурка толщиной 5 мм с внутренней и толщиной 10 мм с наружной поверхности с начала эксплуатации ограждения: $R_{пв}' = 0{,}069$ м^{2}чПа/мг, $R_{пн}' = 0{,}096$ м^{2}чПа/мг;

101 – штукатурка толщиной 5 мм с внутренней поверхности с начала эксплуатации и толщиной 10 мм с наружной поверхности, но нанесенной через 11 месяцев после начала эксплуатации в июне следующего года: $R_{пв}' = 0{,}069$ м^{2}чПа/мг, $R_{пн}' = 0{,}013$ м^{2}чПа/мг, через 11 месяцев $R_{пн}' = 0{,}096$ м^{2}чПа/мг;

102 – штукатурка толщиной 5 мм с внутренней поверхности с начала эксплуатации и толщиной 30 мм с наружной поверхности, но нанесенной через 11 месяцев после начала эксплуатации в июне следующего года: $R_{пв}' = 0{,}069$ м^{2}чПа/мг, $R_{пн}' = 0{,}013$ м^{2}чПа/мг, через 11 месяцев $R_{пн}' = 0{,}263$ м^{2}чПа/мг;

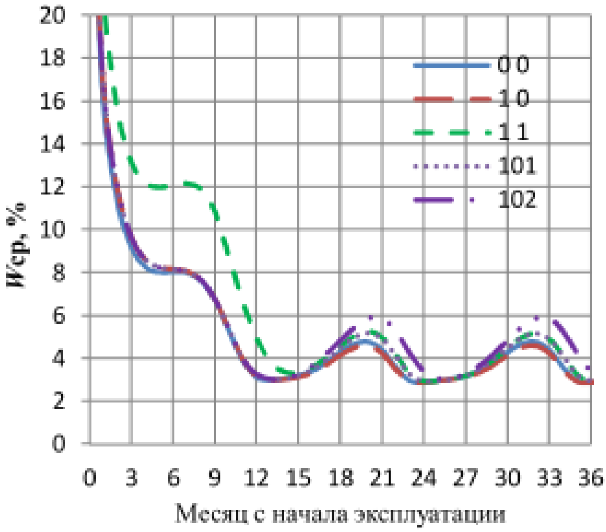


Рис. 1. Средняя влажность стены (месяц с начала эксплуатации)

На рис. 1 приведены зависимости осредненной по толщине ограждения влажности $W_{ср}$. Видно, что в период удаления строительной влаги (около 12–13 месяцев), влагосодержание стены, оштукатуренной снаружи и изнутри с начала эксплуатации ограждения, существенно превышает аналогичные величины для всех остальных рассмотренных вариантов. В то время как наиболее толстый наружный штукатурный слой, нанесенный через 11 месяцев после начала эксплуатации, приводит лишь к незначительному повышению влагосодержания (около 1%) в наиболее неблагоприятные месяцы (в марте).

Таким образом, внутренний штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации стены из газобетона, не оказывает существенного влияния на тепловлажностный режим ограждающей конструкции, а наружный штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации может привести к ненормативному накоплению влаги. В связи с вышесказанным наружное оштукатуривание стен целесообразно выполнять через 11 месяцев после начала эксплуатации в июне следующего года.

Список литературы

1. Низовцев М.И., Терехов В.И, Яковлев В.В. Теплопроводность газобетона повышенной влажности // Известия вузов. Строительство. 2004. №9. С. 36–38.

2. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. Т.14, №4(127). С. 484–495.

3. Жуков А.В., Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В. Влияние температурной зависимости изотермы сорбции и коэффициента влагопроводности на влагоперенос в стене из газобетона // Вестник МГСУ. 2018. Т.13, №6(117). С. 729739.

4. Зубарев К.П., Гвоздков А.Н. Математическое моделирование тепловлажностного режима систем фасадных теплоизоляционных композиционных с наружными штукатурными слоями в стационарной и нестационарной постановках // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы XIX Международной научной конференции. Волгоград: Изд-во: Волгоградский государственный медицинский университет, 2021. С. 19–25.

ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. Чесноков[*][*]

АО «Институт стекла»
111024, Российская Федерация, Москва, ул. Душинская, 7
[*] *s.chesnokov@glassinfo.ru*

Современное остекление зданий и сооружений способно обеспечивать теплозащиту на уровне ограждающих конструкций из других строительных материалов без ущерба основной функции светопрозрачной конструкции. Однако не все возможности, предоставляемые современными видами стекла отечественного производства, в полной мере используются в строительных проектах.

В последние десятилетия роль остекления в здании существенно расширилась. Сейчас мы включаем в это понятие такие задачи, как:

– формирование архитектурного облика зданий,
– защита помещений от внешних воздействий,
– регулирование поступления солнечной энергии,
– обеспечение оптического контакта с окружающей средой,
– тепловой комфорт в помещении,
– преобразование энергии,
– и многое другое.

Отечественная стекольная промышленность обладает большим потенциалом технологического суверенитета, отечественные предприятия производят современные виды стекла и изделий из него всех основных классов: листовое стекло, стекло с низкоэмиссионными и солнцезащитными покрытиями, закаленное, многослойное стекло и т.д. Одновременно с этим, мы видим значительный потенциал развития в области применения новых подходов к остеклению зданий.

Роль остекления в энергетическом балансе здания:

– повышение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;
– использование электрообогреваемого остекления для исключения обледенения и конденсации влаги;
– производство энергии фотоэлектрическими модулями, которые могут устанавливаться вместо непрозрачного остекления или в тех зонах, где ранее применялось солнцезащитное остекление.

Нами ведутся разработки новых независимых технологий производства твердых пиролитических покрытий для стекла, которые найдут свое применение при производстве низкоэмиссионных и электрообогреваемых стёкол, а также стёкол с просветляющими, самоочищающимися и рассеивающими покрытиями для солнечной энергетики.

Проведены работы по оценке экономической эффективности применения солнечных систем в России, которые показывают высокий потенциал решений солнечной энергетики в строительстве. Учитывая, что стоимость фотоэлектрических модулей снижается, а стоимость ряда классических строительных материалов растёт, складывается ситуация, когда решения с использованием фотовольтаики оказываются не дороже «классических» [1, 2].

Рис. 1. Стеклопакеты с солнечной батареей вместо стемалита
(непрозрачного эмалированного стекла)

Рис. 2. Самоочищающееся стекло справа

В 2021 г. вступила в действие новая редакция свода правил СП 426.1325800.2020 «Конструкции, ограждающие светопрозрачные зданий и сооружений. Правила проектирования», разработанная при участии специалистов отдела стандартизации и испытаний АО «Институт стекла». Разработанная редакция позволила при проектировании:

– обеспечивать выполнение всех ролей остекления в здании,
– учитывать современные тенденции применения стекла в строительстве,
– учитывать основные области применения стекла в строительстве,
– позволять решать основные проблемы применения стекла в строительстве в России,
– позволять использовать все современные возможности стекол и изделий из них,
– учитывать возможности применения всех современных видов стекол,
– обеспечивать выполнение требований технических регламентов и сводов правил при применении остекления.

Список литературы

1. Chesnokov A. G., Chesnokov S. A., Chmykhova N. A., Sharonova A. A. IGU and solar panel application optimization with numerical model for the various Russian regions. "Glass Performance Days. Conference Proceedings 17 to 21 June 2011", Tampere, Finland, p. 403-405.

2. Chesnokov A. G., Chesnokov S. A., Sharonova A. A. Model for the economic effects of modern glazing and solar panels in Russian conditions. “Engineered transparency.

International Conference at glasstec, Düsseldorf, Germany 29 and 30 September 2010. Proceedings".
3. СП 426.1325800.2020 Конструкции, ограждающие светопрозрачные зданий и сооружений. Правила проектирования.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗДАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ЗОН

П. Д. Шульженко[1‡], А. А. Дектерев[1, 2], В. Д. Мешкова[1], К. Н. Мешков[1*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[‡] Shulzhenko.polina@yandex.ru

Цель исследования – изучение влияния геометрических размеров здания на формирование ветровых зон в результате их обтекания. Исследование выполнялось с помощью методов численного моделирования гидродинамики. Рассматривалось три варианта постановки задач с различной вариацией геометрических размеров тандема задний. Результатом исследования стала выявленная закономерность влияния геометрических размеров и форм зданий на формирование потока, его скорость и направление вихревых образований между зданиями.

Урбанизация – процесс, который в современном обществе не только не замедляется, но и увеличивает свои темпы. По данным ООН, к 2050 г. численность населения, проживающего в городах, достигнет 68 % от общего числа населения Земли [1]. Переселение людей из малых населенных пунктов является причиной роста городского пространства, вследствие чего города приобретают статусы крупных и сверхкрупных. Здание, как элементарная единица городского образования, является наиболее влиятельным элементом при изменении ландшафта застраиваемой территории. Изменение ландшафта приводит к изменению движения потоков воздушных масс в пределах городского пространства, что может являться причиной как изменения экологической ситуации, так и смены средней скорости потока.

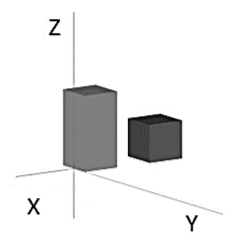
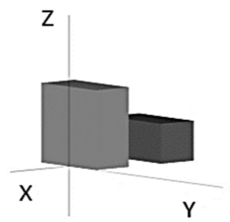
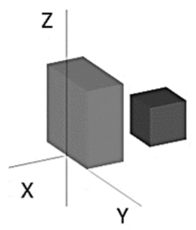
Воздушные массы в пределах города постоянно сталкиваются со зданиями, образуя при их обтекании различные ветровые зоны. Как правило, за зданием формируется аэродинамическая тень, а при обтекании граней и кровли в результате срыва вихрей и поджатия потока происходит формирование локальных зон ускорения. Зона аэродинамической тени является наиболее интересной для исследования, так как характеризуется наличием в ней устойчивых вихрей, которые увлекают и удерживают в себе газы и пыль [2]. Стоит отметить, что площадь аэродинамической тени будет изменяться в зависимости от геометрической формы здания и его высоты. Особый интерес также вызывает взаимовлияние зданий на изменение структуры потока. В связи с этим цель научного исследования заключалась в изучении формирования ветровых зон в результате обтекания потоком воздуха тандема зданий разной геометрической формы.

В исследовании рассматривались три варианта постановки задач (табл.1).

Численное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса SigmaFlow [3]. Исследование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики. В расчете использовалась микромасштабная численная модель атмосферы городской среды, основанная на нестационарных осреднениях по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью, которая включает в себя уравнения неразрывности, движения и сохранения энергии. В качестве базовой модели турбулентности используется двухпараметрическая модель k-ω SST [4]. Скорость набегающего потока была равна 5. Число Рейнольдса равно $3{,}3\times10^4$.

Таблица 1

Варианты расчетных моделей

1 Вариант	2 Вариант	3 Вариант
		
Высотное здание: 2H×L×B Малоэтажное: H×L×B	Высотное здание: 2H×2L×B Малоэтажное: H×2L×B	Высотное здание: 2H×2L×B Малоэтажное: H×L×B
Примечание: H(высота)=L(длина)=B(ширина) = 50 мм; h (расстояние между объектами) = 50 мм.		

В ходе исследования были получены картины течения ветрового потока в разных сечениях. Определены области формирования характерных ветровых зон и численные значения скоростей ветра в них.

Была выявлена закономерность образования вихрей в зоне между моделями, зависящая от длины исследуемых объектов (рис.1). Стоит отметить, что длина здания определяет структуру формируемых вихрей между ними. Между моделями образуется зона рециркуляции с пониженными скоростями ветра, что является частью аэродинамической тени.

За моделями 1-го варианта образуются два вихря без четкой структуры и положения, скорость потока варьируется от 0,7 до 2 м/с. При обтекании воздуха 2-го варианта моделей, образуются две строгие вихревые структуры; скорости варьируется от 0 до 1 м/с. Для 3-го варианта, где малоэтажное здание меньшей длины, чем первое, из-за чего при формировании двух вихревых структур, происходит взаимодействием с малым зданием. Скорости для этого варианта варьируются от 0,5 до 1 м/с.

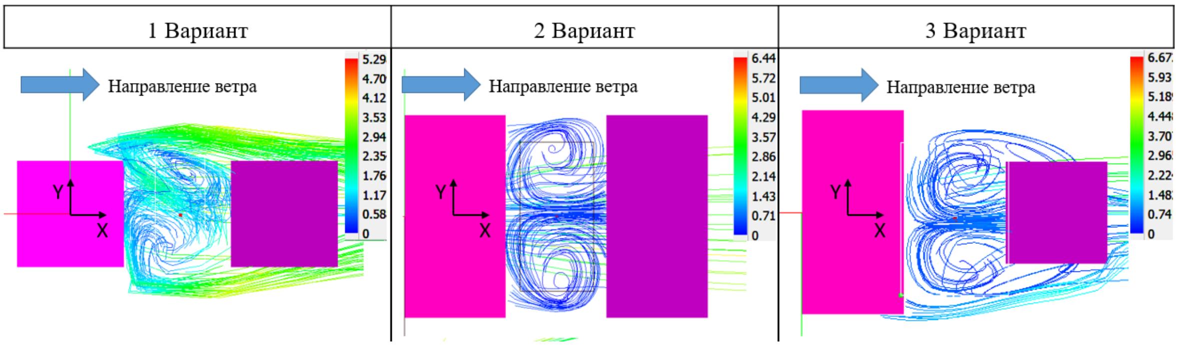


Рис.1. Образовавшиеся вихревые структуры между зданиями, отрисовка треками

Полученные результаты показали, что длина исследуемого объекта влияет на форму и расположение рециркуляционных вихрей между моделями, а также на скорость ветрового потока после обтекания здания. Было выявлено, что при увеличении ширины первого здания по потоку формируются более строгие вихревые структуры. Также можно заметить, что при отличной длине второго здания, по сравнению с первым, вихревая структура теряет четкость и начинает взаимодействовать с потоком, который обтекает здания по краям.

Список литературы

1. World urban population // Statistics times. URL: https://statisticstimes.com/index.php

2. Лейкин И. Н. Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий (проектирование и расчет) // Химия. 1962. С. 17.

3. Filimonov S. A., Meshkova V. D., Dekterev A. A. and et al. Analysis of vortex structures formed in the winter in the atmos-phere of Krasnoyarsk city // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1. P. 1–8.

4. MenterF. R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. N 93-2906. P. 21.

Секция 3
«Методы управления теплообменом»

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ УПРАВЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИЕЙ УДАРНОГО ФРОНТА

А. Л. Адрианов[1, 2*]

[1]Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
660037, Российская Федерация, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
aadrianov@sfu-kras.ru, adrian58al@gmail.com

На примере скачка уплотнения рассматривается один из способов снижения интенсивности ударного образования за счёт комбинированного действия нескольких физических факторов.

Ударные газодинамические процессы [1–8] нашли широкое применение в ракетно-космической технике при конструировании и оптимизации устройств, энергетических установок, в современных технологиях и даже медицине. Само «ударное образование» (тонкий ударный слой) при его корректной идеализации (выделении или схематизации ударной волны (УВ), скачка уплотнения (СУ)) можно считать разрывным. Это сделало возможным применение аналитического аппарата для связи газодинамических параметров по обе стороны такого «разрыва», а также их производных при наличии соответствующей гладкости в малой окрестности его фронта [8–11]. К сожалению, на сегодняшний момент полностью аналитический подход для расчёта реального ударного процесса в целом оказался неконкурентоспособным из-за сопутствующих данному подходу многочисленных допущений, не позволяющих в конечном итоге обеспечить необходимую точность. Вместе с тем аналитические методы имеют некоторые неоспоримые преимущества, например: 1) не требуются сложные машинные вычисления; 2) имеется возможность свободно варьировать параметрами задачи, входящими в аналитическое решение; 3) отсутствует действие каких-либо вторичных аппроксимативных или процедурных (например, ограничителей/лимитеров) вычислительных факторов, присущих современным численным методам, предназначенным для расчёта ударных течений. Определённый компромисс при математическом моделировании могут представлять собой численно-аналитические методы и, в частности, *дискретно-аналитический подход* (ДАП) [8–13], лишённый отмеченных паразитных эффектов/дефектов, что оказалось особенно важным при расчёте ударных течений вязкого теплопроводного газа. Следует отметить ещё одно преимущество ДАП. Решая конкретную начально-краевую задачу в прямой постановке с помощью той или иной апробированной численной методики, мы, к сожалению, не в состоянии увидеть сразу (требуется новый расчёт), как повлияет, например, изменение параметров и (или) их производных за фронтом УВ (СУ) на дальнейшую эволюцию фронта. Однако не менее важным и часто не замечаемым в ходе исследования недостатком такой постановки может являться весьма ограниченный и скованный реальной геометрией того или иного изделия набор всевозможных краевых условий или *краевых эффектов* (КЭ) за СУ. КЭ имеет смысл локального источникового члена в каждой расчетной точке задней поверхности СУ. КЭ может совпадать или не совпадать с реальным краевым условием того же порядка, например, когда СУ оказывается присоединенным к границе области [10].

В применяемом в настоящем исследовании ДАП сохраняются достоинства численных и аналитических методов. Вначале с помощью той или иной численной (например, разностной) методики рассчитывается гладкое газодинамическое образование – сдвиговый слой (*слой*). Далее «активный» (куда будут погружаться возможные ударные решения) участок – фрагмент этого *слоя* табулируется с помощью кусочно-кубических сплайнов, так что в любой точке этого фрагмента оказываются доступными необходимые в последующем расчёте любая газодинамическая функция, её 1-я и 2-я частные производные. Вторые производные необходимы исключительно при учёте внешних (по обе стороны разрыва) *фактора вязкости* и *механизма теплопроводности* (фактора ВТ; [9–13]), присутствующих в *уравнениях Навье – Стокса вязкого теплопроводного газа*, для последующего расчета, вторгающегося в *слой* СУ.

Основной целью исследования, представленного в настоящем докладе, было выявление частных случаев одновременного действия трёх основных физических (!) факторов: 1) *неравномерность* невозмущенного течения перед СУ; 2) *краевой эффект* за ним, формируемый догоняющими возмущениями; 3) фактор ВТ, влияющих на механизм деградации ударного фронта в сдвиговом слое. Из физического и вычислительного (детально в [10]) экспериментов известно, что действие только фактора ВТ в гладком сдвиговом течении не приводит к значительному ослаблению ударного образования: например, СУ легко «пробивает» пограничный слой, практически не теряя своей интенсивности.

В ходе проведенного исследования/моделирования управляемая с помощью КЭ динамика проходящего в *слой* фронта СУ представлялась в трёх различных пространствах: физическом (евклидовом), на плоскости *ударно-волновых поляр* (*поляроиде* [12]), а также на *разрывном многообразии* типа «шайба Гровера», отвечающем за множество *краевых эффектов* [9, 10, 13].

Список литературы

1. Гриффитс У. Ударные волны // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы / под ред. Дж. Бэтчелора и Г. Моффата. М.: Мир, 1984. 501 с.

2. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковые течения и ударные волны. М.: Изд-во ин. лит., 1950. 426 с.

3. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1959. 220 с.

4. Бай Ши-и. Введение в теорию течения сжимаемой жидкости. М.: Изд-во ин. лит., 1962. 411 с.

5. Хейз У. Д. Основы теории газодинамических разрывов // Основы газовой динамики / под ред. Г. Эммонса. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 702 с.

6. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.

7. Усков В. Н., Чернышов М. В. Экстремальные ударно-волновые системы в задачах внешней аэродинамики // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 15–31.

8. Адрианов А. Л., Старых А. Л., Усков В. Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск: Наука, 1995. 180 с.

9. Адрианов А. Л. О допустимых границах в задании краевого эффекта за скачком уплотнения // Вестник Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2012. Вып. 5(45). С. 6–12.

10. Адрианов А. Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 216 с.

11. Адрианов А. Л. Лагранжев подход для расчёта эволюции ударного фронта в неоднородном потоке идеального и вязкого теплопроводного газа // Супервычисления

и математическое моделирование: труды XVII Международной конференции / под ред. Р. М. Шагалиева. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. С. 24–31.

12. 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.

13. Adrianov A L. Influence of the boundary effect, viscosity factor and heat conductivity mechanism on the shock front evolution // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1230 (2022) 012001 IOP Publishing. Doi: 10.1088/1757-899X/1230/1/012001.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ И ЛОКАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНОЙ

Б. В. Борисов, А. В. Вяткин, Г. В. Кузнецов,
В. И. Максимов*, Т. А. Нагорнова, Ф. Ю. Салихов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
*elf@tpu.ru

Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса в объеме помещения с работающей системой вентиляции и газовым инфракрасным излучателем светлого типа. Представлены температурные поля и векторы скорости движения воздушных масс в помещении с оборудованием и фигурой работающего, находящихся в зоне влияния излучателя. Проанализировано влияние расположения в локальной рабочей зоне макета оборудования и фигуры человека на температурный режим и структуру течения воздуха в помещении.

Проведено математическое моделирование процессов пространственного теплопереноса в производственном помещении с локальной рабочей зоной при наличии оборудования (горизонтальная панель) и фигуры работающего в ней при совместной работе газового инфракрасного излучателя (ГИИ) светлого типа и системы воздухообмена (рис. 1).

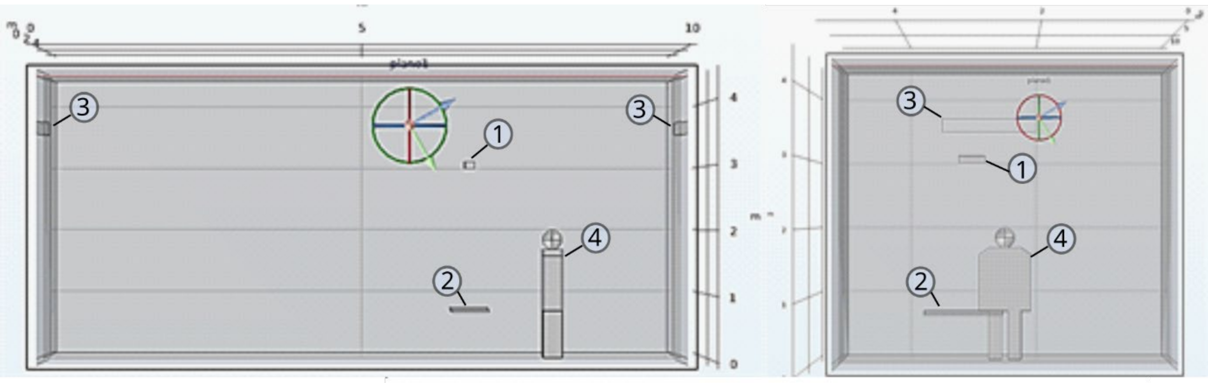


Рис. 1. Схема области 3D-моделирования: 1 – ГИИ; 2 – горизонтальная панель; 3 – каналы системы воздухообмена; 4 – фигура работающего

Постановка задачи для несжимаемого прозрачного для теплового излучения воздуха, изменяющего свою плотность только при изменении температуры согласно гипотезе Буссинеска, аналогично [1]. Наличие системы воздухообмена и заданное геометрическое расположение областей входа и выхода воздуха обусловлены, во-первых, необходимостью отвода продуктов сгорания от ГИИ светлого типа, а во-вторых, областью их размещения – верхняя часть помещения (выше уровня ГИИ). Температура поступающего воздуха соответствует начальной в помещении 7 °С, расход 2,2·10-4 кг/(с·м3) (однократное обновление воздуха в помещении за час).

Численное 3D-моделирование проводилось методом конечных элементов в рамках модулей «The Heat Transfer in Fluids» и «The Turbulent Flow, k-ε Interface» программной среды COMSOL Multiphysics. Параметры радиационного теплового потока определялись модулем «Surface-to-Surface Radiation» [1].

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования конвективно-кондуктивного теплопереноса в рассматриваемом помещении с работающим ГИИ и системой воздухообмена с учётом и без учёта расположения фигуры работающего в зоне влияния излучателя для момента времени τ, соответствующего одному часу физического времени.

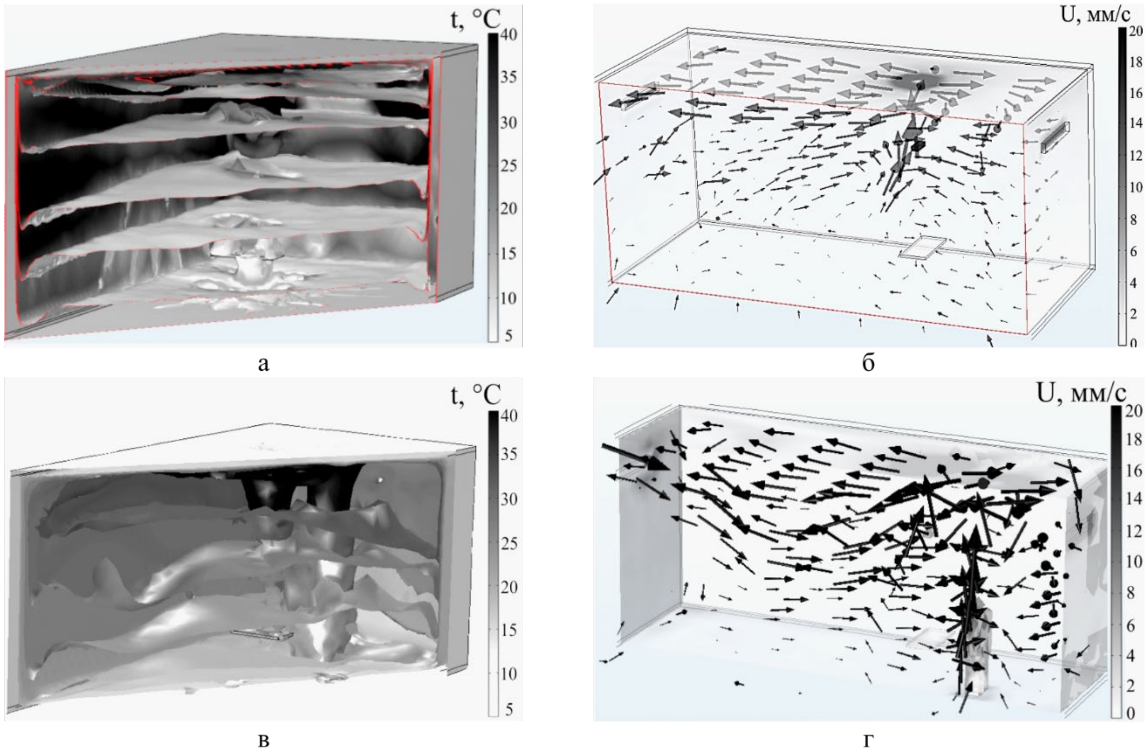


Рис. 2. Температурные поля (а, в) и векторы скорости (б, г) в помещении после одного часа работы ГИИ: без учёта (а, б) и с учётом (в, г) фигуры работающего

Вариативные расчеты проводятся с использованием исходного набора основных геометрических параметров помещения, характеристики ГИИ и вентиляции выбираются в соответствии с работами [1–3]. Сравнительный анализ показывает хорошее согласие 2D-, 3D-моделирования и результатов теплофизических экспериментов. Нагреваемый от поверхностей, расположенных в зоне влияния ГИИ, воздух формирует локальную тепловую зону (рис. 2, а, в) и затем поднимается вверх, создавая при этом циркуляционные течения в помещении (рис. 2, б, г). Наличие фигуры работающего и нагрева её поверхности приводит к неоднородному повышению температуры воздуха не только в локальной рабочей зоне, но и во всем помещении, интенсифицируя движение воздушных масс.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что присутствие работающего в области влияния ГИИ существенно изменяет температурный и скоростной режимы воздуха в локальной рабочей зоне.

Исследование поддержано РНФ № 20-19-00226.

Список литературы

1. Тепловые режимы локальных рабочих зон крупногабаритных помещений при использовании газовых инфракрасных излучателей / А. В. Вяткин, Б. В. Борисов, Г. В. Кузнецов, В. И. Максимов, Т. А. Нагорнова. Новосибирск: СО РАН, 2022. 156 с.

2. Borisov B. V., Maksimov V. I., Nagornova T. A., Vyatkin A. V. Experimental determination of the air exchange system influence on the thermal conditions of a local working area heated by a gas infrared heater // J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 2211, article ID 012022, 2022.
3. Borisov B. V., Vyatkin A. V., Kuznetsov G. V., Maksimov V. I., Nagornova T. A. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions // Energies. Vol. 15, article ID 8749, 2022.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е. Н. Васильев[*]

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
[*]ven@icm.krasn.ru

Проведены расчеты и анализ энергетических характеристик системы охлаждения с учетом термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты, параметров теплонагруженного элемента электроники, рабочих характеристик термоэлектрического модуля. Определена эффективность термоэлектрической системы охлаждения при различных значениях термических сопротивлений, перепада температур и мощности тепловыделения элемента.

Ресурс и стабильность работы теплонагруженных элементов (ТНЭ) электронных устройств существенно зависит от их температурного режима. Известно, что рост температуры от 20 °C до 60 °C приводит к увеличению интенсивности отказов аппаратуры более чем в два раза [1]. Для обеспечения оптимальных тепловых режимов ТНЭ могут быть использованы термоэлектрические модули (ТЭМ) Пельтье [2, 3]. В настоящее время ТЭМ применяют для охлаждения малогабаритных элементов электроники (микропроцессоры, ПЗС-линейки и ПЗС-матрицы), стабилизации температурного режима когерентных источников оптического излучения и в других приложениях. В настоящей работе исследуется влияние термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты на эффективность системы охлаждения ТНЭ.

Задачей системы охлаждения (общая схема приведена на рис. 1) является поддержание заданной температуры ТНЭ *1*, имеющего мощность тепловыделения Q. Теплота от ТНЭ передается на холодную сторону ТЭМ с помощью устройства подвода теплоты *2*, которое характеризуется термическим сопротивлением R_T. Термоэлектрический модуль *3* отводит от ТНЭ тепловую мощность Q и обеспечивает при собственном энергопотреблении W заданный перепад температуры ΔT между основанием ТНЭ и окружающей средой. Устройство отвода теплоты *4* передает теплоту $Q+W$ с горячей стороны ТЭМ в окружающую среду.

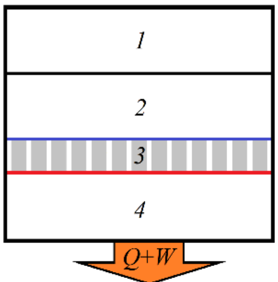


Рис. 1. Схема системы охлаждения

Расчет энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения проводился для стационарного процесса с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад с перепадами температур на ее отдельных элементах. Исходными данными для расчетов являются рабочие характеристики ТЭМ, параметры ТНЭ, термические сопротивления устройств подвода и отвода теплоты. Численное решение нелинейной алгебраической системы уравнений при заданных исходных параметрах задачи позволяет рассчитать холодопроизводительность, собственное энергопотребление ТЭМ и холодильный коэффициент системы охлаждения [4]. Расчеты проведены для серийного ТЭМ «S–199–14–11», имеющего максимальные значения холодопроизводительности 124,2 Вт и перепада температуры 72,5 K при силе тока 7,9 A и напряжении 25,3 В.

Зависимости холодопроизводительности и холодильного коэффициента от силы тока имеют максимумы, которые характеризуют потенциал применяемого ТЭМ для заданных значений температурного перепада ΔT, термических сопротивлений R_T и R_S. Линии постоянных значений максимальной холодопроизводительности для $\Delta T = -20$ °C приведены на рис. 2, на кривых указаны соответствующие им численные значения Q в ваттах. Из рисунка видно существенное влияние термических сопротивлений на максимальную холодопроизводительность системы охлаждения. Аналогичные номограммы могут быть построены для холодильного коэффициента, характеризующего эффективность процесса охлаждения. Построенные номограммы позволяют проводить анализ характеристик системы охлаждения в зависимости от исходных параметров ТНЭ, ТЭМ и устройств подвода и отвода теплоты.

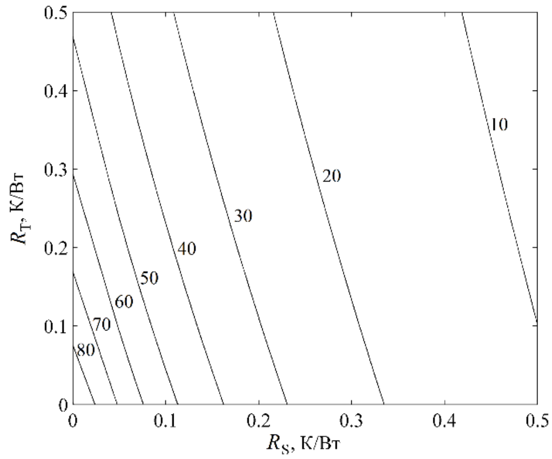


Рис. 2. Изолинии холодопроизводительности системы охлаждения

Таким образом, на основе математической модели, в которой в качестве исходных данных используются рабочие характеристики серийного ТЭМ, проведен расчет эффективности термоэлектрической системы охлаждения для различных значений термического сопротивления устройств подвода и отвода теплоты. Результаты расчетов представлены в виде изолиний холодопроизводительности и холодильного коэффициента на плоскости определяющих параметров $R_T - R_S$. Полученные номограммы позволяют на этапе разработки определять холодопроизводительность системы охлаждения и проводить оптимизацию ее конструкции с целью обеспечения максимальной эффективности процесса.

Список литературы

1. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высшая школа, 1990. 432 с.

2. Васильев Е. Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49(2). С. 133–141.

3. Васильев Е. Н. Определение режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов электроники // Микроэлектроника. 2020. Т. 49(4). С. 297–303.

4. Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения // Журнал технической физики. 2021. Т. 91(5). С. 743–747.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМАГНИЧЕННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ

Е. А. Воронина, В. В. Кузенов, С. В. Рыжков[*][*]

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
105005, Российская Федерация, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
[*]*svryzhkov@bmstu.ru*

Рассмотрены тепловые свойства сред, сжимаемых и нагреваемых высокоскоростными потоками частиц и плазменными струями, а также короткоимпульсным энергетическим лазером, в том числе широкополосным излучением (драйверами), под действием внешнего приложенного магнитного поля.

Горячая плазма является уникальным физическим объектом. Без преувеличения можно сказать, что возможности такой материи до конца еще не осознаны учеными. Энергии частиц в такой плазме могут достигать колоссальных значений – до нескольких мегаэлектронвольт, что само по себе открывает возможности для изучения структуры материи на уровне ядерных взаимодействий, квантовых эффектов при генерации электромагнитного излучения, а также ряда высокотехнологичных устройств на основе плазменно-пучковых технологий, использующих мощные потоки частиц и излучений высоких энергий для задач материаловедения, ядерной энергетики и специальных приложений. Так сложилось, что основной интерес к горячей плазме связан с потенциальной возможностью осуществления управляемых термоядерных реакций для получения энергии с положительным выходом, т. е. реализации условий, при которых выделяемая в результате синтеза энергия многократно превышает энергию, вложенную в создание и поддержание плазменного образования. Однако технологическое решение этой многообещающей задачи затянулось более чем на полвека.

Не будем останавливаться на историческом экскурсе в термоядерные исследования, отметим лишь, что практическое применение термоядерной энергетики в том виде, как оно виделось в течение всего этого длительного периода, все еще находится в начальной стадии. Обратим внимание, что на фоне этой грандиозной задачи многие уникальные возможности горячей плазмы остались как бы в тени. Ставка делалась на поиск условий достаточно длительного удержания горячей плазмы и ее нагрев до достаточно высоких (термоядерных) температур, т. е. на поддержание определенного теплового равновесия. С другой стороны, энергетически более выгодно вложить энергию не в тепловое распределение всех частиц плазмы, а в сравнительно малочисленную группу частиц, имеющих максимально возможные при выбранном способе нагрева энергии. Благодаря частицам высоких энергий возможна генерация нейтронного и рентгеновского излучения, могут протекать реакции ядерного синтеза, в которых рождаются частицы еще более высоких энергий (например, протоны с энергией 14 МэВ), использование которых возможно в ряде прикладных технологий для медицины, безопасности и утилизации ядерных отходов. Разумеется, что поддержание плазмы в сильно неравновесном состоянии требует очень мощного драйвера (источника энергии нагрева), поэтому не стоит рассчитывать на то, что такая плазма обеспечит выход энергии, сильно превосходящий энергию драйвера. Однако следует подчеркнуть, что конверсия энергии драйвера в энергию пучков и излучений из плазмы имеет очень высокую эффективность по сравнению, например, с классическими ускорительными системами. Также такая плазма, генерирующая нейтроны мегаэлектронвольтного диапазона, сама может являться драйвером подкритичной ядерной системы, в которой (в цепочках превращений, запускаемых этими нейтронами) нарабатывается ядерное топливо и одновременно утилизируются отходы ядерного топливного цикла. Такая симбиотическая система «синтез – деление» достигает по выходу энергии уже многократного усиления.

Разработана математическая модель исследования нестационарных процессов нагрева и сжатия вещества, находящегося во внешнем магнитном поле, несколькими лазерными и плазменными пучками. С этой целью создана группа моделей, учитывающих ключевые эффекты внутреннего термоядерного энерговыделения, кинетики продуктов синтеза и динамики замагниченной плазмы. Предложена новая модель взаимодействия в системе «замагниченная предварительно сформированная плазма – высокоскоростные плазменные струи» и «замагниченная мишень – мощный лазер». Проведен к*омплексный анализ* по удержанию плазменной конфигурации в затравочном магнитном поле после равномерного обжатия и численный анализ на базе нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели с учетом электронной теплопроводности и радиационно-конвективного. Показана возможность создания генераторов нейтронов на основе комбинированной схемы воздействия (число нейтронов на единицу длины $\approx 10^{15}$ н/см к моменту времени окончания воздействия). Дана оценка плазмодинамических параметров мишени для комбинированной схемы воздействия интенсивных потоков энергии, так называемые магнитно-инерциальные термоядерные системы [1–8].

Получены новые знания, позволяющие сегодня задуматься как о технологиях, так и об устройствах на основе пучков и излучения высоких энергий.

Исследование поддержано и результаты получены в рамках выполнения программы «Приоритет-2030» и федерального проекта Минобрнауки России «Передовые инженерные школы» (ПИШ).

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Ивановский А. В., Куликов С. М., Мамышев В. И., Певный С. Н., Рогачев В. Г. Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131–140.

2. Yager-Elorriaga D. A. et al. An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 042015

3. 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.

4. Рыжков С. В., Чирков А. Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Varaksin A. Yu., Ryzhkov S. V. Vortex Flows with Particles and Droplets (A Review) // Symmetry. 2022. V. 14. P. 2016.

10. Varaksin A. Yu., Ryzhkov S. V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles: A Review. Symmetry. 2022. V. 14. P. 2433.

11. Varaksin A. Yu., Ryzhkov S. V. Particle-Laden and Droplet-Laden Two-Phase Flows Past Bodies (a Review). Symmetry. 2023. V. 15. P. 388.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СБОРА, ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТЕНДЕ «ОДНОСТОРОННИЙ НАГРЕВ»

Д. А. Гроо*, Д. А. Тупотилов,
А. С. Демидов, А. В. Захаренков*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14, к. 1
**GrooDA@mpei.ru*

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению температурных полей рабочего участка, используемого в установке «Односторонний нагрев» кафедры ОФиЯС НИУ «МЭИ». Приведено описание экспериментального стенда «Односторонний нагрев», его основных систем, технические характеристики, конструкция рабочего участка для проведения исследований. Выполнена модернизация программной части системы сбора и обработки информации с целью актуализации параметров сбора, записи и обработки экспериментальных данных. Также была модернизирована техническая часть установки для возможности дистанционного (автоматического) управления экспериментальным стендом. Проведены эксперименты по теплообмену и гидродинамике с использованием модернизированной системы сбора и обработки информации.

В современной технике часто возникает необходимость отведения тепловых потоков с плотностью энергии до нескольких десятков мегаватт на квадратный метр (МВт/м^2). Это характерно для таких областей, как аэрокосмические и ядерные технологии, микроэлектроника, энергетика. При этом охлаждаемые объекты по своим массогабаритным параметрам могут сильно отличаться. Например, типичный тепловой поток, генерируемый электронным чипом, может достигать 10–100 Вт/см^2 [1], а при проектировании силовой электроники следующего поколения он может превышать 1000 Вт/см^2 в среднем на уровне чипа [2] и 1500–5000 Вт/см^2 в горячих точках [3].

В термоядерной энергетике, которая является на сегодняшний день одним из перспективных способов получения энергии, нерешенной проблемой остается создание систем, обеспечивающих надежное отведение тепловых потоков от таких внутрикамерных элементов, как лимитер, бланкет и дивертор. Мощность тепловой нагрузки на приёмные диверторные пластины строящегося термоядерного реактора ИТЭР может достичь 10–20 МВт/м^2 [4]. Сказанное выше стимулирует поиски новых эффективных методов охлаждения элементов, подвергающихся значительным тепловым нагрузкам.

Одним из способов охлаждения высокотемпературных элементов является использование диспергированного потока теплоносителя. В основе этого метода охлаждения лежит процесс дробления струи или пленки жидкости на большое число капель и распределение их в пространстве.

В основу стенда «Односторонний нагрев» положено моделирование условий нагрева и охлаждения теплосъёмных элементов приемников пучков энергии в инжекторах быстрых нейтральных атомов термоядерных реакторов и установок.

Стенд включает в себя следующие основные системы:

– систему нагрева рабочего участка, предназначенную для подвода энергии к мишени рабочего участка как в стационарном, так и в импульсном режимах работы;

– пневмогидравлическую систему, обеспечивающую подачу компонентов теплоносителя и их регулирование;

– систему вакуумной откачки, позволяющую проводить испытания в вакуумной камере при давлении 10^{-6} Па;

– систему измерений, сбора и обработки информации на основе модулей управления от компании National Instruments.

Рабочий участок (рис. 1) состоит из двух несущих трубок *2*, выполненных из стали 12Х18Н10Т, и медной мишени с припаянными кубиками *1* из молибдена, которые являются приемником энергии пучка электронов. Под *3* обозначены посадочные места для установки РУ в гидравлический контур.

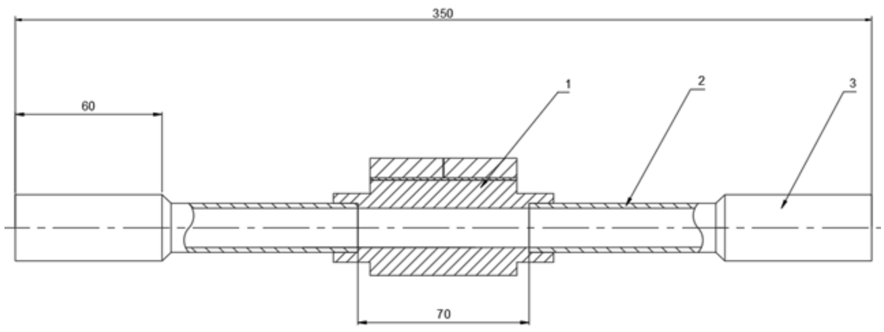


Рис. 1. Эскиз рабочего участка: *1* – молибденовые кубики, 2 – несущие трубки; *3* – посадочные места для установки в гидравлический контур

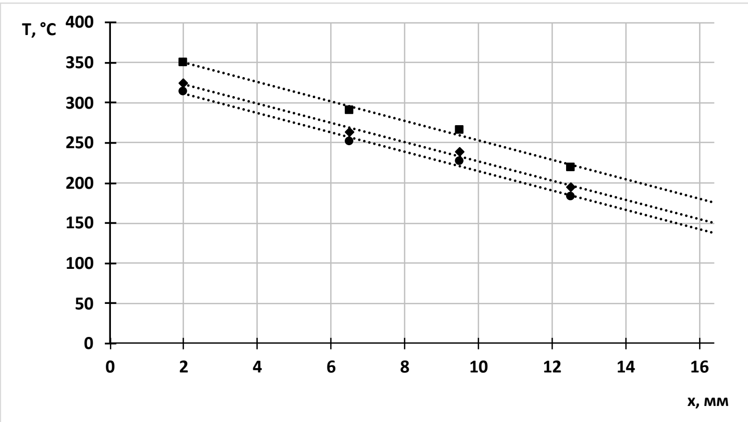


Рис. 2. Температура поверхности рабочего участка в зависимости от продольной координаты

Исследуемый макет располагается в вакуумной камере объемом 0,6 м^3. В мишени смонтированы 11 хромель-алюмелевых кабельных термопар, позволяющих фиксировать температурное поле в стенке мишени.

В результате проведения серии опытов с использованием новой системы сбора и обработки информации были получены массивы экспериментальных данных – температурные поля исследуемого образца. Типовой вид зависимости одного из температурных режимов представлен на рис. 2.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 21-79-10179).

Список литературы

1. Hsieh S. S., Luo S. Y., 2016, “Droplet Impact Dynamics and Transient HeatTransfer of a Micro Spray System for Power Electronics Devices,” Int. J. Heat Mass Transfer, 92, pp. 190–205.

2. Huddle J. J., Chow L. C., Lei S., Marcos A., Rini D. P., Lindauer S. J., Bass M., 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.

3. Toda S., 1972, “A Study of Mist Cooling: 1st Report, Experimental Investigationson Mist Cooling by Mist Flow Sprayed Vertically on Small and Flat Plates Heated at High Temperatures,” Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 38(307), pp. 581–588.

4. Raffray A., Nygren R. and el. High heat flux components – Readiness to proceedfrom near term fusion systems to power plants, Fusion Engineering and Design, vol. 85, issue 1, pp. 93–108.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА В ЦИЛИНДРЕ ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ТАРЕЛЬЧАТЫЙ КЛАПАН

Д. А. Давыдов, Д. Н. Красильников, Л. В. Плотников*, В. А. Следнёв, В. А. Шурупов[*]

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация, Екатеринбург, пр. Мира, 19

**leonplot@mail.ru*

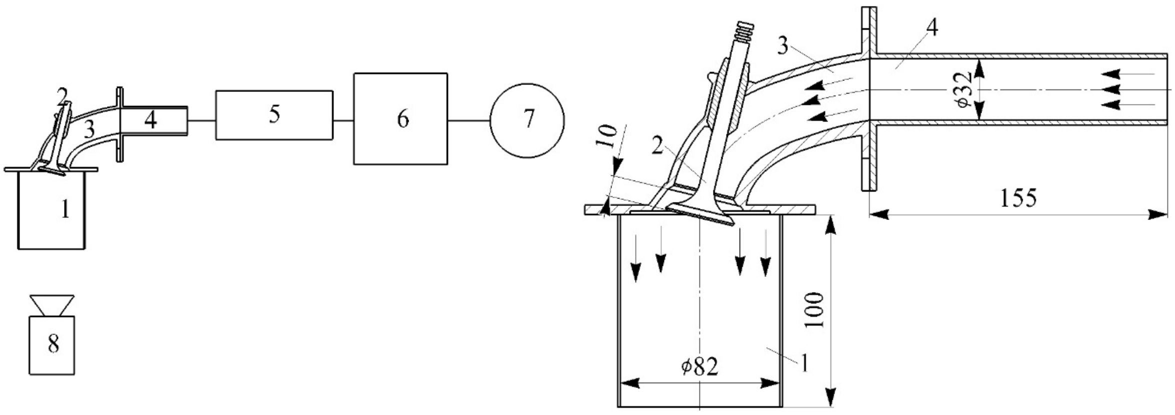
Тарельчатые клапаны широко используются в различных технических устройствах (двигатели и компрессоры, аварийные системы, каналы гидравлических аппаратов и т. д.). Поэтому экспериментальные исследования и расширение базы знаний о газодинамике потока после прохождения через тарельчатый клапан является актуальной задачей для промышленности. В данной работе в качестве объекта исследования был выбран поршневой двигатель и, соответственно, процесс впуска (т. е. процесс прохождения воздуха в цилиндр через открытый впускной клапан). Экспериментальные исследования проводились с помощью тепловизуализирующей съемки при начальных скоростях стационарного потока воздуха перед клапаном от 8 до 39 м/с. Показана эволюция газодинамической структуры в цилиндре (после клапана) с ростом начальной скорости потока.

Известно, что клапанные механизмы используются во многих технических устройствах и технологических процессах (поршневые двигатели и компрессоры, газотурбинные установки, станки, аварийные гидравлические системы и т. д.) [1, 2]. Поэтому получение новых данных о газодинамике потока после прохождения через тарельчатый клапан остается важной задачей для развития науки и промышленности. Одним из наиболее распространенных устройств, где используется тарельчатый клапан, является двигатель внутреннего сгорания. На сегодняшний день существует большое количество исследований газодинамических и теплообменных процессов внутри цилиндра двигателя [3–5]. Поэтому получение новых экспериментальных данных о структуре потока внутри цилиндра после прохождения клапанного механизма поможет лучше понять физические процессы и выработать меры по повышению эффективности поршневых двигателей.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, функциональная схема которого представлена на рис. 1, *а*. В качестве прототипа был выбран двигатель автомобиля ВАЗ-ОКА, геометрические размеры впускной системы и цилиндра которого представлены на рис. 1, *б*. Рабочей средой в исследовании являлся воздух с температурой 20–22 °С, движущийся со скорость от 8 до 39 м/с.

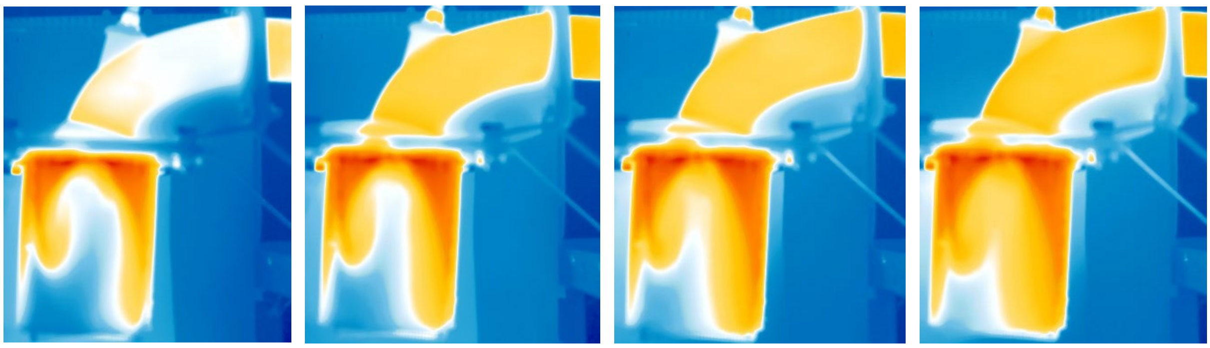
Для получения термограмм структуры потока использовался метод тепловизуализирующей съемки, который заключается в размещении в потоке специальной сетки из полимерных нитей. Он предполагает анализ полей дисперсии температуры, получаемых с помощью тепловизионной съемки [6, 7]. Тепловизуальная съемка проводилась с помощью тепловизора Testo 890-2.

На рис. 2 показана эволюция газодинамической структуры потока воздуха в цилиндре (после прохождения клапанного механизма) с ростом начальной скорости во впускной системе. Из рис. 2, *а* видно, что при низкой начальной скорости потока воздуха во впускной системе наблюдается неравномерное распределение скорости в цилиндре. Имеет место активное движение воздуха в верхних углах цилиндра и фактически застойная зона в его центре. При этом с ростом начальной скорости застойная зона фактически исчезает, структура потока в цилиндре становится более равномерной (рис. 2, *г*). Это свидетельствует о том, что базовая конфигурация впускной системы и клапанного механизма нуждается в газодинамическом совершенствовании с целью получения более равномерной структуры потока на всех режимах. Это позволит улучшить наполнение цилиндра и повысить удельные показатели поршневого двигателя.



а б

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и геометрические размеры подающей системы, клапана и цилиндра (б): 1 – цилиндр с визуализирующей сеткой; 2 – тарельчатый клапан; 3 – криволинейный канал; 4 – подающая труба; 5 – нагреватель; 6 – стабилизирующий ресивер; 7 – нагнетающий насос; 8 – тепловизор



а б в г

Рис. 2. Термограммы структуры потока в цилиндре при разных начальных скоростях потока в подающей системе: *а* – 8 м/с; *б* – 19 м/с; *в* – 28 м/с; *г* – 39 м/с

Таким образом, данное исследование показало следующее:

– начальная скорость потока воздуха во впускной системе оказывает существенное влияние на структуру потока и наполнение цилиндра двигателя;

– необходим поиск способов газодинамического совершенствования процессов во впускной системе и цилиндре поршневого двигателя.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00022.

Список литературы

1. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 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. Wang T., Li W., Jia M., Liu D., Qin W., Zhang X. Large-eddy simulation of in-cylinder flow in a DISI engine with charge motion control valve: Proper orthogonal decomposition analysis and cyclic variation // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 75. Pp. 561–574.

4. Perceau M., Guibert P., Guilain S. Flow field parametric interpolation using a proper orthogonal decomposition: Application to the variable valve timing effect on a tumble in-cylinder miller engine mean flow // Energies. 2021. Vol. 14 (17), art. no. 5324.

5. Zhao F., Z. Ruan, Z. Yue, D.L.S. Hung, S. Som, M. Xu. Time-sequenced flow field prediction in an optical spark-ignition direct-injection engine using bidirectional recurrent neural network (bi-RNN) with long short-term memory // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 173, art. no. 115253.

6. Плотников Л. В., Калинин И. А., Осипов Л. Е., Следнев В. А., Шурупов В. А. Газодинамический анализ процесса впуска с разными конструкциями канала в головке блока цилиндров в автомобильном двигателе // Транспорт Урала. 2022. № 3(74). С. 60–66.

7. Жилкин Б. П., Ларионов И. Д., Шуба А. Н. Применение тепловизора для определения температурных полей газовых потоков // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 4, С. 136–137.

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРАМИ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

С. А. Исаев [1, 2*]

[1]Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
[2] Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
196210, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
isaev3612@yandex.ru

Управление твердотельными и газожидкостными структурами позволяет по-новому подойти к формированию энергоэффективных структурированных поверхностей для разнообразных мультидисциплинарных и мультимасштабных приложений. Явление аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на пластинах и стенках каналов и труб открывает широкие перспективы создания инновационных технологий.

Интенсификация процессов теплообмена на структурированных поверхностях давно привлекает внимание исследователей и инженеров [1]. Интерес к ним усилился благодаря бурному развитию аддитивных технологий и прогрессу в материаловедении. Практически любой созданный на компьютере рельеф может быть воссоздан в твердотельной конструкции. Конечно, существуют еще проблемы разработки жаростойких материалов, но они постепенно решаются. Также совершенствуются вихревые технологии, в особенности в приложении к энергетике. Хотя широта их применения не ограничивается этой областью народного хозяйства. Интенсификация тепло- и массообменных процессов занимает в мировой теплофизике одно из значимых мест. Здесь внимание концентрируется на сравнительно недавних исследованиях [2–10] открытого явления аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках на пластинах и стенках каналов. Такие канавки, которые образуются из двух *половинок* сферических лунок, соединенных траншейной вставкой, были запатентованы. Явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена было установлено численно в однорядных наклонных канавках на нагретой стенке узкого канала для редких [2] и уплотненных [3] компоновок и подверглось систематическому анализу на стабилизированном гидродинамическом участке структурированного канала [4–6].

Ультравысокие скорости возвратного и вторичного течений, доходящие, а подчас и превосходящие максимальную скорость в плоскопараллельном канале, обуславливаются экстраординарными перепадами давления между зонами торможения струйного входящего в лунку потока на наветренной кромке и разрежения в месте генерации смерчеобразного вихря на входном сферическом сегменте. Выполненная в [*10] компьютерная* визуализация отрывного обтекания наклонной канавки демонстрирует формирование в ее входной части торнадоподобного вихря, резко понижающего статическое давление. Возникает перепад давления между зоной торможения входящего в канавку струйного потока и области разрежения в ядре торнадо. Внутри канавок образуются области аномально высоких поверхностных градиентов течения и теплообмена, в которых многократно (до 6–9 раз) увеличиваются абсолютные величины относительного трения и тепловых потоков по сравнению с параметрами на плоской стенке. Следует отметить, что над входом в наклонную канавку образуется зона высоких скоростей пристенного потока, которые в случае узкого канала с однорядными канавками превышают максимальную скорость для плоскопараллельного канала в 1,5 и более раз. Установлено, что угол наклона канавки θ по отношению к набегающему потоку играет кардинально важную роль в явлении аномальной интенсификации отрывного *течения и теплообмена* в канавках, а также ускорения пристенного потока над *структурированной стенк*ой. Диапазон углов наклона канавки θ на пластине, при которых реализуются значительные экстремальные скорости возвратного и вторичного течений, составляет от 30 до 75°. Установленные явления характерны также для начального гидродинамического участка течения около пластины и стенки канала с одно- и многорядными наклонными канавками, причем здесь наблюдается мультипликативный эффект усиления интенсивности пристенного и отрывного течений, а также теплообмена в канавке по мере ее удаления от начала структурированного участка. Для двухрядного плотного пакета из 26 наклонных канавок [7] равномерный входной профиль скорости трансформируется в конце канала (в окрестности 22-й канавки) в сдвиговый профиль *с* локальным максимумом в центре канала в случае V-образной схемы расположения канавок и приобретает два локальных максимума у стенок в случае Λ-образной схемы. Экспериментальное подтверждение установленных численно явлений получено в Институте механики МГУ и в КазНЦ РАН, где на стендах измерялись перепады статического давления в единичных канавках на пластине при варьировании угла наклона ОТЛ θ от 0 до 90° для чисел Рейнольдса набегающего потока $6{,}7\cdot10^4$ и $1{,}67\cdot10^5$, а также поля скорости ламинарного и турбулентного течений воздуха в узких *каналах с* двухрядными канавками под углами наклона ± 45° и ± 135° [7, 8].

Исследование поддержано РНФ 22-19-00056 (эксперимент), РФФИ 21-58-52013 (методическое обоснование).

Список литературы

1. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Копп И. З., Мякочин А. С. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 407 с.
2. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part. A). Pp. 202–207.
3. Isaev S. A., Gritckevich M. S., Leontiev A. I., Milman O. O., Nikushchenko D. V. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Vol. 145, no. 18737, pp. 1–13.
4. Исаев С. А., Грицкевич М. С., Леонтьев А. И., Попов И. А., Судаков А. Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 5. С. 797–800.
5. Исаев С. А., Мазо А. Б., Никущенко Д. В., Попов И. А., Судаков А. Г. Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овально-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 21. С. 18–21.
6. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Никущенко Д. В., Судаков А. Г., Усачов А. Е. Интенсификация отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Инж.-физ. журн. 2021. Т. 94, № 1. С. 160–168.
7. Isaev S. A., Guvernyuk S. V., Mikheev N. I., Popov I. A., Nikushchenko D. V. Numeri cal and experimental study of abnormal enhancement of separated turbulent flow and heat transfer in inclined oval-trench dimples on the plate and on the narrow channel wall // J. Phys.: Conf. Series. 2021. Vol. 2039, no. 012009.

8. Зубин М. А., Зубков А. Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // Механика жидкости и газа. 2022. № 1. С. 81–89.

9. Исаев С. А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и тепло обмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // Механика жидкости и газа. 2022. № 5. С. 13–24.

10. 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.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ОХЛАДИТЕЛЯ С ОСНОВНЫМ ПОТОКОМ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А. А. Колесова[1⁑], С. В. Веретенников[1], Е. Г. Колесова[2*]

[1] Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева, 152934, Российская Федерация, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

[2]ПАО «ОДК Сатурн», 152903, Российская Федерация, Рыбинск, пр. Ленина, 163

⁑kolesova599@gmail.com

В работе представлены результаты численного моделирования формирования пелены охладителя в плоском канале за отверстиями различной геометрической формы. Получено, что при параметре вдува m >1,5 пелена, формируемая отверстием цилиндрической формы, к защищаемой поверхности не прилипает. Концентрация охладителя у поверхности на расстоянии 10 калибров за веерным отверстием с длинным диффузорным участком и комбинированным отверстием при m=1 на 68 % выше, чем за веерным отверстием с коротким диффузорным участком.

Работы по исследованию и повышению эффективности пленочного охлаждения ведутся с 1960-х годов [1, 2]. На эффективность пленочного охлаждения влияют параметры течения основного и вторичного потоков (скорость, турбулентность и т. д.), а также геометрические параметры отверстия для вдува защитной пелены (форма, угол наклона к стенке и т. д.) [3]. Одним из самых простых и эффективных способов повышения эффективности пленочного охлаждения является изменение геометрической формы отверстия для вдува охладителя.

В научной литературе представлено большое количество экспериментальных и расчетных исследований эффективности отверстий различных форм. Исследовались отверстия веерные, laidback [4], щелевые, консольные [5], антивихревые [6] и многие другие. Однако в настоящий момент технологически освоено изготовление цилиндрических, веерных отверстий и отверстий типа laidback.

В данной работе выполнено численное моделирование формирования пелены охладителя за одиночным отверстием цилиндрической формы, веерной формы с коротким (1 калибр) и длинным (3 калибра) диффузорным участком, отверстием типа laidback (длина расширяющегося участка 1 калибр) и комбинированным отверстием (веерным – 2 калибра, laidback – 1 калибр), на SST модели турбулентности.

По результатам расчета при параметре вдува $m = 1$ на удалении пяти калибров от отверстий с коротким диффузорным участком и цилиндрическим отверстием происходит подмешивание основного потока к поверхности, размытие пелены охладителя и снижение его концентрации у поверхности. Сразу за отверстиями веерной формы с коротким диффузорным участком и цилиндрической формы наблюдается формирование почкообразного вихря. При вдуве охладителя через веерное отверстие с длинным диффузорным участком и комбинированное отверстие на расстоянии пяти калибров от отверстия подмешивания основного потока к защищаемой поверхности не происходит (рис. 1).

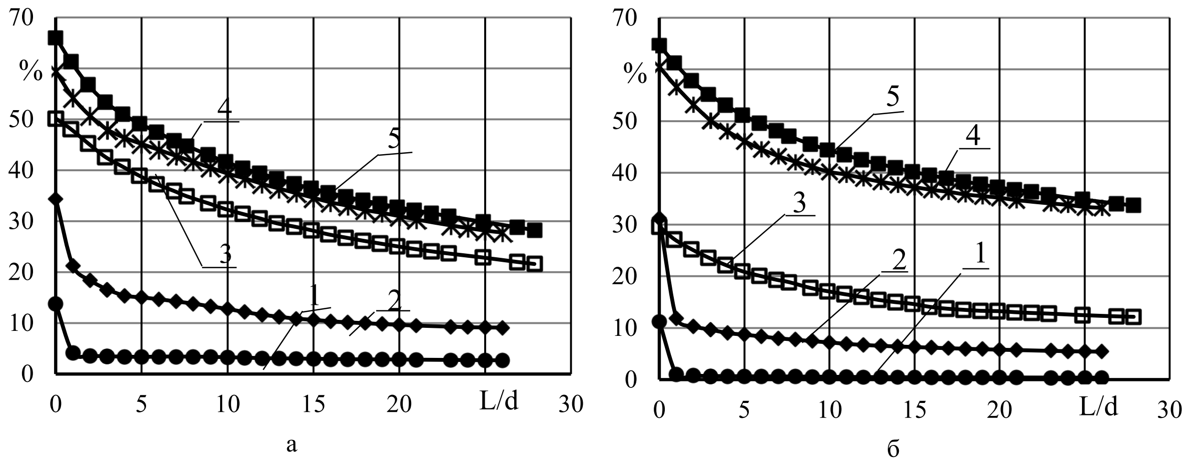


Рис. 1. Изменение концентрации охладителя по поверхности: а) при $m = 1$; б) при $m = 2$: 1 – цилиндрическое отверстие; 2 – веерное отверстие с коротким диффузорным участком; 3 – laidback отверстие с коротким диффузорным участком; 4 – веерное отверстие с длинным диффузорным участком; 5 – комбинированное отверстие

Толщина пелены охладителя, формируемой веерным отверстием с длинным диффузорным участком, комбинированным отверстием и отверстием типа laidback при изменении параметра вдува от 1 до 2 практически не меняется. При параметре вдува 1,5 происходит отрыв газовой завесы от поверхности, формируемой отверстием цилиндрической формы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00666.

Список литературы

1. Goldstein R. J., Eckert E. R. G., and Burggraf F., 1974, “Effects of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 17(5), 595-607.

2. Makki Y. H., and Jakubowski G. S., 1986, “An Experimental Study of Film Cooling from Diffused Trapezoidal Shaped Holes,” Proceedings of AIAA and ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 86-1326, Boston, Massachusetts, USA.

3. Мельников А. И. Обзор экспериментальных исследований эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 11. С. 1–12.

4. Gritsch M., Schulz A., and Wittig S., 1998b, “Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes with Expanded Exits,” Journal of Turbomachinery, 120(3), 549-556.

5. Sargison J. E., Guo S. M., Oldfield M. L. G., Lock G. D., and Rawlinson A. J., 2001a, “A Converging Slot-Hole Film-Cooling Geometry Part 1: Low-Speed Flat-Plate Heat Transfer and Loss,” Proceedings of ASME Turbo Expo, 2001-GT-0126, New Orleans, Louisiana, USA.

6. Dhungel A., Lu Y., Philips A., Ekkad S. V., and Heidmann J., 2009, “Film Cooling from a Row of Holes Supplemented with Anti Vortex Holes,” Journal of Turbomachinery, 131(2), 021007.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФФУЗОРЕ ПРИ СОПЛОВОМ ПОДВОДЕ ВОЗДУХА

А. М. Кувалдин, В. А. Медведев, Л. Е. Осипов, Л. В. Плотников*, М. Д. Смирных*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Российская Федерация, Екатеринбург, пр. Мира, 19

**leonplot@mail.ru*

Известно, что конические диффузоры являются неотъемлемой частью многих технических устройств и используются во многих технологических процессах (газовые горелки, печи, турбоустановки, аппараты для получения синтез-газа, сушилки и т. д.). Поэтому газодинамическое совершенствование и управление структурой потока в диффузорах остается актуальной задачей в развитии науки и техники в России и мире. В данной работе представлено экспериментальное исследование структуры потока в коническом диффузоре при сопловом подводе воздуха с помощью тепловизуализирующей съемки. В ходе опытов сопловые трубки устанавливались под углами 45, 60 и 70°. Диапазон изменения скорости от 5 до 35 м/с. Показано, что угол установки сопловых трубок оказывает существенное влияние на структуру потока в вертикальном диффузоре.

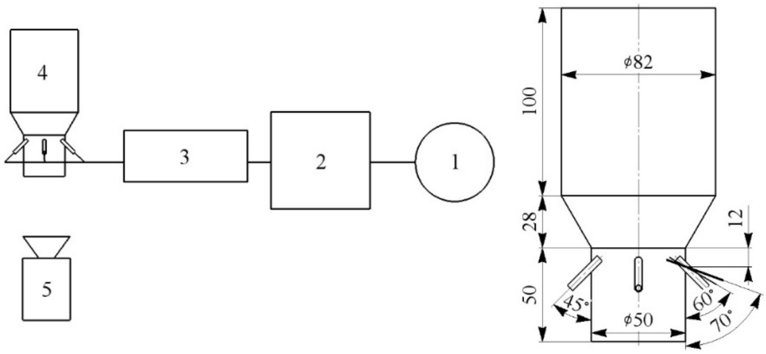
Конические диффузоры активно используются во многих технических устройствах (камеры сгорания, сушилки, печи, теплообменные аппараты, турбины и т. д.) [1]. При этом известно, что газодинамическое совершенство конструкции во многом определяет эксплуатационные характеристики устройств, такие как производительность, эффективность, надежность [2, 3]. Сегодня существует большое количество исследований аэродинамических характеристик потоков в диффузорах различных конфигураций и при разных начальных условиях, выполняемых с помощью численного моделирования [4–6]. Поэтому получение экспериментальных данных и поиск способов управлением структурой потока в вертикальном коническом диффузоре является актуальной задачей для развития науки и промышленности.

В данной работе проводилось экспериментальное исследование структуры потока в вертикальном коническом диффузоре на лабораторной установке (рис. 1, *а*). Геометрические размеры исследуемой конструкции диффузора показаны на рис. 1, *б*. Изучение структуры потока осуществлялось на основе метода тепловизуализирующей съемки, который заключается в размещении в потоке визуализирующей сетки из полимерных нитей. Физический принцип этого метода основан на анализе полей дисперсии температуры, получаемых с помощью тепловизионной съемки [7]. Соответственно, для получения термограмм необходимо было предварительно нагревать воздух до 60–70 ºС с помощью канального нагревателя.

Исследования проводились при углах установки подающих трубок в 45, 60 и 70° при различных начальных скоростях потока воздуха. В качестве примера на рис. 2 показаны термограммы структуры потока при начальной скорости около 6,5 м/с. Из рис. 2, *а* видно, что при установке трубок под углом 45° в диффузоре наблюдается фактически центральное течение (с некоторым отклонением к правой стороне цилиндра).

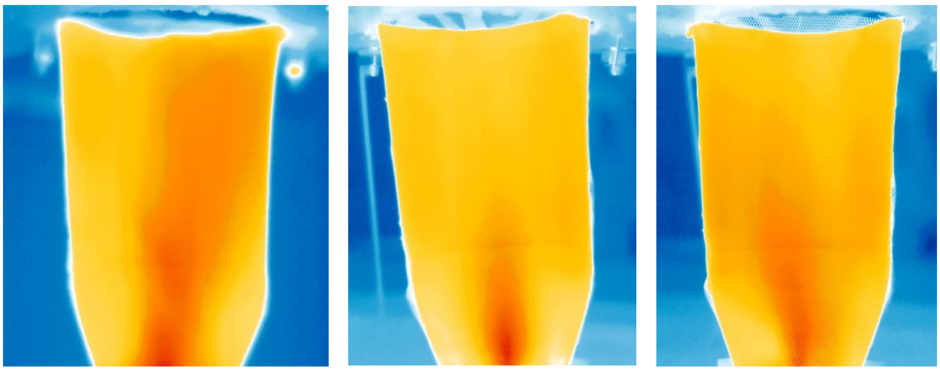
При установке подающих трубок под углом 60° структура потока существенно меняется (рис. 2, *б*). В данном случае имеет место форма течения, напоминающая «морковку», которая простирается примерно до середины высоты диффузора.

Изменение угла установки до 70° (рис. 2, *в*) вызывает изменение структуры потока, проявляющегося в «размытии морковки» (отсутствие ярко выраженного центрального течения).



а б

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (*а*) и геометрические размеры диффузора (*б*):
1 – компрессор; 2 – ресивер для стабилизации потока; 3 – канальный нагреватель;
4 – вертикальный диффузор с визуализирующей сеткой; 5 – тепловизор



а б в

Рис. 2. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха (средняя скорость около 6,5 м/с) через трубки, установленные под разными углами:
а – 45°; *б* – 60°; *в* – 70°

Таким образом, на основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

– угол установки подающих трубок оказывает существенное влияние на структуру потока в вертикальном диффузоре и может рассматриваться как способ управления аэродинамическими характеристиками;

– полученные данные расширяют базу знаний об особенностях газодинамики в вертикальных конических диффузорах и могут быть использованы для верификации математических моделей и уточнения инженерных расчетов.

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 литературы

1. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 с.

2. Japikse D., Baines N. C. Diffuser Design Technology. Norwich, VT: Concepts ETI, 1998. 524 p.

3. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.

4. Lee J., Jang S. J., Sung H. J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser // Journal of Turbulence. 2012. Vol. 13. Pp. 1–29.

5. Wu X., Schlüter J., Moin P., Pitsch H., Iaccarino G., Ham F. Computational study on the internal layer in a diffuser // Journal of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 550. Pp. 391–412.

6. Zou A., Chassaing J.-C., Li W., Gu Y., Sauret E. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis // Applied Thermal Engineering, vol. 161, art. no. 114158, 2019.

7. Жилкин Б. П., Ларионов И. Д., Шуба А. Н. Применение тепловизора для определения температурных полей газовых потоков // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 4. С. 136–137.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Р. С. Лукин*

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

Описываются особенности применения тепловых расчетов в рамках задач определения тепловых нагрузок элементов оборудования объектов использования атомной энергетики. Приведены основные проблемы, с которыми можно столкнуться при проектировании данного оборудования. Определены задачи, позволяющие сократить время подготовки расчётной модели.

В рамках производства оборудования для объектов использования атомной энергетики (ОИАЭ) необходимо подтверждать прочность, циклическую прочность и сейсмостойкость элементов оборудования на этапе эксплуатации. Основные нормативные документы, определяющие указанные условия: ПНАЭ Г-7-002-86 [1] и НП 031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. В рамках п. 1.2.7 и разд. 5 [1] требуется учет влияния температурных нагрузок на металлоконструкцию в рамках проверочных расчетов, что подразумевает учет или нивелирование данных нагрузок при проектировании изделия.

Оборудование ОИАЭ, не относящееся к ядерным установкам и требующее на этапе эскизного проектирования проведения расчетов с учетом температурного воздействия, можно разделить на несколько видов: сосуды с постоянной температурой рабочей жидкости (теплоизолированные и не теплоизолированные); элементы оборудования, циклически нагреваемые и охлаждаемые рабочими жидкостями и/или нагревательными элементами; сложно смонтированные элементы оборудования в стенах или перекрытиях, подвергаемые постоянному или циклическому нагреву; термостабилизируемое оборудование.

Процесс проектирования осложняется следующими факторами: применение в качестве корпусных деталей сварных металлоконструкций из хромоникелевых сталей аустенитного класса, обладающих коэффициентами теплового линейного расширения в среднем в 1,5 раза больше, чем конструкционные стали перлитного класса, и низкой теплопроводностью; наличие коррозии стенок в процессе эксплуатации аппаратов при воздействии растворами кислот или растворами с абразивными частицами. Основной причиной образования зон концентрации напряжений при температурном воздействии, приводящей к пластическому деформированию деталей являются: зоны перепада температур и зоны сжатия или изгиба конструкции в результате температурного расширения.

Возможность использования на этапе проверочного расчета электронной модели изделия в виде трехмерной геометрии позволяет проводить проверочные тепловые расчеты с использованием метода конечных элементов. Использование методов вычислительной гидродинамики позволяет получить решения для течения жидкости для простых [2] и сложных геометрий каналов. Однако авторы [2] отмечают значительное расхождение результатов натурного и численного экспериментов для моделей на основе k-ε и k-ω при расчете полей скоростей в пристеночной зоне, что может привести к некорректному расчету тепловых нагрузок для прочностного анализа. Также при решении задачи определения тепловых нагрузок часто возникает ограничение по объему модели, связанное с комплексной проблемой обеспечения детализации расчетной модели и ограничения с точки зрения обеспечения необходимой точности получения решения по распределению температурных полей, связанной с корректным моделированием пристеночного слоя для течения газа или жидкости. В качестве примера на рис. 1 изображены результаты расчета теплообменной части аппарата с общим количеством конечных объемов, участвующих в расчете (5,5 млн). Высота аппарата около пяти метров, внутренний диаметр нагревающей части – 200 мм. Как видно из иллюстрации, недостаточная дискретизация зоны теплообмена может привести к некорректному расчету полей температур. В то же время разработка расчетной модели, решающей задачу в трехмерной постановке, отвечающей требованиям по точности получаемых результатов, может занять продолжительное время, не удовлетворяющее срокам реализации проекта.

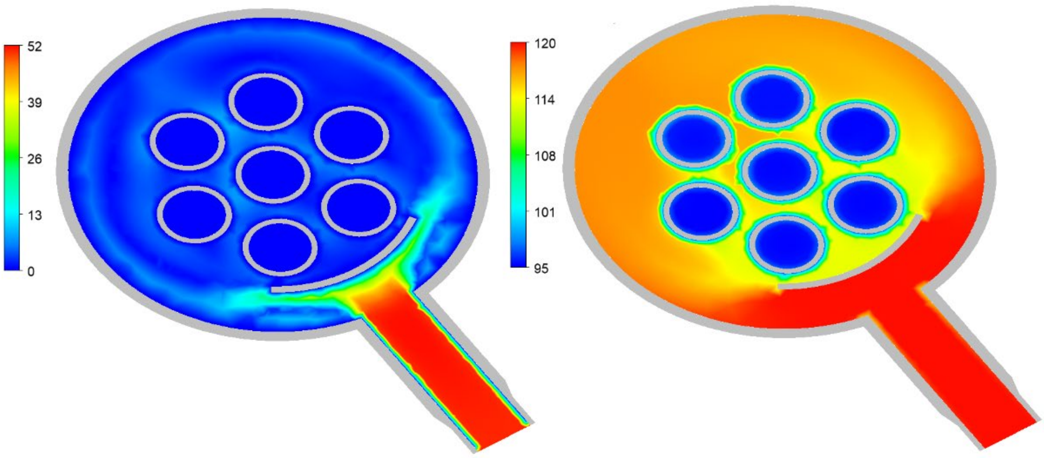


Рис. 1. Пример результата расчета скорости (левый рисунок, м/с)
и температуры (правый рисунок, °С) в теплообменной части скруббера

Основной задачей исследования является уточнение рекомендаций по назначению параметров конечно-элементной сетки и моделей турбулентности для анализа распределения температур в проектируемом изделии с учетом массопереноса нагревающих/охлаждающих фаз для типовых конструкций оборудования ОИАЭ.

Список литературы

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: утв. Государственным комитетом СССР по использованию атомной энергии: ввод. в действие 01.07.1987, с изм. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

2. Лубина А. С., Седов А. А. Верификация CFD-моделей ANSYS FLUENT для однофазных течений в каналах простой формы // 10 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия 16–19 мая 2017 г. Подольск, 2017.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СВОБОДНОМ ОСТЫВАНИИ ВОДЫ В ПОЖАРНЫХ РУКАВАХ

В. П. Малый*, И. Н. Пожаркова, О. С. Малютин, С. В. Бабёнышев, С. О. Куртов, Т. А. Миловидова*

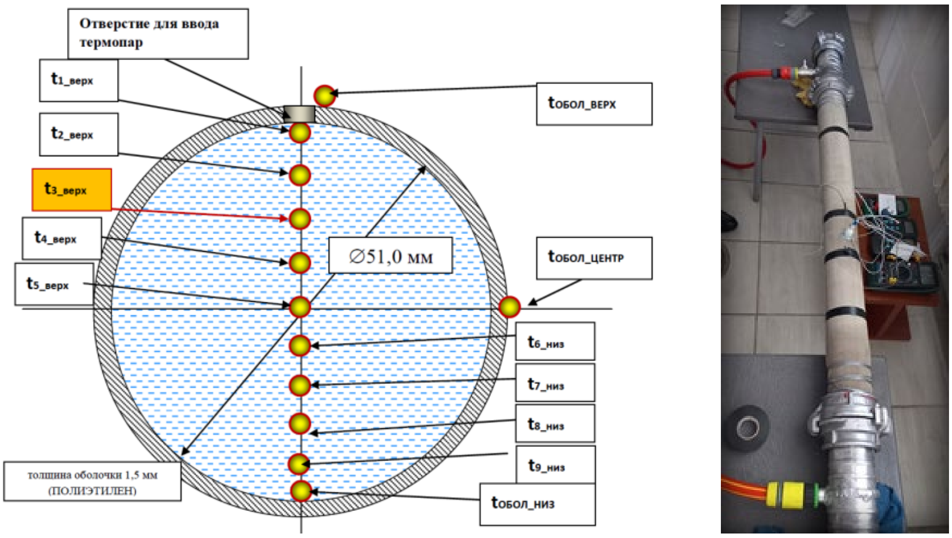
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
660074, Российская Федерация, Железногорск, ул. Северная, 1
**sietmen@yandex.ru*

Приведены результаты исследования особенностей формирования температурных полей воды в напорном пожарном рукаве, полученные на основе натурных экспериментов и регрессионного анализа. Установлен характер и представлена математическая модель радиально-азимутального распределения температуры воды при её свободном остывании в рукаве с перекрытым стволом. Обосновано применение результатов работы для разработки новых образцов пожарной техники и совершенствования способов прокладки пожарных рукавных линий при развертывании сил и подразделений МЧС России, в том числе в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера и Арктики.

В данной работе рассмотрен процесс формирования радиально-азимутального распределения температуры (РАРТ) неподвижной воды в рукавах пожарных напорных (РПН) с учетом теплоотвода в атмосферу. Цель исследования заключается в расчетно-экспериментальном определении формы РАРТ, а также теоретическом обосновании полученной формы.

Одной из основных гипотез исследования являлось предположение, что отбор тепла в атмосферу при охлаждении воды в РПН происходит изотропно от стенок рукава к окружающему воздуху.

Для проведения натурного эксперимента была разработана экспериментальная установка (рис. 1), имитирующая участок РПН, заполненного водой.

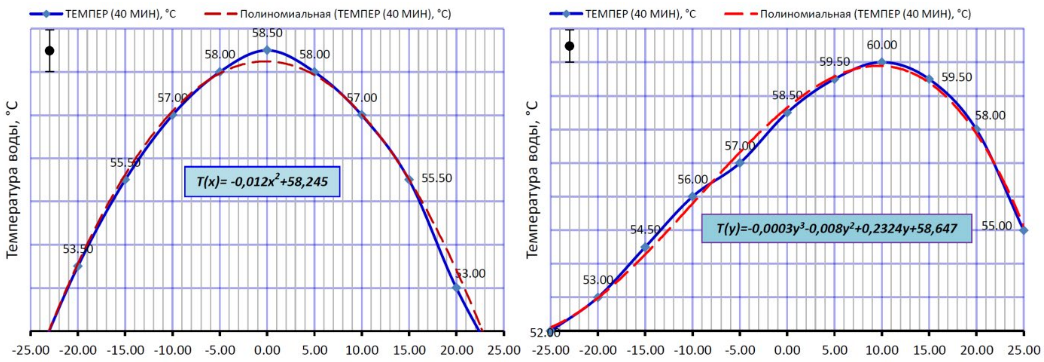


а б

Рис. 1. Схема размещения спаев термопар по вертикальному диаметру гидростолба в РПН ∅51 мм: *а* – схема; *б* – общий вид установки

Установка оборудована термодатчиками, позволяющими выполнять измерения как температуры воды в различных точках гидростолба, так и температуры поверхности оболочки РНП. Внутренний диаметр оболочки РПН ∅51 мм, длина – L>>∅, что позволяет на участке измерения не учитывать теплообмен гидростолба с окружающей средой через торцевые поверхности установки.

На основании полученных экспериментальных данных построены (рис. 2) распределения температуры воды по горизонтальному (*а*) и вертикальному (*б*) диаметру гидростолба в РПН, а также регрессионные модели этих распределений.

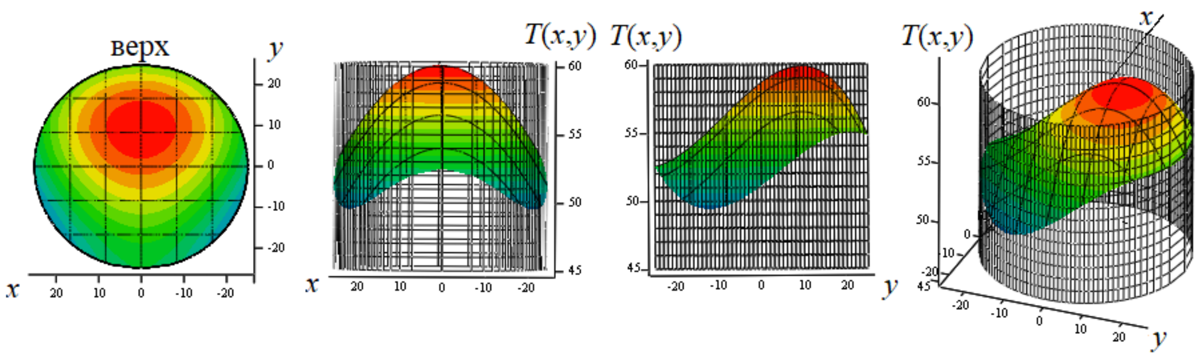


а б

Рис. 2. Экспериментально определённые распределения температуры воды в поперечном сечении РПН ∅51 мм на 40-й минуте остывания: *а* – горизонтальное сечение гидростолба; *б* – вертикальное сечение гидростолба

Трехмерная визуализация температурных полей, построенная с использованием регрессионных моделей (рис. 2), представлена на рис. 3.

Отклонение точки с максимальной температурой от геометрического центра гидростолба в исследованном диапазоне температур (рис. 3) объясняется конвекционными процессами, возникающими вследствие неравномерного остывания воды, а также параболической зависимостью ее плотности от температуры.



а б

Рис. 3. Азимутально-радиальные распределения температуры воды в РПН ∅51 мм, полученные по экспериментальным точкам: *а* – изотермы (карта) распределения $T(x,y)$; *б* – 3D-график распределения $T(x,y)$

Следует отметить, что параболичность зависимости плотности воды от её температуры может играть особенно важную роль в формировании РАРТ в процессе охлаждения воды в РПН в области низких (+4…0 °С) температур. Полученные в работе [2] расчетно-экспериментальные характеристики и особенность изменения плотности воды в области (+70 ºС ÷ +4 ºС ÷ 0 ºС) позволяют сделать вывод, что в отличие от зависимостей, представленных на рис. 2, 3, при перемерзании рукава без движения воды обледенение внутренней поверхности стенки РПН начнётся с верхней части его поперечного сечения. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения существующей методики расчета параметров промерзания воды в РПН.

Список литературы

1. Кулагина Т. А., Енютина Т. А., Терешков В. И. Снижение рисков при тушении пожаров в суровых климатических условиях // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 11. С. 69–74. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-69-74.

2. Исследование теплогидравлических параметров элементов тракта подачи огнетушащих веществ к месту тушения пожара: отчет о НИР (заключительный) / ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Железногорск, 2022. 133 с. № НИОКТР 122031000248-9.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ НА ТЕПЛООТДАЧУ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Е. В. Панкратов*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
163002, Российская Федерация, Архангельск, набережная Северной Двины, 17
e.pankratov@narfu.ru

Работа посвящена влиянию вторичных вихрей по типу Тейлора на теплообмен в концентрических кольцевых каналах с турбулентными затухающими закрученными потоками. Исследование показывает, что возникновение и трансформация вторичных вихревых структур оказывает существенное влияние на распределение теплового потока по поверхности кольцевого канала.

Вторичные течения часто возникают в потоке теплоносителя в кольцевых каналах при различных условиях. Возникновение вторичных вихрей позволяет дополнительно интенсифицировать рассеивание тепловой энергии.

Большинство исследований основываются на положении, что вторичные течения образуются из-за движения одной из поверхностей кольцевого канала. Однако вторичные вихри могут образовываться в закрученном потоке при неподвижных поверхностях кольцевого канала [2]. В предыдущей работе автора [1] было показано, что вторичные потоки типа Тейлора могут образовываться, когда поток закручивается с неподвижными поверхностями кольцевого канала. Однако влияние вихрей Тейлора – Гёртлера на интенсификацию теплообмена в кольцевом канале при закручивании потока изучено недостаточно.

Рассматриваемая в данной работе геометрия показана на рис. 1.

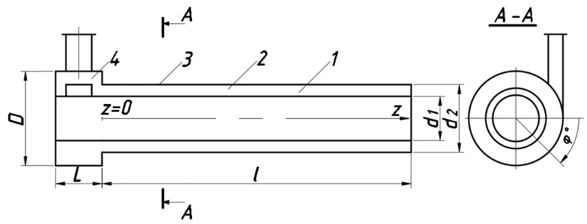


Рис. 1. Геометрия исследуемого кольцевого канала

Кольцевой канал (2) образован двумя соосными цилиндрами. Внутренняя поверхность *1* диаметром d_1 = 152 мм, а наружная *3* диаметром d_2 = 184 мм. Длина канала *l* составляет 840 мм. Воздух подается по тангенциальному каналу *3* размерами 35 × 70 мм в вихревой генератор *4* диаметром *D* = 259 мм и длиной *L* = 126,5 мм. Движение потока измеряется углом φ. Этот угол измеряется от точки сопряжения тангенциального канала с внутренней поверхностью.

В физическом эксперименте аэродинамику исследовали с помощью лазерного доплеровского анемометра. Теплопередачу исследовали с помощью датчиков теплового потока. Для численного моделирования был выбрана программа ANSYS Fluent. В качестве модели турбулентности была выбрана модель SST k-ω с коррекцией кривизны. При входе число Рейнольдса $Re_{вх}=21\cdot10^3$ и число Прандтля $Pr_{вх}$ = 0,7.

На входе в кольцевой канал наблюдаются разделения потока, порождающие крупномасштабные нестационарные турбулентные вихревые структуры. Эти вихревые структуры развиваются вниз по течению (рис. 2). Искривление вихрей и их последующее выравнивание вдоль потока приводит к образованию структур, подобных вихрям Тейлора. Эти вторичные потоки постепенно занимают все пространство кольцевого канала. Распространение вторичных вихрей совпадает с углом завихрения основного потока. В этом случае количество вихрей увеличивается в направлении выходного сечения. Таким образом, для прямого кольцевого канала с увеличением z количество хорошо сформированных вихрей увеличивается с 2 до 14.

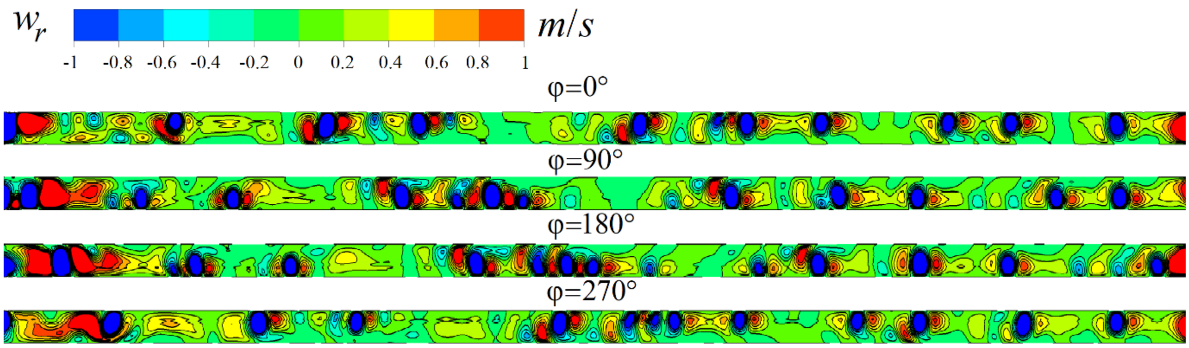


Рис. 2. Распределение радиальной скорости в продольном сечении в кольцевом канале

Изменения безразмерной радиальной скорости и плотности теплового потока в среднем сечении по длине кольцевого канала показаны на рис. 3. По всей длине канала наблюдается чередование максимальных и минимальных значений скорости. Это происходит за счет переноса вихревых потоков от сердцевины потока к стенке и наоборот. Предельные углы закручивания потока на внешней и внутренней поверхностях различны. Поэтому вихревые структуры растягиваются в азимутальном направлении, а затем большие делятся на более мелкие.

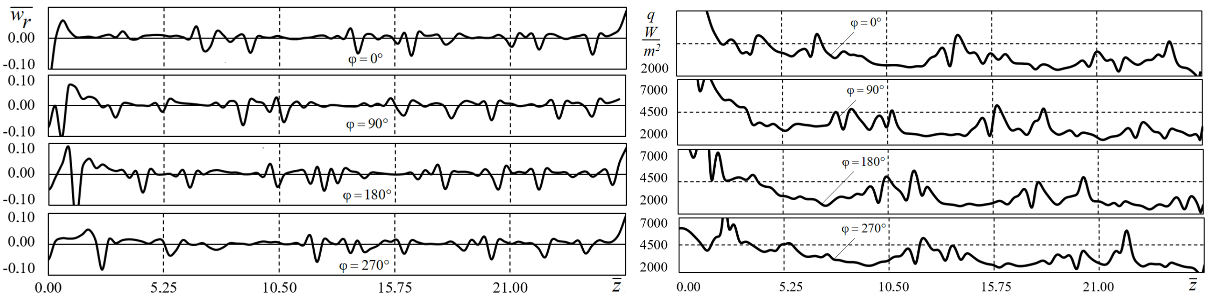


Рис. 3. Изменение безразмерной радиальной скорости и плотности теплового потока в среднем сечении по длине кольцевого канала

Возникновение и трансформация вихревых структур оказывают существенное влияние на распределение теплового потока по поверхностям. Спиральные линии распределений по длине плотностей теплового потока совпадают с предельными углами закручивания потока на них. Существует четкая взаимосвязь между флуктуациями общей скорости и распределением плотности теплового потока. Из-за затухания закрученного потока наблюдается значительное снижение среднего коэффициента теплопередачи по длине внешней поверхности.

Было обнаружено, что нестационарные вихри Тейлора постепенно занимают все пространство кольцевого зазора. Возникновение и трансформация этих вторичных потоков влияют на распределение теплового потока по рабочим поверхностям. Наблюдается четкая связь между колебаниями суммарной скорости и плотностью теплового потока на них.

Список литературы

1. Леухин Ю. Л., Панкратов Е. В., Карпов С. В. Исследование аэродинамики и теплоотдачи сужающихся кольцевых каналов с закрученным течением потока // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 1 (82). С. 34–39.

2. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982. 200 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ ТАНДЕМА КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ

М. Д. Селезнёва*, В. А. Маслов, В. В. Сероштанов, А. А. Гусаков*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
**selezneva2317@mail.ru*

Проведено исследование течения и теплообмена при обтекании тандема круговых цилиндров методом градиентной теплометрии. Получены распределения местных коэффициентов теплоотдачи по верхней полуповерхности нижнего по потоку (второго) цилиндра. Установлено влияние продольного шага *S* на распределение местных чисел Нуссельта при различных смещениях по вертикали верхнего по потоку (первого) цилиндра.

Одной из важнейших задач энергетики является повышение энергетической эффективности оборудования. Трубчатые теплообменники – наиболее распространенная группа теплообменных аппаратов. При их создании и проектировании наиболее важная задача – выбор компоновки: коридорное или шахматное расположение труб. Без экспериментальных исследований решение данной проблемы невозможно. Вопросами течения и теплообмена при обтекании потоком круговых цилиндров занимаются уже давно, однако в последнее время такие исследования в большей степени выполнены с помощью численного моделирования.

Представлено экспериментальное исследование особенностей течения и теплообмена при обтекании тандема круговых цилиндров с использованием градиентной теплометрии и метода трассерной визуализации (PIV). Опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе НОЦ «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [1]. Исследованы различные конфигурации двух цилиндров диаметром $d = 66$ мм. В опыте варьировалось продольное расстояние между цилиндрами S и высота их расположения относительно друг друга h (рис. 1), скорость набегающего потока оставалась постоянной. Целью работы стало определение местного коэффициента теплоотдачи по верхней полуповерхности второго цилиндра и влияние параметров течения на теплообмен.

Экспериментальная модель исследовалась в двух конфигурациях: при фиксированном смещении по вертикали $h = +d$ менялось продольное расстояние S между цилиндрами. Далее смещение менялось на $h = -d$, и опыты повторялись для сходных S. Были исследованы расстояния $S = d$, $2d$ и $4d$. Внутрь полых цилиндров подавался насыщенный водяной пар: температура поверхности постоянная и близка к 100 °C. На поверхности нижнего по потоку цилиндра монтировался градиентный датчик теплового потока (ГДТП), выполненный из монокристаллического висмута [2]. Размеры датчика в плане составляют 2,5 × 2,5 мм, толщина 0,2 мм.

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: тепловой поток, проходя через пластину с анизотропными тепло- и термоэлектрическими свойствами, влечет за собой появление термоЭДС, пропорциональной величине теплового потока и нормальной вектору плотности теплового потока. Постоянная времени ГДТП имеет порядок 10^{-8} с, что дает возможность считать ГДТП безынерционным средством измерения для получения результатов в поставленной задачи.

Исследуемый цилиндр (второй) мог проворачиваться вокруг оси на угол $\varphi = 0\ldots180°$, что позволило получить зависимость плотности теплового потока, регистрируемой ГДТП, от угла поворота. Экспериментальная модель позволяет перемещать верхний по потоку цилиндр на расстояние ±0,5 калибров *d*.

В результате исследования для режима Re = 4800 получены кривые распределения местного числа Нуссельта для нижнего по потоку цилиндра с различным смещением между цилиндрами *S* и шагами по вертикали *h*. На рис. 1 показаны кривые для *S* = *d*, *S* = 2*d*, *S* = 4*d*. Кривые *h* = ±*d* получены по верхней полуповерхности цилиндра.

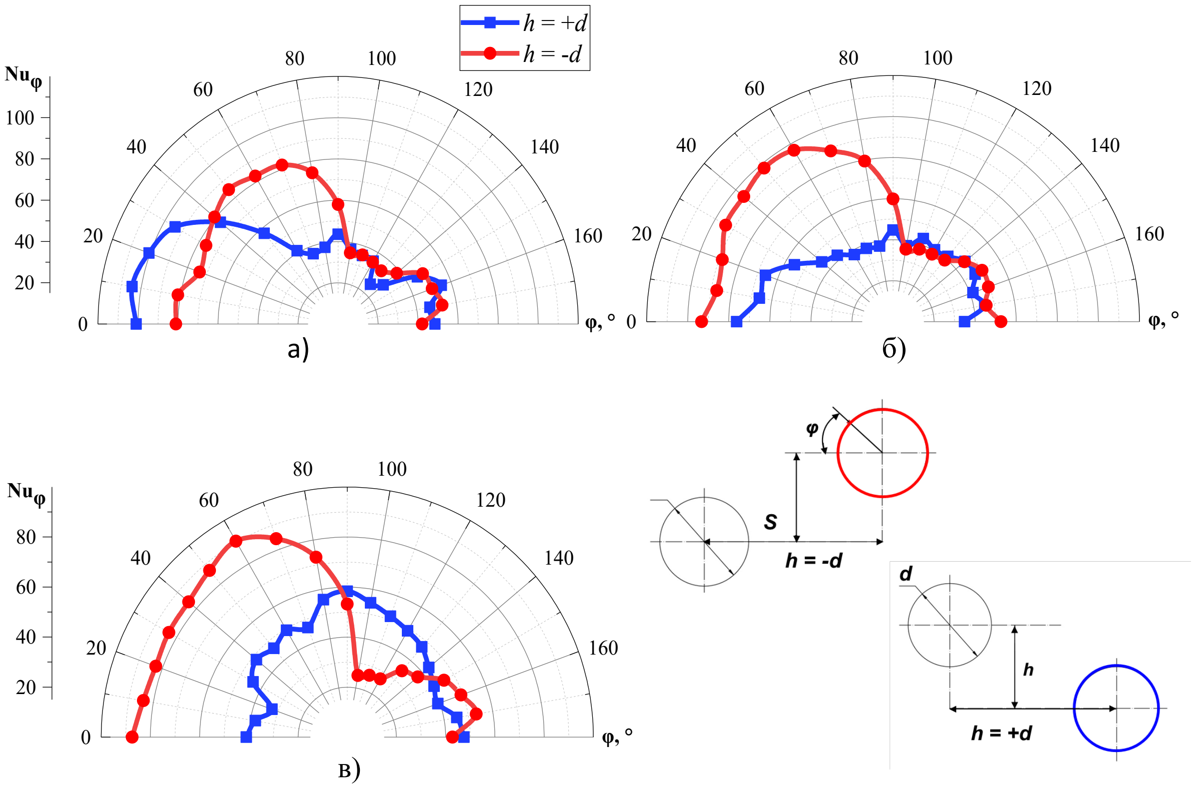


Рис. 1. Распределение местного числа Нуссельта по верхней полуповерхности второго цилиндра:
а – *S* = *d*; б – *S* = 2*d*; в – *S* = 4*d*

Положение максимума зависит как от параметра *S*, так и от параметра *h*. При смещении по вертикали первого цилиндра на величину *h* = –*d* точка отрыва потока для всех исследуемых *S* наблюдается вблизи угла φ = 90°. При увеличении шага между цилиндрами *S* можно наблюдать сходство кривых. Также при такой конфигурации наблюдается локальный минимум вблизи 10 °, что предположительно характеризуется наличием в этой области низкоэнергетической зоны, образованной сошедшим с первого цилиндра вихрем. При смещении верхнего по потоку цилиндра на *h* = +*d* наблюдается срыв пограничного слоя на угле 60° вследствие взаимодействия второго цилиндра с вихрем, сошедшим с первого цилиндра. Наблюдается локальный максимум КТО вблизи φ = 90°. В кормовой части цилиндра во всех конфигурациях можно говорить о некотором сходстве кривых.

Исследованы особенности течения и теплообмена в тандеме цилиндров при различных конфигурациях. Установлено сходство распределения КТО для конфигурации *h* = –*d* для всех исследуемых продольных шагов (смещений) *S*, тогда как при *h* = +*d* наблюдается значительное влияние верхнего по потоку цилиндра на распределение местного числа Нуссельта.

Список литературы

1. Сероштанов В. В., Маслов В. А., Селезнева М. Д. [и др.] Экспериментальное исследование течения и теплообмена при обтекании двух цилиндров // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 2 т. Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 1. М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 68–69.

2. Зайнуллина Э. Р., Бабич А. Ю., Митяков В. Ю., Сапожников С. З. Градиентная теплометрия в исследовании конденсации водяного пара на внешней поверхности вертикальной и наклонной трубы // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 т. Москва, 22–26 октября 2018 года. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 60–63.

РАСЧЕТ ПУЛЬСАЦИЙ СПИРАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

М. Н. Сергеев[*]

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева
152934, Российская Федерация, Рыбинск, ул. Пушкина, 53
mihail_sergeev@mail.ru

В работе предлагается инерционный механизм радиальных пульсаций спиралевидных вихревых структур, образующихся вокруг приосевого потока в вихревой трубе. Проведен расчет частоты таких пульсаций.

Вихревые спиралевидные структуры возникают в вихревой трубе в результате взаимодействия приосевого и периферийного потоков, движущихся в противоположных направлениях [1].

Механизм образования таких структур аналогичен образованию вихрей в зоне смешения струй, движущихся с разными скоростями. В закрученном потоке в силу осевой симметрии такие вихри имеют тороидальный характер. Разомкнутый тор преобразуется в спиралевидный жгут.

Взаимодействие тора или жгута с окружающим потоком приводит к возникновению радиальных пульсаций. Механизм этих пульсаций связан с гироскопическим эффектом.

Размер вихревых структур, их развитие с течением времени зависит от параметра закрутки, который характеризует соотношение завихрённостей в продольном и поперечном направлениях:

$$\alpha = \omega l^2/\Gamma ,$$

где ω – угловая скорость вращения вихревого ядра в вихревой трубе; l – поперечный размер вихревой структуры; Γ – циркуляция скорости в вихревой структуре.

Параметр закрутки, в свою очередь, зависит от режимных и геометрических параметров работы вихревой трубы, таких как относительная доля холодного потока, радиус диафрагмы, относительная площадь соплового ввода, число Маха на входе в вихревую трубу.

Используя для частоты пульсаций выражение

$$\nu = \sqrt{2\omega_k \omega/\pi} ,$$

где ω_k – частота вращения вихревой структуры относительно криволинейной оси, можно получить зависимость числа Струхаля от характеристик вихревой структуры:

$$Sh = \sqrt{8/\pi\alpha}.$$

Используя данные, наиболее типичные для работы вихревой трубы, можно получить, что $\alpha \sim 1,\ Sh \sim 1.6$.

Численный расчет характеристик вихревых структур с помощью метода крупных вихрей показал, что наличие закрутки слоя смешения двух цилиндрических струй приводит к уменьшению размеров вихревых структур, которые образуются в слое смешения.

Список литературы

1. Лукачев С. В. Исследование неустойчивых режимов течения газа в вихревой трубе Ранка // Инженерно-физический журнал. 1981. Т. 41. № 5. С. 784–790

УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ПОЛЯРОИД КАК АНАЛОГ УДАРНЫХ ПОЛЯР

В. Сизаско*

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
sevsizzz@gmail.ru

В докладе рассматривается графический способ отображения результатов расчетов ударных газодинамических течений на пространственный/объемный аналог ударных поляр – *ударный поляроид*, предложенный ранее, но не реализованный по причине отсутствия на тот момент современных графических сред, профессором БГТУ «Военмех» Владимиром Николаевичем Усковым.

Еще в XX веке в связи с реализацией ракетно-космических аппаратов и сверхзвуковых полетов направление газодинамики получило значительный толчок в развитии [1, 2]. Динамика ударно-волновых процессов в случае взаимодействия *скачков уплотнения* может схематично представляться на *ударно-волновой плоскости* как зависимость угла поворота потока на скачке от его интенсивности [3]. Буземаном впервые была заложена основа графических методов решения задач об интерференции газодинамических разрывов с помощью *ударных поляр* [2]. Такие поляры еще носят имя самого Буземана; также их называют сердцевидными кривыми или изомахами, так как каждая из них строится по конкретному числу Маха.

Ударно-волновые структуры образуются в результате интерференции газодинамических разрывов между собой или с твердыми поверхностями. Значительный вклад в решение задач с наличием в поле течения газа таких ударно-волновых структур, в частности графическим методом ударных поляр, внес лично *В. Н. Усков* и его ученики [3–5]. Предложенный *В. Н. Усковым* ранее, но не реализованный по причине отсутствия на тот момент современных графических сред, пространственный аналог ударных поляр – *ударный поляроид* – особенно востребован для отображения результатов расчетов проникновения скачка в стратифицированную среду, профили параметров которой меняются гладким образом, соответственно, как и сама поверхность *ударного поляроида*. Это позволяет отслеживать в ходе или по окончании расчета «траекторию» скачка на такой поверхности [6].

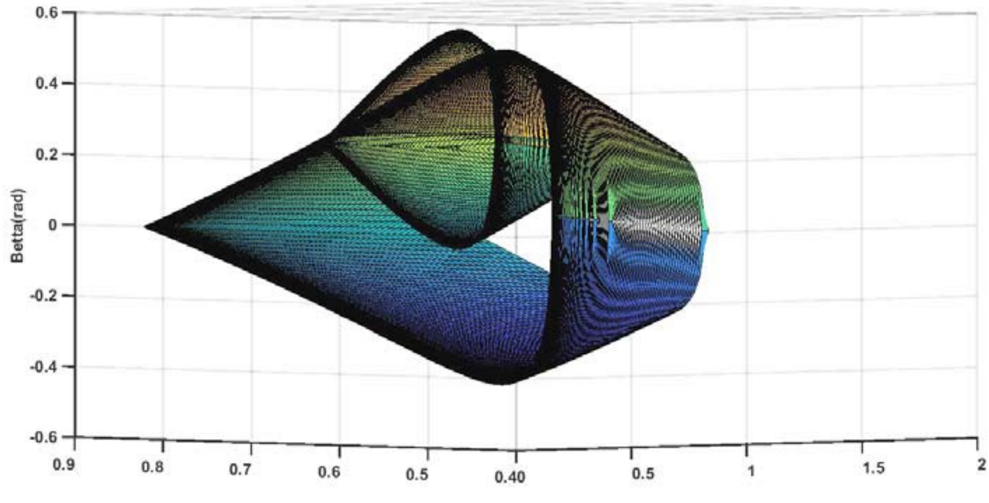


Рис. 1. Ударный поляроид

В данной работе осуществлен переход от плоского представления семейства ударных поляр к их трехмерному аналогу – *ударному поляроиду*. Метод реализован в программном комплексе Matlab.

Программа состоит из трёх основных блоков. Первый отвечает за построение семейства первичных и вторичных поляр с заданным шагом по числу Маха для «левого» и «правого» скачков, а также возможных *поляр разрежения*. Второй строит поляры по выбранным контрольным точкам (конкретным линиям тока). В программу были интегрированы данные из работы [5] с целью построения на плоскости поляр «траектории» скачка уплотнения, проникающего в сдвиговый слой невязкого и вязкого теплопроводного газа. Вторичные поляры линеаризуются (достаточно задавать только направление). В третьем блоке осуществляется построение объемного *ударного поляроида* (рис. 1), где и отслеживается «траектория» криволинейного косого скачка уплотнения [6].

Список литературы

1. Хейз У. Д. Основы теории газодинамических разрывов // Основы газовой динамики / под ред. Г. Эммонса. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 702 с.

2. Буземан А. Годографический метод газовой динамики // ZAMM. 1937. № 17(2). С. 73–79.

3. Адрианов А. Л., Старых А. Л., Усков В. Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск: Наука, 1995. 180 с.

4. Усков В. Н., Чернышов М. В. Экстремальные ударно-волновые системы в задачах внешней аэродинамики // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 15–31.

5. Адрианов А. Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 216 с.

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. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-558-567.

МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МОДУЛЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С ИНТЕГРИРОВАННОЙ ГИПЕРТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ СЕКЦИЕЙ

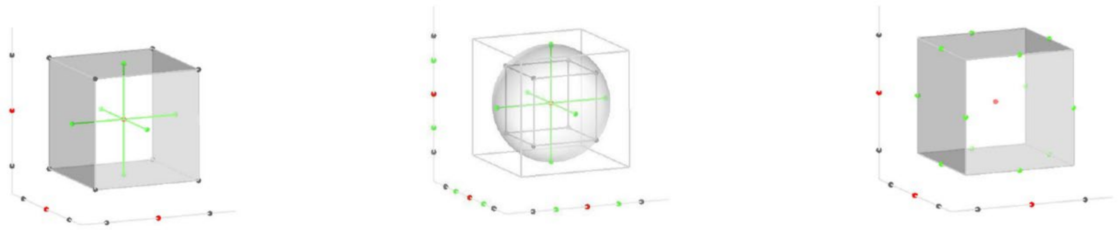
Н. Ю. Соколов[1*], В. А. Кулагин[2]*

[1]АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»
662972, Российская Федерация, Железногорск, ул. Ленина, 52
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[*]nikita436@iss-reshetnev.ru

Одной из важнейших задач при создании космических аппаратов (КА) является *обеспечение тепловых* режимов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Негерметичность современных спутниковых платформ ограничивает возможность охлаждения электрорадиоизделий (ЭРИ) бортовой РЭА только кондуктивным и радиационным теплообменом. Наблюдается тенденция увеличения тепловыделения ЭРИ в связи с повышением их функциональной сложности. Локальная мощность тепловыделения может достигать 10 Вт/см^2. При таких обстоятельствах алюминий, как основной конструкционный материал КА, достиг предела своих теплопередающих способностей. Прорывным научно-техническим решением, которое обеспечило эффективный отвод тепла от всех ЭРИ бортовой РЭА, является гипертеплопроводящая секция (ГТПС) [1]. Лучшее расположение ГТП по отношению к источникам тепловой мощности может быть получено с помощью параметрической оптимизации ANSYS.

DesignXplorer (ПО Ansys) – инструмент, использующий поверхности отклика для эффективного сканирования пространства параметров [2]. Методика параметрической оптимизации заключается в последовательном выполнении: 1) корреляции параметров; планирования эксперимента; 3) построения поверхности отклика; 4) оптимизации.

Доступные схемы планирования эксперимента: 1) *центральный композиционный план (ЦКП); 2) план Бокса – Бенкена; 3) план оптимального заполнения пространства*; 4) план, настраиваемый самостоятельно; 5) инициализация разряженной сетки (рис. 1).



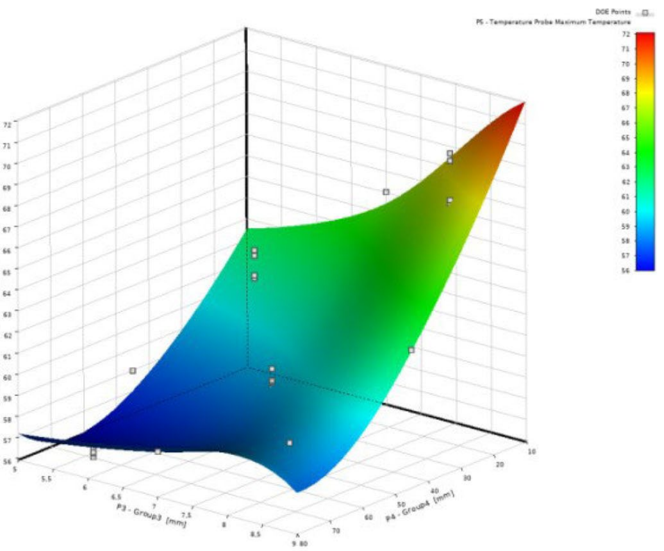
ЦКП (гранецентрированный) ЦКП (ротатабельный) План Бокса – Бенкена

Рис. 1. Схемы планирования эксперимента

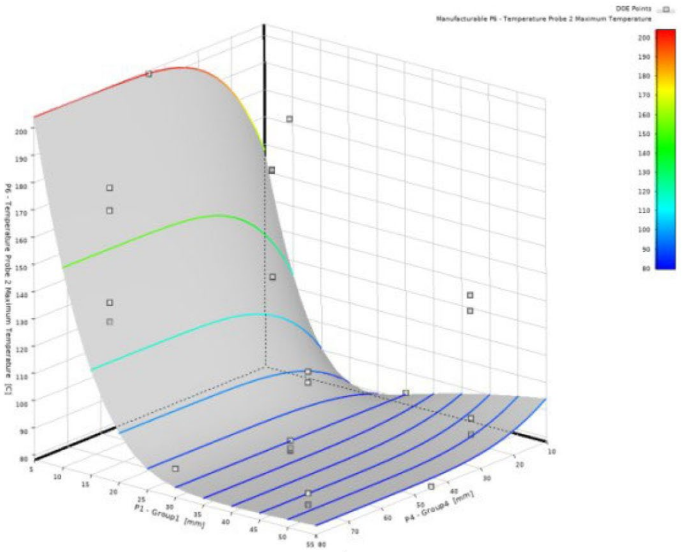
Существует пять типов ЦКП: 1) автоопределение (по умолчанию); 2) гранецентрированный; 3) ротатабельный; 4) VIF (фактор увеличивающий дисперсию); 5) G – оптимальность.

Количество экспериментальных точек будет соответствовать выбранному плану эксперимента. С целью сокращения числа экспериментов до разумного предела некоторые диагональные точки в сравнении с полным факторным экспериментом не рассматриваются. Из набора расчетных точек формируется непрерывная поверхность отклика (рис. 2), при этом важно сделать несколько верификационных точек.

Становится возможным сделать поиск оптимального решения по поверхности *отк*лика. До оптимизации параметры P1, P2, P3, P4 соответственно 50, 50, 8, 70 мм. P5 и P6 соответственно 58 и 83 °C соответственно. Параметр P7 равен 0,152 кг.



а



б

Рис. 2. Поверхности отклика по трем параметрам: *а* – температура резисторов от толщины основания несущей конструкции и расположения ГТПС; *б* – температура МС в зависимости от её перемещения по поверхности ПП и перемещения ГТПС

Условия оптимизации: минимизировать массу модуля РЭА при максимально допустимых рабочих температурах ЭРИ (P7 → min; P5 = 60; P6 = 80).

Результат оптимизации: три точки-кандидата, рекомендуется смещение ГТПС на 12 мм влево, смещение МС влево и вверх (от 10 до 30 мм), уменьшение толщины основания несущей конструкции на 0,8 мм, что эквивалентно уменьшению массы на 8 %.

Список литературы

1. Кулагин В. А., Соколов Н. Ю. Физико-математическое моделирование предельных характеристик системы тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады. 2018. С. 205–210.

2. Гаганов А. В., Кретинин А. В., Куликова Е. Е. Оптимизационное проектирование проточной части трубчатого теплообменного аппарата с использованием инструментария ANSYS WORKBENCH // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 6. С. 24–28.

ВЫБОР КОРРЕЛЯЦИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ЖАЛЮЗИЙНЫХ РЕБРАХ

А. Б. Сухоцкий[1,2], Г. С. Маршалова[1,2⁎], Е. С. Данильчик[1,2], Р. Г. Кадыров[3]*

*[1]Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси
220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15*
*[2]Белорусский государственный технологический университет
220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, 13а*
*[3]ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»
420111, Российская Федерация, Казань, ул. К. Маркса, 10*
⁎galiana.sidorik@gmail.com

Данная работа посвящена выбору корреляций для коэффициента аэродинамического сопротивления на жалюзийных ребрах на основе верификации экспериментальных исследований гидравлических характеристик с предлагаемыми в различных литературных источниках критериальными уравнениями. Для исследуемого теплообменника наибольшее совпадение получено с расчетными зависимостями Ryu and Lee.

Теплообменники с жалюзийными ребрами широко используются для автомобильных радиаторов, испарителей и конденсаторов кондиционеров, электронных устройств охлаждения и криогенных теплообменников и др. [1]

Цель работы – выбор корреляций для вычисления коэффициента аэродинамического сопротивления на жалюзийных ребрах на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Геометрические размеры исследуемых жалюзийных ребер: ширина ребра – b_f = 8,0 мм, ширина жалюзи – b = 6,5 мм, шаг жалюзи – s = 1,2 мм, угол выгибки ребра – α = 25°, длина ребра – l_f = 12 мм, шаг ребра – s_f = 1,28 мм, толщина ребра – δ = 0,1 мм, шаг трубы – s_t = 9,6 мм, диаметр трубы, поперечный потоку воздуха – d_m = 1,6 мм.

Для определения аэродинамического сопротивления в работе [2] предлагаются следующие уравнения:

зависимости Kim and Bullard для $100 < Re_s < 600$

$$f = Re_s^{-0{,}781}\left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0{,}444}\left(\frac{s_f}{s}\right)^{-1{,}682}\left(\frac{b_f}{s}\right)^{-1{,}22}\left(\frac{l_f}{s}\right)^{-0{,}818}\left(\frac{b}{s}\right)^{1{,}97}; \quad (1)$$

зависимости Dong et al., $200 < Re_s < 2000$

$$f = 0{,}54486 Re_s^{-0{,}3068}\left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0{,}444}\left(\frac{s_f}{s}\right)^{-0{,}9925}\left(\frac{b_f}{s}\right)^{-0{,}5458}\left(\frac{l_f}{s}\right)^{-0{,}0688}\left(\frac{b}{s}\right)^{-0{,}2003}; \quad (2)$$

зависимости Ryu and Lee для $100 < Re_s < 3000$

$$f = Re_s^{-0{,}433}\left(\frac{l_f}{s}\right)^{0{,}185}\left(1{,}1 + 4{,}31\left(\frac{\alpha}{90}\right)^2 + 0{,}836\frac{ln(s_f/s)}{(s_f/s)^2}\right); \quad (3)$$

зависимости Chang and Wang, $150 < Re_s < 3000$

$$f = f_1 f_2 f_3; \quad (4)$$

$$f_1 = 4{,}97 Re_s^{-0{,}6049-1{,}064/\alpha^2} \left[ln\left(0{,}9 + \left(\frac{\delta}{s_f}\right)^{0{,}5}\right)\right]^{-0{,}527}; \quad (5)$$

$$f_2 = \left[\frac{d_h}{s} ln\left(0{,}3 Re_s\right)\right]^{-2{,}966} \left(\frac{s_f}{b}\right)^{-0{,}7931 s_t/(s_t - d_m)}; \quad (6)$$

$$f_3 = \left(\frac{s_t}{d_m}\right)^{-0{,}0446} ln\left(1{,}2 + \left(\frac{s}{s_f}\right)^{1{,}4}\right)^{-3{,}553} \alpha^{-0{,}477}, \quad (7)$$

где $Re_s = u_{max} s/\nu$ – число Рейнольдса; $u_{\max}$ – максимальная скорость потока в сжатом сечении оребрения, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; $f = \frac{A_c}{A_a} \Delta p \frac{2}{\rho u^2}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; A_a – площадь теплообмена, м^2; A_c – площадь сжатого проходного сечения, м^2; Δp – потери давления потока воздуха в теплообменнике, Па.

Анализ предложенных формул позволяет сделать следующие основные выводы использования жалюзийных ребер:

– теплогидравлическая эффективность оребрения увеличивается с ростом потока через жалюзи, величина которого определяется фронтальной скоростью воздуха и углом выгибки жалюзи,

– уменьшение шага ребра ведет к увеличению как теплоотдачи, так и аэродинамического сопротивления,

– эффективность использования площади теплообмена и объема оребрения снижаются с ростом числа Рейнольдса, но они не имеют монотонной связи с геометрическими параметрами, такими как шаг ребра и угол жалюзи.

Результаты сравнения падения давления при различных числах Рейнольдса для экспериментальных данных и расчетных зависимостей представлены на рис. 1.

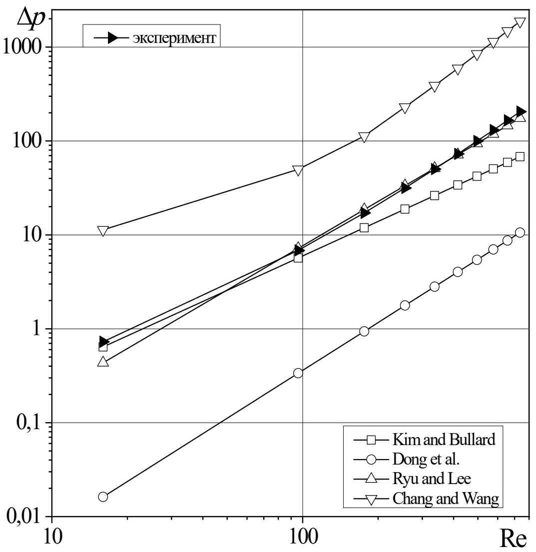


Рис. 1. Сопоставление падения давления при различных числах Рейнольдса для экспериментальных данных и расчетных зависимостей

Наибольшее совпадение с экспериментом получено по расчетным зависимостям Ryu and Lee, что позволяет рекомендовать использовать их для исследования теплообменников с жалюзийными ребрами.

Исследование поддержано БРФФИ Т21РМ-019 и проектом «Создание и развитие научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» соглашение № 075-15-2022-312.

Список литературы

1. Dong J., Chen J., Chen Z., Zhang W., Zhou Y. Heat transfer and pressure drop correlations for the multi-louvered fin compact heat exchangers // Energy Conversion and Management, No. 48, pp. 1506–1515, 2007.

2. Erbay L. B., Dogan B., Ozturk M. M. Comprehensive Study of Heat Exchangers with Louvered Fins // Heat Exchangers – Advanced Features and Applications, pp. 61–92, 2017.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ РЕБРА И МЕЖРЕБЕРНОГО РАССТОЯНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРИОДИЧЕСКИ ОРЕБРЕННОМ КАНАЛЕ

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

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
**vt@itp.nsc.ru*

В данной работе представлено систематическое численное исследование течения и теплообмена в одиночной межреберной ячейке с помощью LES- и RANS-моделирования. Влияние высоты и шага ребер исследовалось для чисел Рейнольдса от 5 000 до 20 000. Было показано, что изменение расстояния между ребрами оказывает большое влияние на теплопередачу ребристого канала. Установлено, что при w/h = 10 максимальное число Нуссельта практически перестает изменяться, поскольку соседние ребра оказывают слабое влияние друг на друга, при этом такое расстояние является оптимальным с точки зрения теплообмена. Увеличение высоты ребра приводит к значительному росту интенсивности теплообмена.

Методы увеличения теплопередачи необходимы во многих промышленных приложениях, поскольку они позволяют создавать компактные теплообменники с высокими тепловыми характеристиками. Пассивные методы интенсификации теплообмена являются более предпочтительными ввиду более простой реализации. К данным методам относятся использование вихрегенераторов различных форм, таких как лунки [1], уступы [2], ребра [3], табы [4] и т. д. Отрывные потоки, которые образуются вблизи вихрегенераторов, приводят к более интенсивному перемешиваю потока, таким образом повышая и интенсивность теплообмена. Но применение этих методов, как правило, приводит к увеличению гидравлических потерь.

Было проведено трехмерное численное моделирование отрывного турбулентного потока в плоском канале с периодическим оребрении. Число Рейнольдса было рассчитано по высоте канала и среднерасходной скорости. Численное моделирование проведено с использованием открытого пакета OpenFOAM. Решение уравнений, входящих в математическую модель, было выполнено с использованием модифицированного решателя pimpleFoam, который позволил в качестве расчетной области выбрать лишь часть канала. Численное моделирование производилось методами RANS и LES. В качестве модели замыкания для метода RANS была выбрана модель v2f, поскольку она показала себя наилучшим образом при расчете течений такого типа. Для LES-моделирования использовалась модель Смагоринского. На всех стенках канала и ребрах был задан постоянный тепловой поток, на входе и выходе в расчетную область – циклические граничные условия (рис. 1). Была проведена серия расчетов, в которой варьируемым параметром была высота ребер (d/H = 0.13 ÷ 0.66) и число Рейнольдса Re = 5 000 ÷ 20 000, где H – ширина канала, w/H = 2. Получены данные о динамике и теплообмене турбулентного течения в плоском канале при наличии периодических ребер.

На рис. 2 показана зависимость среднего по поверхности числа Нуссельта от высоты ребер и числа Рейнольдса. При увеличении высоты ребра среднее по поверхности число Нуссельта становится больше, а увеличение числа Рейнольдса приводит к интенсификации теплообмена.

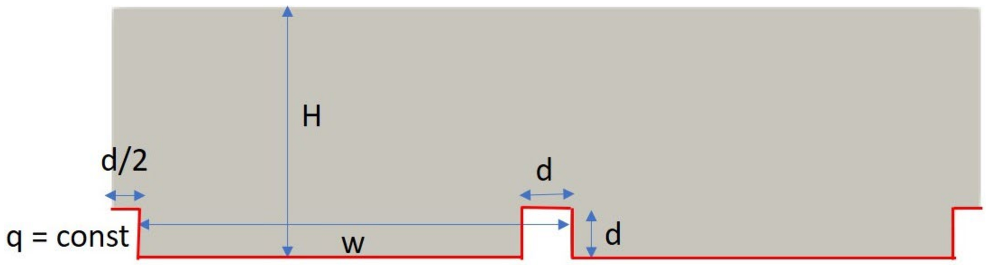
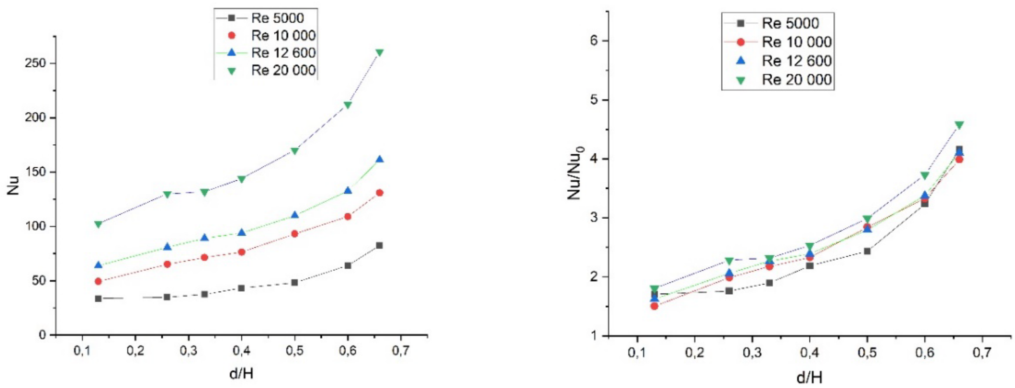


Рис. 1. Расчетная область



а б

Рис. 2. Зависимость: *а* – среднего по поверхности числа Нуссельта; *б* – отношения Nu/Nu_0, где Nu_0 – среднее по поверхности число Нуссельта в плоском канале

На рис. 2, *б* показано отношение среднего по поверхности числа Нуссельта в случае плоского канала с оребрением к числу Нуссельта в плоском канале. Из графика видно, что отношение чисел Нуссельта увеличивается с увеличением высоты ребра, при этом влияние числа Рейнольдса весьма небольшое.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. Wang S., Du W., Luo L., Qiu D., Zhang X., Li S. Flow structure and heat transfer characteristics of a dimpled wedge channel with a bleed hole in dimple at different orientations and locations // Int. J. Heat Mass Transf., vol. 117, pp. 1216–1230, 2018.

2. Jiang G., Shi X., Gao J. Study on flow and heat transfer characteristics of the mist/steam two-phase flow in rectan gular channels with 60 deg. ribs // Int. J. Heat Mass Tran., vol. 120, pp. 1101-1117, 2018.

3. Chen L., Asai K., Nonomura T., Xi G., Liu T. A review of Backward-Facing Step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control // Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 6 pp. 194–216, 2018.

4. Gao N., Sun H., Ewing D. Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs // Int. J. Heat Mass Transf., vol. 46, pp. 2557-2569, 2003.

НЕКОТОРОЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА НА РАБОЧЕМ УЧАСТКЕ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Д. А. Тупотилов, А. С. Демидов,
Д. А. Гроо, А. В. Захаренков, А. Т. Комов*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена на рабочем участке, подвергающемся значительным тепловым нагрузкам при его продольном охлаждении диспергированным потоком теплоносителя. Представлено краткое описание гидравлического контура и рабочего участка. Получены экспериментальные данные по распределению температуры по толщине рабочего участка, показано влияние расхода компонентов теплоносителя на изменение температуры мишени.

Одной из проблем, часто встречающейся в промышленности, является эффективное охлаждение элементов конструкций, подверженных высоким тепловым нагрузкам [1]. В работах [2, 3] авторы показали, что использование дисперсного потока в качестве теплоносителя при тепловых нагрузках в несколько мегаватт на квадратный метр (МВт/м^2) может быть перспективным методом охлаждения.

С целью изучения возможностей охлаждения двухкомпонентным диспергированным потоком на кафедре ОФиЯС была создана система охлаждения с возможностью удаленного подключения (рис. 1).

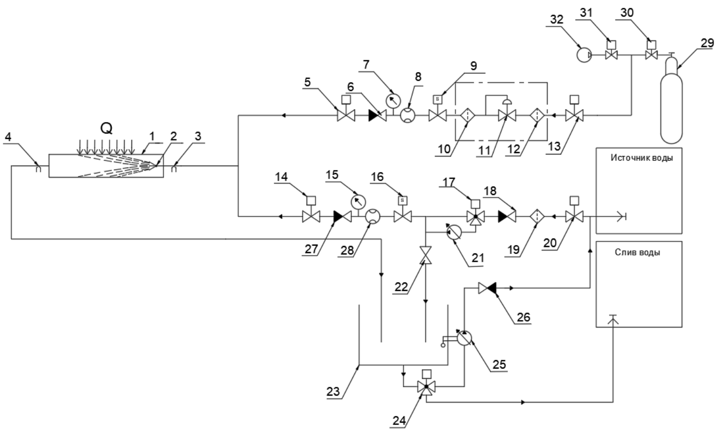


Рис. 1. Принципиальная схема контура охлаждения

Давление газа в системе охлаждения создается и поддерживается компрессором 32. На входе в пневматическую часть стенда стоит двухлинейный клапан с электропневматическим управлением. Поддержание стабильного давления газа в системе и защита от пульсаций компрессора осуществляется за счет редуктора 11. Фильтры грубой 12 и тонкой 10 очистки предотвращают попадание мелких частиц в элементы контура. Регуляция потока газа происходит с помощью регулятора с электрическим управлением 9. Расход рабочего газа измеряется расходомером 8. Манометр 7 служит для измерения давления газа. В случае впрыска жидкости в линию подачи воздуха предусмотрен обратный клапан 6. С помощью клапана с электропневматическим управлением 5 можно отключить пневматическую часть стенда.

Необходимый расход жидкого теплоносителя создает насос 25. Забор воды осуществляется из бака (сепаратора) 23. Расходомер 28 предназначен для измерения расхода жидкого теплоносителя, а установка требуемых параметров по расходу осуществляется с помощью регулятора потока с электрическим управлением 16. С помощью трёхлинейного клапана с электрическим управлением и насоса 21, в случае необходимости, можно поднять давление в системе. Манометр 15 показывает мгновенные значения давления в гидравлическом контуре. Температура на входе в рабочий участок 1 измеряется термопарой $T_{вх}$ 3, на выходе из РУ термопарой $T_{вых}$ 4. Под 2 обозначено распыливающее устройство. После РУ теплоноситель поступает в бак 23. Жидкая фаза проходит через трёхлинейный клапан 24 и либо возвращается насос 25, либо сливается.

Рабочий участок состоит из двух несущих трубок, выполненных из стали 12Х18Н10Т, и медной мишени с припаянной пластиной из молибдена, которая является приемником энергии пучка электронов. В мишени смонтированы 11 хромель-алюмелевых кабельных термопар, позволяющие фиксировать температурное поле в стенке мишени. Перед проведением испытаний была выполнена калибровка всех термопар.

В результате экспериментов было получено распределение температуры по толщине рабочего участка для различных параметров компонентов дисперсного потока теплоносителя (рис. 2, 3).

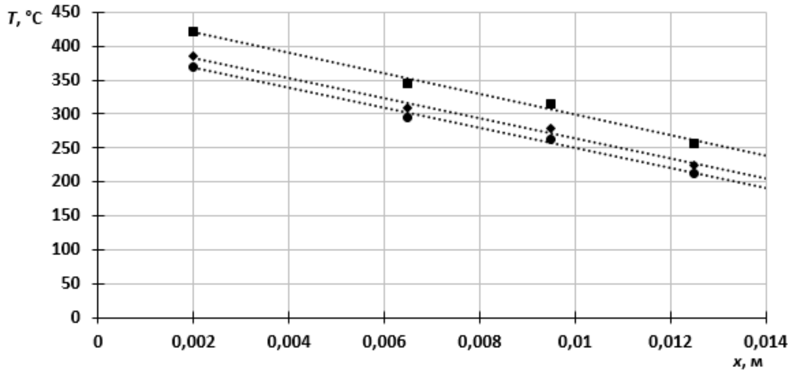


Рис. 2. Распределение температуры стенки по толщине рабочего участка ($Q_{воды}$= 0,000065 м^3/с) при различных значениях объемного расхода рабочего газа: ■ – $Q_{возд}$ = 0,0005 м^3/с, ♦ – $Q_{возд}$ = 0,00091 м^3/с, ● – $Q_{возд}$ = 0,00133 м^3/с

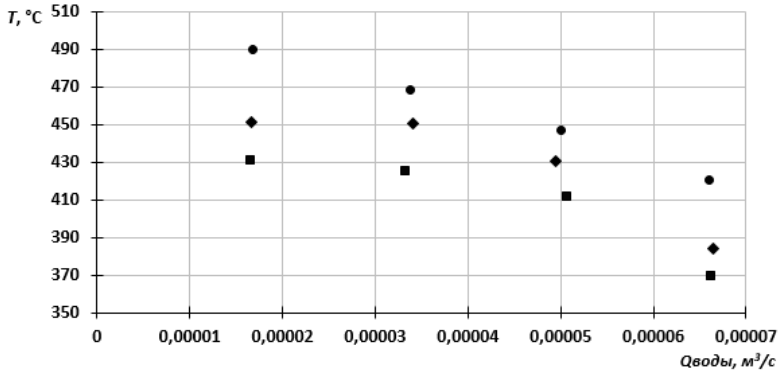


Рис. 3. Зависимости показаний одной из термопар от объемного расхода водяной компоненты диспергированного потока: ■ – $Q_{возд}$ = 0,0005 м^3/с, ♦ – $Q_{возд}$ = 0,00091 м^3/с, ● – $Q_{возд}$ = 0,00133 м^3/с

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (соглашение № 21-79-10179).

Список литературы

1. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling–Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes and critical heat flux //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. Pp. 1174–1205.

2. Lyublinski I. E., Mirnov S. V., Komov A. T. et al. Innovative method of cooling and thermostabilization of tokamak elements with capillary-porous struc-tures // J. of Phys-ics: Conf. Se-ries. 2017. Vol. 891(1). Pp. 012152.

3. Vertkov A. V., Komov A. T., Lyublinski I. E. et al The use of dispersed gas-liquid flow for cooling of the toka-mak t-10 liquid metal limiter // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion. 2018. 41(1). Pp. 57–64.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ ДЛЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СУПЕРЭВМ С ТЕПЛООТВОДОМ НА БАЗЕ КОНТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБОК

Э. Р. Ханбеков[*]*

ЗАО «НОРСИ-ТРАНС»
127015, Российская Федерация, Москва, ул. Б. Новодмитровская, 12, стр. 15
[*]*e.khanbekov@norsi-trans.ru*

Вычислительные кластера на воздушном охлаждении с программным обеспечением междисциплинарного моделирования для обеспечения решения и исследования задач аэрогидродинамики, теплопереноса и фазовых переходов, а также высокомощные вычислительные комплексы (суперЭВМ) с теплосъемом и теплоотводом на базе контурных тепловых трубок.

Для решения задач междисциплинарного моделирования (CAE) и обеспечения исследовательской деятельности необходимы значительные вычислительные ресурсы. Разработаны многомодульные вычислительные шасси на базе воздушного охлаждения с поддержкой до 8 центральных процессоров в 2U монтажного пространства 19' форм-фактора, до 180 Вт на процессор (по итогам расчетов воздушных потоков и натурным испытаниям). Отлажен программный стек из российской операционной системы, распределенной системы хранения данных на базе Lustre, системы планирования ресурсов на базе Slurm с запуском солверов из состава CAE пакета Тесис FlowVision, включая различные режимы разделения ресурсов кластера. Разработанное оборудование позволяет строить системы до 150-170 ТФ FP64 на воздушном охлаждении (зависит от температуры входящего воздушного потока).

При увеличении мощности и плотности размещения вычислительных ресурсов помимо собственно задач, связанных с гарантированным стабильным электропитанием всех узлов, существует задача эффективного теплосъема и теплопереноса (теплосброса) тепла с центральных процессоров, сопроцессоров, модулей ОЗУ и т.д. Типовая мощность современных передовых многоядерных процессоров 400 Вт в режиме максимальной нагрузки, сопроцессоров – 500Вт с ростом до 600 Вт в течение 1-2 лет на типовые модели. Для решения аналогичной задачи в изделиях суперЭВМ в мире используется прямое жидкостное охлаждение с циркуляцией жидкости под давлением в трубках и микроканалах интерфейсов теплосъема и последующим отводом циркулирующей нагретой жидкости на дальнейший теплосброс в окружающую среду. Увеличение мощности источников тепла связано с увеличением как теплоемкости теплоносителя (агрессивная среда), так и давления в контуре для увеличения объема жидкости (л/мин). Разработано и испытано альтернативное решение на базе технологии аммиачных контурных тепловых трубок (КТТ, необслуживаемых герметичных приборов), интегрированных в корпус вычислительного узла суперЭВМ нового поколения. Решение включает интерфейсы теплосъема с основных источников тепла (центральные процессоры) на базе аммиачных контурных тепловых трубок, второстепенных (модули питания, МОП транзисторы, VRM, микросхемы карты расширения) на базе тепловых трубок с объединением в одну общую систему. Теплосброс с интерфейсов конденсаторов в интегрированные в корпус жидкостные теплообменники, подключаемые через быстроразъемные соединители к внешним жидкостным шинам. Теплосъем внутри теплообменника выполняется непосредственным омыванием интерфейсов конденсаторов теплоносителем (смесь воды и этиленгликоля). Созданное решение позволяет строить суперЭВМ на базе разработанной системы теплосъема с нагрузкой до 100 кВт на вычислительный шкаф с кратно меньшим расходом жидкости (л/мин) и давлением в системе для теплосъема, чем в системах с прямым жидкостным охлаждением. Испытана работа на 20 и 40 градусах поступающей температуры теплоносителя с проверкой гарантированного теплосъема при предельной нагрузке на все процессоры и прочие источники тепла. Переход на печатные платы с центральными процессорами, сопроцессорами другого форм-фактора выполняется за счет смены топологии трассировки участков контурных тепловых труб внутри корпуса, а также интерфейсов теплосъема. Разработана механическая компоновка высокомощных вычислительных узлов с интегрированной системой электропитания, конструкция вычислительных шкафов с системой распределения питания, внутренние шины и высокоточные преобразователи уровней напряжения, источники питания, жидкостные шины с быстроразъемными соединителями. Конструкция вычислительных узлов позволяет создавать и запускать как системы только на универсальных процессорах, так и с векторно-матричными сопроцессорами, включая установку в одном шкафу различных блоков вычислителей, т.е. предоставлять возможность выбора баланса при планировании построения суперЭВМ между производительностью на универсальных процессорах и на векторно-матричных сопроцессорах. Доступная производительность на универсальных процессорах порядка 570 ТФ FP64 на шкаф с линейным наращиванием производительности при доустановке шкафов. Использование 40 градусного теплоносителя во внешнем контуре дает возможность запускать суперЭВМ на базе круглогодичного фрикулинга. Созданное решение позволяет кратно сокращать затраты на запуск мощных суперЭВМ в сравнении с технологиями как прямого жидкостного, так и иммерсионного охлаждения за счет низкого расхода жидкости, малого перепада давления во внешней системе, а также за счет возможности работы на круглогодичном фрикулинге (значительное упрощение инженерной инфраструктуры площадки размещения оборудования по сбросу тепла в окружающую среду, а также возможность использования нагретой жидкости для вторичных целей – отопление и т.д.). В т.ч. за счет фрикулинга предоставляется возможность работы суперЭВМ в жарком климате.

Оборудование вычислительных кластеров на воздушном охлаждении и суперЭВМ производится на собственных производственных площадках.

Приглашаем Заказчиков за расчетом проектов компактных и средних вычислительных, а также мощных вычислительных комплексов.

Секция 4
«Возобновляемая и альтернативная энергетика»

ТЕХНОЛОГИЯ СОВМЕСТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ И ПОПУТНЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ (ПРИРОДНОГО ГАЗА)

Т. С. Айнуллов[1], В. М. Зайченко[2], Р. Н. Маганов[1], Г. А. Сычев[2⁑], А. А. Чернявский[2] *

[1]ПАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина
423450, Российская Федерация, Альметьевск, ул. Ленина, 75
[2]Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
⁑ george.sytchev@gmail.com

В докладе представлены предложения по совместной технологии получения водорода и чистых углеродных материалов при совместной переработке биомассы и попутных нефтяных газов (ПНГ), природного газа, в том числе низкодебитных месторождений. Разрабатываемая технология характеризуется высокими технико-экономическими показателями.

Водород может быть получен в больших количествах в процессе производства пиролитического углерода (пироуглерода) из отходов биомассы и бросовых попутных нефтяных газов (ПНГ), а также малоценного природного газа низкодебитных газовых месторождений по технологии [1]. Использование ПНГ позволит получить значительное количество энергии и уменьшить наносимое ими вредное влияние на природное равновесие.

Суть данной технологии заключается в совмещении процессов получения из биомассы древесного угля (биоугля) и заполнения его пор углеродом, входящим в состав ПНГ или природного газа низкодебитных газовых месторождений. Технология реализуется в одном аппарате. В реактор сверху подается биомасса (древесные отходы), которые под собственным весом движутся сверху вниз. Природный газ подается снизу-вверх и двигается в противотоке с засыпкой из биомассы. В нижних и средних горизонтах реактора температура достигает 1000 °С. При этой температуре происходит термическое разложение природного газа. Образующийся при этом углерод заполняет поры попадающего в эту зону биоугля, образование которого происходит в верхних горизонтах реактора при взаимодействии высокотемпературных газообразных продуктов реакции с засыпаемой биомассой. Выгрузка готового материала осуществляется в нижней части реактора.

Новая технология позволяет производить из углеводородных газов одновременно с водородом материалы, имеющие высокий спрос на рынке. Стоимость этих материалов окупает все затраты, в том числе и стоимость получаемого водорода. Даже без учета стоимости водорода сроки окупаемости данной технологии не превышают трех лет. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования [1–3] позволили определить и смоделировать основные стадии процесса получения чистых углеродных материалов при термическом разложении углеводородов в среде продуктов термической деструкции отходов растительного происхождения.

Попутный нефтяной газ – это природный углеводородный газ, находящийся в «шапках» нефтяных и газоконденсатных месторождений или растворенный в нефти. Количество ПНГ в одной тонне нефти – от одного-двух до нескольких тысяч кубометров. По данным Министерства природных ресурсов и экологии (МПР) лишь 26 % ПНГ направляется на переработку. Остальное идет на нужды промыслов, а также сжигается в факелах. Ежегодно в России в факелах сжигается порядка 20 млрд нм^3 ПНГ [1]. По расчетам МПР из-за сжигания ПНГ Россия ежегодно теряет около 140 млрд рублей.

Кроме того, при технологических потерях и сжигании в факелах в атмосферу выбрасывается диоксид углерода и активная сажа. Газ в факелах сгорает не полностью, поэтому в атмосферу выделяется метан, являющийся гораздо более активным парниковым газом, чем CO_2. Экономические и экологические аспекты делают рациональное использование ПНГ важной народно-хозяйственной задачей. ПНГ состоит, в основном, из метана CH_4, который в процессе пиролиза при высокотемпературной термической деструкции разлагается на две составляющие – углерод и водород:

$$CH_4 = C + 2H_2. \quad (1)$$

В соответствии с результатами теоретических и экспериментальных исследований [2, 3] установлено, что удельный расход ПНГ для получения одной тонны пироуглерода – $m_{пнг}$ = 950 кг/т. Поэтому количество пироуглерода, которое может быть получено из ПНГ, сжигаемого сегодня в факелах в объемах $V_{пнг} = 20 \cdot 10^9$ нм^3, составит:

$$M_{пу} = \gamma_{пнг} \cdot V_{пнг} / m_{пнг}, \quad (2)$$

где $\gamma_{пнг}$ – плотность ПНГ при нормальных условиях (t = 273K =0 °С, $P_{изб}$ = 0 МПа).

Поскольку $\gamma_{пнг}$ = 0,714 кг/нм^3, в соответствии с выражением (2), находим:

$$M_{пу} = 0{,}714 \cdot 20 \cdot 10^9 / 950 = 15{,}0 \cdot 10^6 = 15{,}0 \text{ млн т / год}$$

Поэтому использование ПНГ позволит покрыть и все внутренние нужды в чистых углеродных материалах в РФ и все экспортные потребности для стран ЕС. На перспективу остаются еще возможности использования низкодебитных газовых месторождений, имеющихся в России в избытке. Количество водорода, которое можно получить попутно при производстве пироуглерода на базе ПНГ, может быть рассчитано в соответствии с выражением (1):

$$M_{H2} = M_{пнг} \cdot (4m_o^H / (4m_o^H + m_o^C)), \quad (3)$$

где M_{H2} – масса получаемого водорода; $M_{пнг}$ – масса используемого попутного нефтяного газа; m_o^H – относительная атомная масса водорода; m_o^C – относительная атомная масса углерода.

В свою очередь:

$$M_{пнг} = \gamma_{пнг} \cdot V_{пнг} = 0{,}714 \cdot 20 \cdot 10^9 = 14{,}28 \cdot 10^9 \text{ кг} = 14{,}28 \text{ млн т/год}. \quad (4)$$

Из выражения (3), с учетом равенства (4) и общеизвестных значений $m_o^H = 1{,}0$ и $m_o^C = 12{,}0$, находим:

$$M_{H2} = 14{,}28 \cdot (4 / (4 + 12)) = 3{,}57 \text{ млн т / год}.$$

Поскольку плотность водорода для нормальных условий γ_{H2} = 0,089 кг/нм^3, то количество получаемого водорода в объемном исчислении составит:

$$V_{H2} = M_{H2} / \gamma_{H2} = 3{,}57 \cdot 10^6 / 0{,}089 = 40 \cdot 10^6 = 40 \text{ млн нм}^3 \text{ / год}.$$

Отметим, что в 2020 г. в мире было произведено 75 млн т или 840 млн нм^3 водорода, который использовался в основном в нефтепереработке и при производстве аммиака [1]. Таким образом, только путем утилизации сжигаемого в РФ в факелах ПНГ можно закрыть порядка 5 % мировой потребности в водороде. Согласно утвержденной в 2021 г. «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации», планируется создание в РФ водородных кластеров для экспорта водорода на первом этапе (к 2024 г.) – в объеме 0,2 млн т / год, на втором этапе (к 2035 г.) – порядка 2,0 млн т / год. Эти задачи вполне могут быть решены при создании производства пироуглерода с использованием ПНГ, обеспечивающим получение попутного водорода в объеме до 3,57 млн т/год (см. выше).

Важно также отметить, что при получении пироуглерода и водорода по предлагаемой технологии полностью исключены какие-либо вредные выбросы в атмосферу. Это следует из основной реакции высокотемпературной деструкции ПНГ – (1).

Список литературы

1. Зайченко В. М. и др. Развитие водородной энергетики в России. М.: Недра, 2021. 71 с. ISBN 978-5-8365-0513-4.

2. Директор Л. Б., Майков И. Л., Зайченко В. М., Кудрявцев М. А., Сокол Г. Ф., Шехтер Ю. В. Моделирование процессов термического разложения природного газа. Препринт № 2-452. М., 2001. 60 с.

3. Director L. B., Maikov, I. L. Zaichenko V. M. A Theoretical Study of Heterogeneous Methane Reaction Processes // Proceedings of the Twelfth International Heat Transfer Conference, Grenoble, France, 2002, p.929-934.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДИВНОГОРСКА С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

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

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

Исторической особенностью экологически чистой системы теплоснабжения г. Дивногорска Красноярского края является использование электрических котлов, эксплуатация которых в современных условиях является экономически затратной. Одним из способов снижения расходов может стать применение тепловых насосов парокомпрессионного типа (ПКТН), доказавших свою эффективность при использовании тепла холодной воды озера Байкал [1]. Вода в многоводной реке Енисей не замерзает в течение всего года (рис. 1), что позволяет при соответствующей модернизации ПКТН использовать ее термический потенциал для создания теплонасосной системы теплоснабжения.

Среднегодовая температура воды на побережье в Дивногорске составляет 9,0 °С, а по временам года: зимой 3,0 °С, весной 7,1 °С, летом 18,9 °С, осенью 7,0 °С. Минимальной температура воды 2,3 °С в Дивногорске бывает в октябре, а максимальной в июле 24,3 °С.

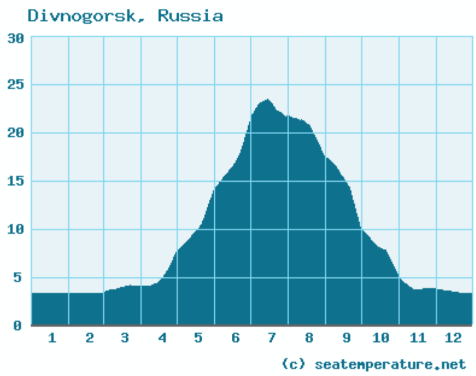


Рис 1. Годовой график средней температуры воды реки Енисей вблизи Дивногорска [2]

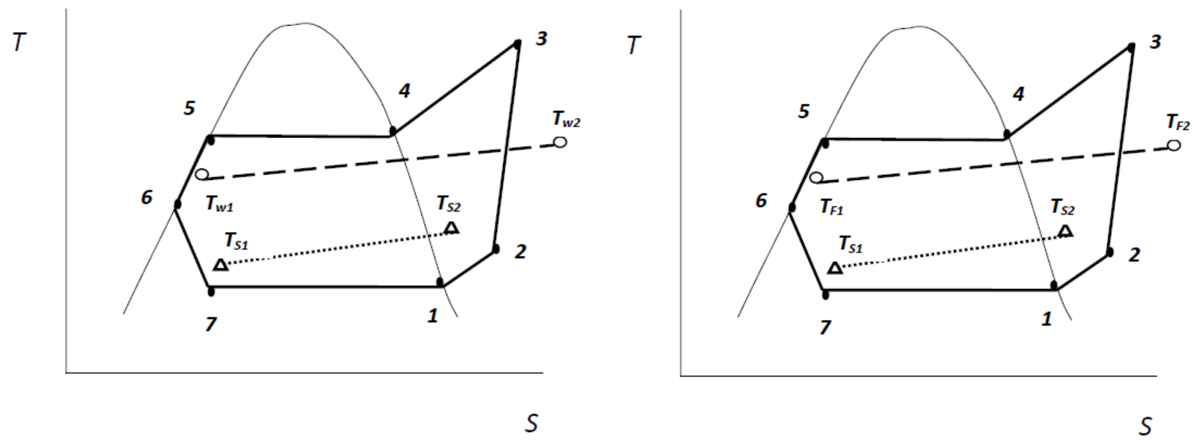
Расчет термодинамических циклов ПКТН (рис. 2), позволил получить текущие значения коэффициентов преобразования тепловой энергии холодной речной воды в теплоту нагрева теплоносителей систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) в межотопительном периоде. На рис. 2 температура T_{S1} принята равной средней температуре воды в реке Енисей (см. рис. 1), T_{W1} и T_{W2} соответствуют графику подачи тепла 95/70 °С.

Расчет значений коэффициента преобразования ПКТН для рабочих циклов (рис. 2) производился по формуле

$$\varphi = \frac{q}{l} = \frac{h_3 - h_5}{h_3 - h_2},$$

где q – количество теплоты, отпущенное потребителю; l – затраты на сжатие рабочего тела R134a в компрессоре; h – энтальпия R-134a в узловых точках цикла.

В межотопительном периоде (с 15 мая по 15 сентября, только ГВС) расчетные значения коэффициента преобразования φ = 5, 53–7,5 при среднем значении за этот период $\varphi_{ГВС}$ = 6,8.



режим отопления:
$T_5 - T_6$ =3°C; $T_{S1} - T_{S2}$=2°C; $T_5 - T_{W2}$=5°C; $T_{S2} - T_7$ =1°C; $T_5 \leq 65$°C

режим ГВС:
T_5 = 60 °C; $T_7 - T_6$ = 3 °C; T_{F1} = 15 °C (июнь, июль, август), T_{F1} = 5 °C (май, сентябрь); $T_{S1} - T_{S2}$ =2 °C; T_{F2} = 55 °C; $T_5 - T_6$ = 3 °C

Рис. 2. Расчетные термодинамические циклы ПКТН в координатах «температура – энтропия» при работе на *R*-134a

С учетом низкой температуры воды в реке Енисей среднее значение показателя энергетической эффективности ПКТН в отопительном периоде $\varphi_{ОТ.}$~ 3,5 до температуры наружного воздуха –10 °C при максимальном нагреве теплоносителя до 60 °C. В режиме отопления принимаем, что дальнейший нагрев теплоносителя от 60 до 95 °C производится только электрокотлами. Но этот период работы с учетом температур стояния наружного воздуха (табл. 1) является сравнительно небольшим, что также обеспечивает экономию электроэнергии в системе «ПКТН +электрокотел».

Таблица 1

Число часов за отопительный период со среднесуточной температурой наружного воздуха, равной и ниже данной [2]

Город	Температура, °C										
	Ниже –45	–40	–35	–30	–25	–20	–15	–10	–5	0	+8
Красноярск	1	18	82	210	468	826	1360	2110	3000	4050	5650

С учетом совместных затрат электроэнергии на работу ПКТН и электрокотлов с КПД=95 % произведена оценка экономии электроэнергии при использовании ПКТН в отопительном и межотопительном периодах для теплоснабжения прибрежной зоны города Дивногорска.

Выводы:

1. В межотопительном периоде ПКТН позволяют без применения электрокотлов обеспечить горячее водоснабжение с экономией электроэнергии до 1050 кВт·ч /Гкал.

2. В отопительном периоде совместное использование ПКТН и электрокотлов для отопления условного потребителя с расчетной нагрузкой 1,0 Гкал/ч по графику качественного регулирования 95/70 °С экономия электроэнергии составит до 1240 МВт·ч.

Список литературы

1. Елистратов С. Л., Накоряков В. Е., Клер А. М., Маринченко А. Ю. Тепловые насосы для теплоснабжения в рекреационных зонах // Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий / под общей ред. чл.- корр. РАН С. В. Алексеенко. Новосибирск: Наука, 2009. С. 184–193.

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

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ МОНГОЛИИ

С. Батмунх[⁑], [*], Х. Буртжин[*]

Монгольский государственный университет науки и технологий
14191, Монголия, Улан-Батор, пр. Бага тойруу, 34
[⁑] batmunkh_acad@yahoo.com

В докладе дана краткая характеристика резко континентальным климатическим условиям Монголии, описаны ресурсы солнечной и геотермальной энергии. Приведены энергетические и теплофизические аспекты использования возобновляемых энергоресурсов в условиях холодного климата, карта зонирования территории Монголии, результаты некоторых расчетных и экспериментальных исследований по применению солнечного и геотермального обогрева зданий. В докладе для оценки эффективности солнечного и геотермального теплоснабжения в качестве показателя выдвинуто соостношение числа градусо-дня отопления и прихода суммарной солнечной радиации за год для данной местности. Выделены четыре зоны по эффективности использования солнечной энергии для отопления зданий.

В настоящее время коммунальная энергетика потребляет значительное количество энергетических ресурсов и является значимым источником парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду. Одним из новых подходов снижения ее негативных сторон может быть применение для целей теплоснабжения повсеместно присутствующих возобновляемых энергетических ресурсов, таких как солнечная энергия и другие виды низкопотенциальных тепловых энергий окружающей среды.

Природно-климатические условия территории Монголии. Территория Монголии находится в центре Азиатского континента и отличается резко континентальными климатическими условиями. Индекс континентальности климата находится в пределах 70–91 %. В отопительном периоде разница между максимальной дневной и минимальной ночной температурами изменяется от 9 до 16 °С. Годовая разность температур между средними крайними ее значениями доходит до 80 °С.

Возобновляемые энергетические ресурсы (ВЭР) территории Монголии. Годовой приход суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, для территории Монголии оценивается в пределах 1500–2200 кВт·ч/м^2. Значения прямой солнечной радиации, падающей на перпендикулярную к лучам солнца поверхность, составляет 2800–3000 кВт·ч/м^2.

Плотность геотермального теплового потока на территории Монголии находится в пределах от 30 до 110 мВт/м^2 и для большинства ее территорий 60–80 мВт/м^2, что можно считать достаточным для использования в теплоэнергетических целях. Среднее значение этого показателя для суши оценивается в 65 мВт/м^2.

Современные исследования по использованию ВЭР для теплоснабжения. В связи с холодными климатическими условиями теплоснабжение в стране обладает высокой социальной и экономической значимостью. Основным видом топлива, применяемым в теплоэнергетике Монголии, является ископаемый уголь.

Поэтому возникает необходимость поиска альтернативных подходов к вопросам теплоснабжения. Из-за климатических условий для повышения эффективности теплоснабжения здания необходимо пресмотреть соответствующие требования энергоэкономичности зданий. Для зданий, использующихся, например, солнечное отопление, этот показатель должен быть не более 40–70 кВт/м^2·год. В общем случае основным энергоклиматическим показателем здесь может являться соотношение (θ) прихода суммарной солнечной радиации и годовых теплопотерь зданий, характеризуемых градусоднем отопления (*HDD*) местности.

$$\theta = Q/T, \tag{1}$$

где Q – годовой приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2; T – градусо-день отопления, ºС.

Для чего на основе метеоданных нами получена карта распределения градусодней отопления, который характеризует теплопотребление зданий на его обогрев для климатических условий местности и показывает суммарную продолжительность разности стандартной (опорной) температуры помещения и температуры наружного воздуха за отопительный сезон, рассчитанной с учетом ее суточного изменения.

При переходе от севера на юг T уменьшается, а если рассмотреть использование солнечной энергии, то Q увеличивается, что указывает на повышения эффективности применения солнечного отопления зданий.

На рис. 1 по отдельным пунктам отмечены значения показателя θ. Желтыми линиями показаны изолинии годовой суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, для значений 1200, 1300, 1400, 1500 и 1600 кВт·ч/м^2.

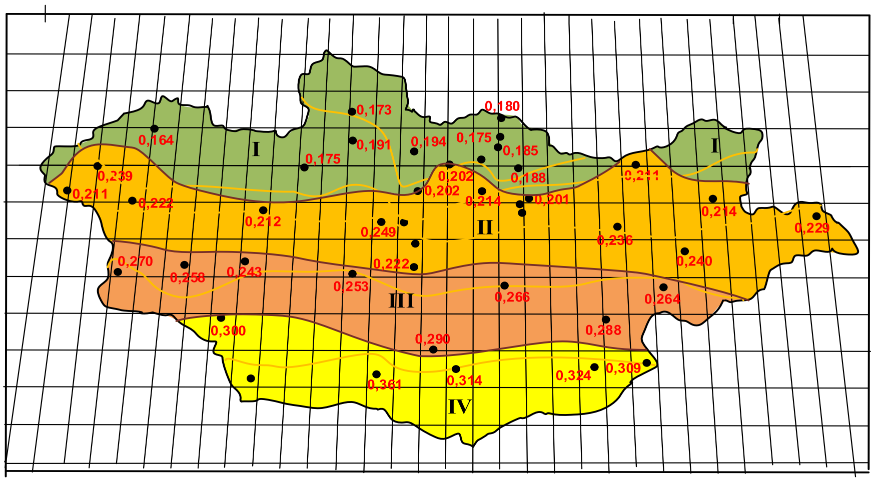


Рис. 1. Зонирование территории Монголии
по эффективности использования солнечной энергии для обогрева зданий

В качестве примера, иллюстрирующего применение солнечного теплоснабжения, приведены данные, полученные для здания средней школы на 320 мест (табл. 1).

Таблица 1

Теплопроизводительность гелиосистемы и тепловой баланс здания по месяцам отопительного периода, кВт·ч

Показатель	Месяц						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Теплопроизводительность гелиосистемы	1373,3	1064,7	947,0	1031,7	1275,6	1537,2	2103,7
Теплопотребление здания на отопление	398,5	732,9	968,2	1030,8	923,6	645,8	356,6
Горячее водоснабжение	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9	282,9

Окончание табл. 1

Показатель	Месяц						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Общее теплопотребление школы	681,4	1015,8	1251,1	1313,7	1206,5	928,7	639,5
Суточный баланс тепловой энергии (+/–)	+691,9	+48,9	–304,1	–282,0	+69,1	+608,5	+1464
Баланс тепловой энергии за месяц (+/–)	+20797	+1516	–9123	–8742	+2142	+17038	+43920

Также для центральной зоны Монголии нами оборудовано здание аналогичной школы теплонасосным оборудованием геотермического теплоснабжения, получены удовлетворительные результаты. Уже несколько лет система используется.

Большую роль солнечная энергетика может сыграть и в обеспечении надежности и качества электроэнергии потребителей, подключенных к системе централизованного электроснабжения.

МЕТОДИКА ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЦИКЛИЧЕСКИЙ ДВИЖИТЕЛЬ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д. В. Вавилов[1‡], А. В. Сентябов[1, 2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
‡ exceptme@ya.ru

В работе рассмотрен способ определения инерционных и аэродинамических сил, действующих на лопасть циклического движителя летательного аппарата. Представленный способ основан на переносе результатов моделирования аэродинамики обтекания движителя в модуль моделирования динамики твердых тел. Результаты моделирования позволяют на этапе проектирования оценить массовые и прочностные характеристики проектируемого циклического движителя.

Синтез геометрии циклических движителей (рис. 1) при проектировании летательных аппаратов на их основе сопряжен с рядом задач, решаемых при помощи средств вычислительного моделирования. Одним из основных и наиболее нагруженных элементов конструкции циклического движителя является лопасть. На лопасть действуют две основные силы – аэродинамические усилия и инерционные. При этом если инерционные нагрузки, действующие на элементы конструкции движителя, определяются достаточно просто, то определение аэродинамических нагрузок на лопасть представляет некоторые сложности ввиду сложного колебательного движения, которое лопасть совершает за один оборот. В работах [1–3] описан способ моделирования аэродинамического обтекания движителя в набегающем потоке.

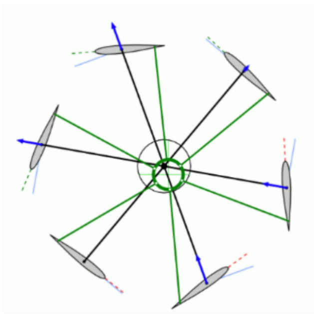


Рис. 1. Схема циклического движителя

Основным результатом, получаемым при моделировании набегающего потока, являются мгновенные значения сил и моментов, действующих на лопасть за оборот движителя (рис. 2). Полученные значения передаются в модуль расчета динамики жестких тел. Данный модуль позволяет моделировать динамику механизма с учетом его инерционных характеристик, а перенесённые с CFD-расчета усилия и моменты позволяют учесть аэродинамические силы, действующие на циклический движитель (рис. 3).

Рис. 2. График обобщенной силы, действующей на лопасть

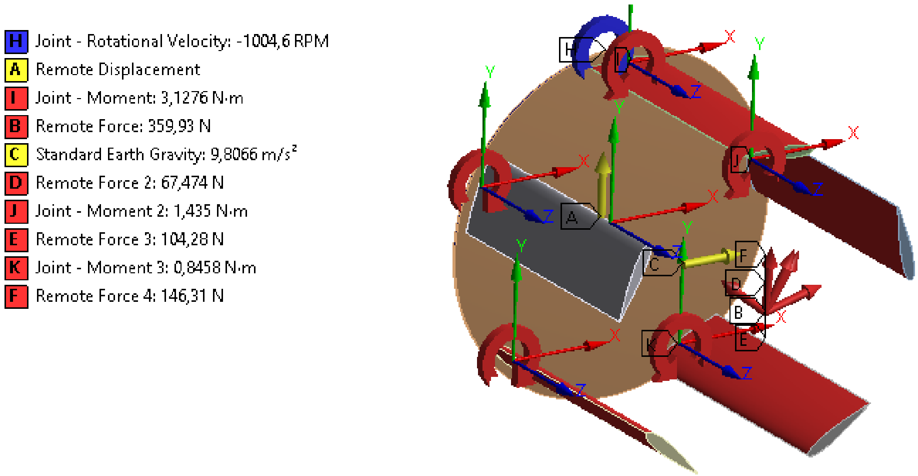
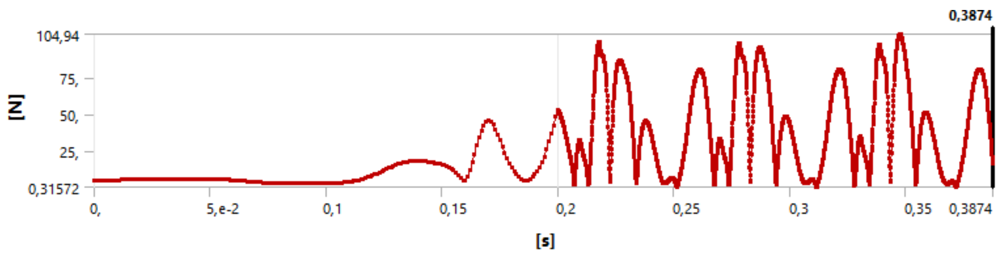
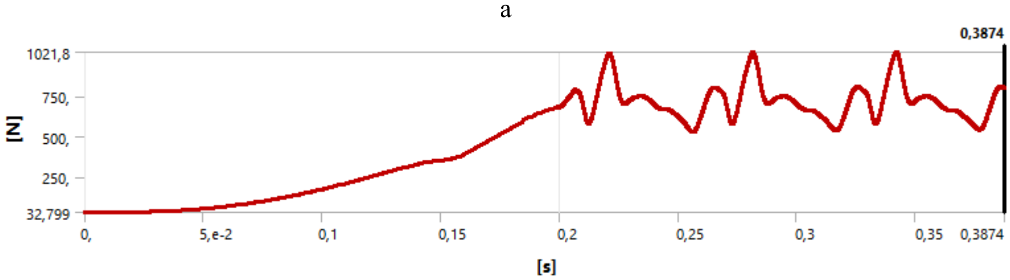


Рис. 3. Силы и моменты, приложенные к модели

В результате моделирования динамики твердых тел получены реакции в опорных элементах, которые можно использовать для более детального поэлементного проектирования высоконагруженных узлов циклического движителя. Графики реакций для одной лопасти показаны на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Графики реакций для одной лопасти при скорости набегающего потока 50 м/с:
а – в управляющей тяге; *б* – в оси крепления лопасти

Разработанная методика проектного расчета усилий, действующих на циклический движитель, позволяет на этапе синтеза геометрии оценить массовые характеристики летательного аппарата.

Список литературы

1. Carlos M. Xisto, J. A. Leger, J. C. Páscoa, L. Gagnon, P. Masarati; D. Angeli; and A. Dumas. Parametric Analysis of a Large-Scale Cycloidal Rotor in Hovering Conditions // Journal of Aerospace Engineering, vol. 30(1), 04016066, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000658

2. Iosilevskii G. and Levy Y. Aerodynamics of the cyclogiro // 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA 2003-3473, 2003, Orlando, Florida, US.

3. Iosilevskii G. and Levy Y. Experimental and numerical study of cyclogiro aerodynamics // AIAA J, vol. 44(12), pp. 2866–2870, 2006.

ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Н. Г. Винаковская, Д. И. Биличак* *

Дальневосточный федеральный институт
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
**nbilichak@list.ru*

В статье предлагается общий обзор отрасли солнечной энергетики в России, описывается ее состояние сейчас и развитие в будущем.

С каждым годом увеличивается потребность в энергии для человечества, а запасы традиционных видов топлива (нефть, уголь, газ и т. д.) исчерпываются. Вместе с тем электростанции, работающие на традиционных видах топлива, вносят до 30 % от общего объема вредных выбросов в атмосферу и загрязняют землю, воду и другие сферы жизнедеятельности. Есть два пути решения этих проблем: ресурсосбережение и использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

ВИЭ – источники, которые основаны на постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека и это является ее отличительным признаком.

Одним из самых доступных возобновляемых источников является солнечная энергия. Солнечные батареи представляют собой фотоэлектрические элементы, которые под воздействием солнечных лучей генерируют электрическую энергию. Несмотря на приведенные доводы, что солнца в России мало, поэтому устанавливать солнечные панели в большинстве регионов нет смысла, что лучше добывать нефть, газ – ископаемые виды топлива, относящиеся к невозобновляемым источникам энергии, по информации Минэнерго, рентабельны все установленные СЭС, в том числе в регионах, где сравнительно мало солнечных дней. Окупаемость в большей степени зависит от стоимости электроэнергии, нежели от уровня инсоляции. Инсоляция, или удельная выработка 1 кВт, в России варьируется от 800 кВт·ч в год в Мурманске до 1 500 кВт·ч в год в Забайкальском крае, подчеркнули в ведомстве.

В России большие проекты в солнечной энергетике стали появляться после принятия в 2013 г. правительственной программы, стимулирующей использование объектов ВИЭ на оптовом рынке электроэнергии. Первый объект промышленной СЭС мощностью 5 МВт был построен на Алтае в 2014 г.

Доля солнечной энергетики в структуре генерирующих мощностей пока остаётся скромной – всего 0,55 % от общей выработки электричества. Но ситуация быстро меняется. Российские солнечные электростанции в 2019 г. выработали 1,3 млрд кВт·ч электроэнергии – почти на 70 % больше, чем годом ранее. Наибольшую долю в балансе энергосистемы солнечные станции занимают на юге страны, где на них приходится 2,77 % установленной мощности [1].

По данным исследования компании «Умная энергия», мощность солнечных электростанций СЭС, построенных в стране бизнесом за 2020–2021 гг., выросла в два раза – с 20,2 до 45,2 МВт, а объем инвестиций, вложенных юридическими лицами в развитие солнечной энергетики, превысил 2,5 млрд рублей. По состоянию на январь 2022 г., согласно данным Минэнерго России, в Единой энергосистеме РФ доля солнечных электростанций (СЭС) составила 1,962 ГВт, или 0,78 % от суммарной мощности электростанций 246,55 ГВт [2]. У России огромный потенциал: объем солнечной энергии, поступающей на территорию страны за три дня, сравним с объемом годового производства электроэнергии. Уровень инсоляции варьируется от 810 кВт·ч / кв м в год в отдаленных северных районах до 1400 кВт·ч / кв. м в год в южных районах, в Сибири и на Дальнем Востоке. Московская и Ленинградская области имеют репутацию пасмурных регионов. Однако выработка энергии там составляет порядка 1000 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности солнечной генерации в год. Это ниже, чем в более благоприятных для развития отрасли регионах России, но сопоставимо с показателями, например, Германии, которая входит в пятерку мировых лидеров по установленной мощности солнечной генерации.

Предрассудок о невозможности развивать солнечную энергетику в холодных российских регионах не только не корректен, но и прямо противоречит инженерным расчетам. С технической точки зрения большое количество солнечных дней в сочетании с холодной температурой позволяет фотоэлектрическим модулям вырабатывать даже больше энергии, чем в жару.

Этот принцип пока мало применим на морозе ниже минус 30 °С. Хотя уже существуют сверхпрочные фотовольтаические компоненты, которые способны работать даже в условиях крайне низких температур. Например, в Якутии существует около двух десятков солнечно-дизельных станций, которые особенно эффективны во время полярного дня. Они вырабатывают энергию даже в то время, когда на несколько месяцев температура опускается до минус 50 °С [3].

Эффективность солнечной энергетики продолжит повышаться, а одно из перспективных направлений – это перовскиты, полупроводники с особой кристаллической структурой. Если сейчас средний КПД солнечных ячеек составляет 22 %, то благодаря перовскитам он может превысить 27 %. Исследования, которые помогут внедрить перовскиты в энергетику, ведутся и в России. Например, учёные МГУ улучшили метод сборки перовскитных солнечных батарей с помощью лазерной резки. Это может ещè сильнее снизить их себестоимость. Ещё один тренд – размещение солнечных панелей не только на суше, но и на воде. В конце лета 2020 г. «Хевел» ввёл в эксплуатацию первую в России плавучую солнечную электростанцию – её построили на площадке Нижне-Бурейской ГЭС в Амурской области. Прогнозная годовая выработка составляет 53,5 тыс. кВт·ч. Преимущество плавучих станций в том, что они не занимают ценное место на земле, кроме того, они мобильны – модули можно быстро разобрать и переместить в другую часть водоёма.

В результате изучения был получен материал, анализ которого позволил заключить, что солнечная электроэнергия будет развиваться и дальше. Она становится все доступнее как в финансовом плане, так и в физическом – установки улучшают и делают более приспособленными к климату России. Замена традиционных источников возобновляемыми имеет ряд преимуществ: распространенность, неисчерпаемость, экологическая чистота, доступность, эксплуатационные затраты не содержат топливной составляющей, отсутствует дополнительная эмиссия парникового газа, их применение не изменяет теплового и энергетического баланса Земли.

Список литературы

1. Страна солнца. Что ждёт солнечную энергетику в России [Электронный ресурс] // Inc. Russia. URL: https://incrussia.ru/specials/strana-solntsa.

2. Российский потенциал энергии солнца [Электронный ресурс] // ЦДУ ТЭК. URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/articles/8/1050.

3. Солнечная энергетика в России и в мире: как на ней заработать [Электронный ресурс] // RB.RU. https://rb.ru/longread/solnechnaya-energetika.

ВКЛАД ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В МИРОВУЮ ГЕНЕРАЦИЮ

Н. Г. Винаковская, Е. С. Алексеев*, Д. А. Колесник, Е. А. Вашестов, З. Ф. Пидько *

[1]*Дальневосточный федеральный университет*
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
** alekseev.es@students.dvfu.ru*

Проанализирована текущая ситуация на энергетическом рынке с технологической и экономической позиций, определены перспективы развития возобновляемой энергетики в мире. Для этого установлено понятие «возобновляемые источники энергии» (ВИЭ), приведена статистика, отражающая охват возобновляемыми источниками энергии мирового производства электроэнергии, определены мировые лидеры возобновляемой энергетики, раскрыт вред, оказываемый ВИЭ на экологию. Дается прогноз дальнейшего развития ВИЭ в России и мире как способа производства электроэнергии.

Сейчас в мире:

– растет спрос на энергоносители вследствие развития промышленности развивающихся государств;

– растут выбросы парниковых газов в атмосферу, во многом связанные с использованием ископаемого топлива при производстве электроэнергии.

Возобновляемая энергия могла бы помочь разрешить эти проблемы.

В 2020 г. выработка электроэнергии из ВИЭ возросла на 6 %, в 2022 г. – на 8 % ввиду роста производства ветряной и солнечной энергии, доля гидроэнергии в мировом энергобалансе стабильно составляет 16 %. Доля солнечной и ветровой генерации в производстве мировой электроэнергии достигла 10,3 % (из них 6,6 % – ветроэнергетика). Выработка солнечной электроэнергии в 2021 г. возросла на 23 %, в 2022 г. – на 25 %, энергии ветра на 14 %, похожая тенденция наблюдается последние 10 лет [2].

Суммарная мощность чистых электростанций превысила 3000 ГВт, а их доля в общей установленной мощности мировой энергосистемы достигла 38,3 % (с учетом атомных станций). Доля ВИЭ в приросте генерирующих мощностей в мире за 2022 г. составила 85 % [2].

Большая часть новых мощностей ВИЭ – это солнечные и ветряные электростанции (88%) [4].

Суммарная мощность мировых ГЭС составляет 1,4 МВт. Она увеличилась на 12 ГВт в 2022 г.

Другие ВИЭ включают в себя 124 ГВт биоэнергии, 14 ГВт геотермальной и 0,5 ГВт морской энергии – рост производства приходится на Турцию, Индонезию и Кению.

Мощность вне сети достигла 8,6 ГВт в 2019 г. и около 9 ГВт в 2022 г., 40 % мощности вне сети приходится на биоэнергию, рост выработки приходится на Китай.

Скачку в области выработки электроэнергии из возобновляемых ресурсов (ВИЭ) в ЕС, США, Китае, Индии, Японии, Чили и Австралии, России способствовали государственные программы, удешевление технологий производства. Доля ВИЭ (включая гидроэнергию) в мировом энергетическом балансе превысила 28 % [4].

За последние 20 лет растет производство электроэнергии с помощью ВИЭ в Северной Америке и Европе. Менее значительный рост наблюдается в азиатском регионе [3].

Деглобализация заставляет многие энергозависимые государства обращаться к ВИЭ. Существуют экологические проблемы. С 2010 по 2022 г. себестоимость производства электроэнергии солнечными батареями и ветряными турбинами снизилась на 82 %, что сделало солнечную и ветряную энергетику очень эффективным и рентабельным способом производства электроэнергии [3].

В Евросоюзе действует экологическая кампания Green Deal, целью которой является образовать в ЕС углеродно-нейтральное пространство к 2030 г. Она влияет на развитие ВИЭ в регионе [5].

Лидеры инвестиций в развитие возобновляемой энергетики – Китай, США, Япония и Великобритания. Мировые инвестиции в ветряную и солнечную энергетику, биотопливо, биомассу и отходы, малую гидроэлектроэнергетику выросли с $33 млрд до более чем $300 млрд за 20 лет [5].

К 2050 г. доля ВИЭ в мировой генерации составит 40–68 % в зависимости от сценария [3].

В России активно реализуются энергетические проекты на основе фотоэлектрического преобразования энергии солнца, государственные программы предусматривают более 60 % генерации ВИЭ на основе энергии ветра, а также 13 % – на основе малой гидрогенерации [1].

Список литературы

1. Национальное рейтинговое агентство. Развитие альтернативной энергетики в России. 2015. URL: https://www.ra-national.ru/sites/default/files/analit (дата обращения: 14.12.2022).

2. Jones D. Global Electricity Review 2022. URL: Ember-climate.org/2022 (дата обращения: 14.12.2022).

3. Эденхофер О., Пичс-Мадруга Р., Сокона Й. и др. Специальный доклад МГЭИК по возобновляемым источникам энергии и смягчению воздействий на изменение климата / Рабочая группа III МГЭИК. Женева: Michael Melford/National Geographic Stock. 2011. URL: https://infoclimate.org/?books=vozobnovlyaemyie-istochniki-energii-i-smyagchenie-vozdeystviy-na-izmenenie-klimata (дата обращения: 14.12.2022).

4. Adib R., Zervos A. RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT // REN21. 2021. URL: GSR2021_Full_Report.pdf (ren21.net) (дата обращения: 14.12.2022).

5. Андриевская А. «Зеленый» курс: какое будущее ждет альтернативные источники энергии. 2021. URL: https://trends.rbc.ru/trends/green/609e76449a7947f475 (дата обращения: 14.12.2022).

СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В. М. Зайченко*, А. А. Чернявский, А. Л. Шевченко *

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
**zaitch@oivtran.ru, www.jiht.ru*

В докладе представлены предложения, позволяющие обеспечить рентабельное гарантированное энергоснабжение потребителей на изолированных территориях за счет использования различных сочетаний возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с применением в качестве стабилизирующих источников энергии установок, использующих отходы биомассы в качестве местных топливных ресурсов. Эти предложения подготовлены на основании последних исследований и разработок Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) – инициатора этих исследований.

Предложенные ОИВТ РАН системы энергоснабжения на базе двухстадийной термической конверсии биомассы (ДТКБ) обеспечивают получение синтез-газа, состоящего более чем на 90 % из водорода H_2 и монооксида углерода CO с соотношением этих компонентов (1…2) / 1 [1]. Синтез-газ, получаемый по технологии ДТКБ, может использоваться в качестве топлива для электромашинных генераторов энергии (газопоршневых, газотурбинных и т. п.), электрохимических преобразователей на топливных элементах, а также может являться альтернативой водороду в системах накопления энергии (СНЭ).

Эффективной областью применения систем с ВИЭ и ТЭС на биомассе (БиоТЭС) на базе синтез-газа является замещение дизельных электростанций (ДЭС) в удаленных изолированных районах, не обеспеченных централизованным энергоснабжением. Такие районы с населением более 20 млн чел. составляют до 60–70 % территории Российской Федерации [2]. Это многие северные территории, Восточная Сибирь, Приморье, горные районы Алтая, Дагестана, Северо-Кавказских республик, удаленные территории в центре европейской части России и др. Себестоимость электроэнергии в этих районах, в связи с дорогостоящим дизельным топливом и большими логистическими затратами на его доставку, составляет 40–100 руб/кВт·ч, а в отдельных местностях доходит и до 140 руб/кВт·ч. Здесь использование энергоисточников на ВИЭ и местных топливно-энергетических ресурсах является наиболее выгодным.

По данным статотчетности СО ЕЭС [3] на начало 2022 г. общая установленная мощность всех электростанций России составляла $\Sigma N_{уст} = 246590{,}5$ МВт = 246,59 ГВт, а суммарная годовая выработка электроэнергии – $\Sigma W = 1114{,}55$ млрд кВт·ч. При этом мощность и годовая выработка электроэнергии автономными энергоузлами на базе ДЭС на удаленных территориях оцениваются в размере 0,7 % от приведенных общих значений для РФ, т. е. суммарные установленная мощность и выработка электроэнергии всех автономных ДЭС могут быть приняты равными:

$$\Sigma N_{дэс} = 0{,}7\ \% \cdot \Sigma N_{уст} = 0{,}7\ \% \cdot 246\ 590{,}5\ \text{МВт} = 1726{,}1\ \text{МВт};$$

$$\Sigma W_{дэс} = 0{,}7\ \% \cdot \Sigma W = 0{,}7\ \% \cdot 1114{,}55\ \text{млрд кВт·ч} = 7{,}80\ \text{млрд кВт·ч}.$$

Поскольку продажа электроэнергии населению и предприятиям должна производиться по неким усредненным для Российской Федерации тарифам ($T_{эл}$), то все превышения этого тарифа, соответствующие себестоимости электроэнергии, получаемой на ДЭС, дотируются из бюджетов всех рангов (государственного, территориального и местного) в определенных договорных долях.

Общая сумма дотаций для эксплуатации ДЭС из бюджетов всех рангов может быть рассчитана по формуле

$$D = \Sigma W_{дэс} (C_{дэс} - T_{эл}), \tag{1}$$

где $C_{дэс}$ – себестоимость производства электроэнергии на ДЭС, руб/кВт·ч; $T_{эл}$ – установленный тариф на электроэнергию по действующей сетке в этих районах, руб/кВтч.

Принимая средневзвешенное для изолированных ДЭС значение себестоимости электроэнергии $C_{дэс} = (C_{min} + C_{max}) / 2 = (40 + 100) / 2 = 70$ руб/кВт·ч и типовое для этих районов значение тарифа на электроэнергию по состоянию на второе полугодие 2022 г. – $T_{эл} = 5{,}92$ руб/кВт·ч, в соответствии с выражением (1) находим:

$$D = 7{,}80 \cdot 10^9 (70{,}00 - 5{,}92) \approx 500 \cdot 10^9 \text{ руб/год} \equiv 500 \text{ млрд руб./год.} \tag{2}$$

Таким образом, бюджетные расходы на дотации для ДЭС составляют 0,5 трлн руб. ежегодно, что сопоставимо с объемом профицита государственного бюджета Российской Федерации, запланированного на 2022 г. в объеме 1,3 трлн руб. [4]

Решением проблемы исключения бюджетных дотаций является замена ДЭС на системы с использованием ВИЭ, в том числе отходов биомассы. Себестоимость получаемой электроэнергии на генерирующих объектах с ВИЭ в настоящее время в 2–4 раза ниже тарифов в территориальных энергосистемах. Поэтому использование ВИЭ позволит не только исключить бюджетные дотации, но даже обеспечит возможность пополнять бюджеты всех рангов. Удельные расходы на сооружение основных объектов возобновляемой энергетики в настоящее время в РФ не превышают $k_{уд} = 110$ млн руб./МВт. Для замены всех действующих ДЭС в Российской Федерации потребуется сумма инвестиций (капитальных вложений), равная:

$$K = k_{уд} \cdot \Sigma N_{дэс} = 110{,}0 \text{ млн руб/МВт} \cdot 1726{,}1 \text{ МВт} =$$
$$= 189\,871 \text{ млн руб.} \approx 190 \text{ млрд руб.}$$

Таким образом, для исключения использования дизельного топлива на ДЭС в Российской Федерации требуется сумма, которая в 2,6 раза меньше годового объема бюджетных дотаций, выделяемых в настоящее время для обеспечения их функционирования. Необходимая для этих целей сумма инвестиций может быть многократно уменьшена, если вместо замены ДЭС производить их соответствующую доработку на месте размещения для использования газового топлива вместо дизельного. Это касается ДЭС, имеющих невысокую степень износа. Для таких ДЭС достаточно только выполнить недорогие операции по доработке (расточке) их клапанов.

Поскольку проектирование и строительство электростанций на ВИЭ и биомассе имеют значительно более короткие циклы, чем в традиционной энергетике, соответствующие затраты будут весьма быстро окупаться и вскоре обернутся значительными прибылями. По оценкам ОИВТ РАН, годовые объемы инвестиций из бюджетов, требуемые для этой программы при полной замене ДЭС, составят по 50–60 млрд руб. в течение 3–4 лет. Это позволит обеспечить значительный экономический эффект: на один инвестируемый рубль будет получен более чем двукратный бюджетный доход.

В настоящее время ВИЭ и БиоТЭС обеспечивают наивысшую рентабельность инвестиций [5]. В мировом масштабе вклад ВИЭ на сегодняшний день составляет уже 26 % общего производства электроэнергии [6]. При этом обеспечивается достижение «сетевого паритета» – полноценной экономической конкуренции возобновляемой энергетики с традиционной.

Список литературы

1. Зайченко В. М., Чернявкий А. А. Создание систем гарантированного энергообеспечения // Энергетическая политика. 2020. № 10 (152). С. 96–103.

2. Фортов В. Е., Попель О. С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. 168 с.

3. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. М.: АО «СО ЕЭС», 2021. URL: www.so-ups.ru.

4. Романов С. В., Багдасарян Т. В. Бюджет для граждан. М.: Министерство финансов РФ, 2021. 84 с.

5. Зайченко В. М. и др. Развитие водородной энергетики в России. М.: Недра, 2021. 71 с. ISBN 978-5-8365-0513-4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУР ТИПИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ

Г. В. Кузнецов, Е. В. Кравченко[*] [*]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[*] *kevatp@tpu.ru*

Хранение электрической энергии является ключевой проблемой энергоперехода на нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ). В докладе представлен анализ теплового состояния элемента свинцово-кислотной батареи для типичных условий и режимов работы. С применением электротермической модели получены значения характерных температур гальванического элемента путем решения нестационарного уравнения теплопроводности в двумерной постановке методом конечных разностей. Например, для типичных эксплуатационных условий с α=5 Вт/(м^{2}К) и $t_{заряда}$=8 ч температуры составили: $T_{макс}$=36 °С; $T_{ср}$=31 °С и $T_{корп}$= 26 °С. Полученные значения характерных температур позволяют эффективно управлять тепловым режимом крупных систем хранения электрической энергии.

Существующая потребность человечества в хранении электрической энергии, вырабатываемой прежде всего НВИЭ, указывает на необходимость создания крупных систем накопления энергии (СНЭ) [1]. По целому ряду критериев (плотность энергии, скорость разряда, мощность) для этих целей подходят электрохимические источники тока [2]. При этом срок окупаемости [3], а значит и календарный срок службы стационарных крупномасштабных электрохимические СНЭ, планирующихся к применению в системе передачи электрической энергии от НВИЭ к потребителю, должен составлять не менее 10 лет [4]. Поэтому необходимо оценивать реальное тепловое состояние таких накопителей для долговременного (десятки лет) прогнозируемого их применения, а также безопасной эксплуатация крупномасштабных электрохимических СНЭ [5], основной причиной отказов которых является выделение тепла в замкнутом объеме, происходящее при обычном режиме работы батареи, а именно циклах заряда и разряда в типичных условиях эксплуатации [6].

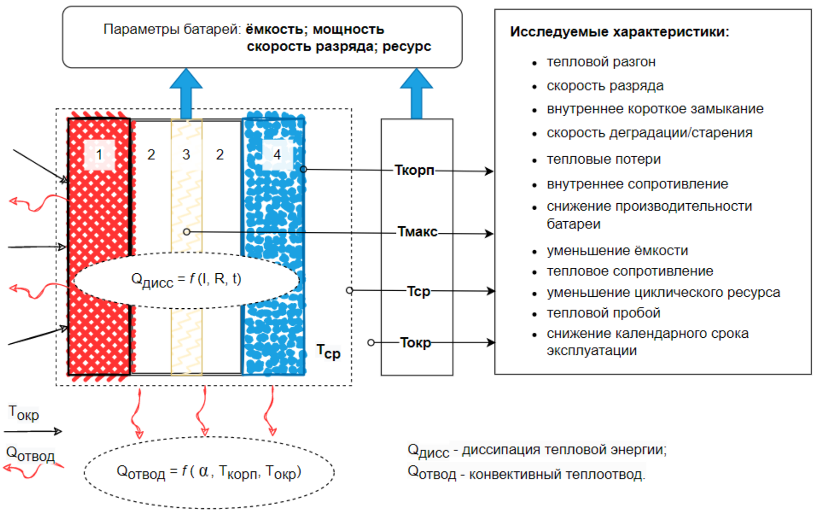


Рис. 1. Характерные температуры электрохимических источников тока:
1 – катод; 2 – электролит; 3 – сепаратор; 4 – анод

---

[*]

Анализ большой группы механизмов и факторов (рис. 1), ускоряющих деградацию характеристик и параметров электрохимических батарей, указывает на существенное влияние характерных температур. Кроме того, так как осуществляется теплообмен с окружающей средой, необходимо оценивать влияние температуры внешней среды и значение коэффициента теплоотдачи на тепловое состояние электрохимической батареи.

С применением электротермической модели получены значения характерных температур (рис. 2) гальванического элемента электрохимической батареи путем решения нестационарного уравнения теплопроводности в двумерной постановке методом конечных разностей. Метод решения дифференциального уравнения аналогичен [7].

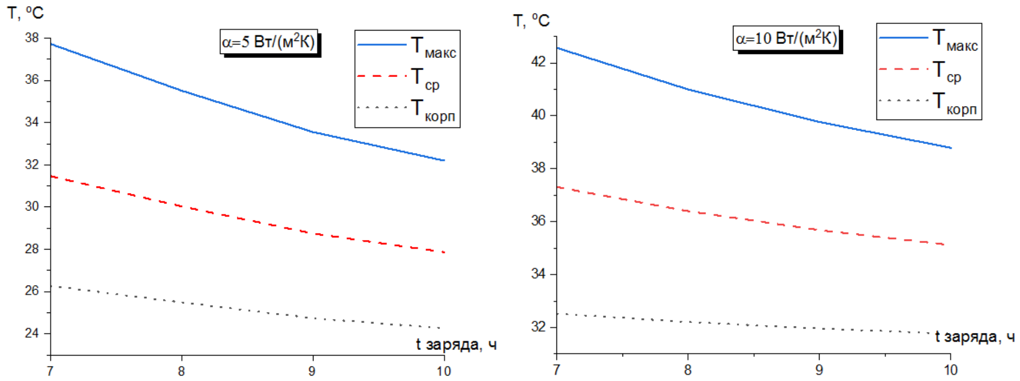


Рис. 2. Характерные температуры элемента свинцово-кислотной батареи при $T_{окр}$ = 20 °C

Анализ результатов моделирования (рис. 2) показывает, что при интенсификации режима работы (увеличение тока заряда) электрохимического накопителя характерные температуры повышаются. При этом наибольшее рост температуры наблюдается для $T_{макс}$: с 32 до 38 °C при α=5 Вт/(м^{2}К). Для средней температуры элемента $\Delta T = 3$ °C, а наименьшее значение ΔT у $T_{корп}$, которое составило 2 °C. Таким образом, учитывая рекомендованную $T_{заряда}$= (30±5) °C свинцово-кислотной батареи, можно определить, что уже для $t_{заряда}$=8 ч максимальная характерная температура превысит указанный диапазон оптимальных значений температур заряда. Это означает, например, что некорректная оценка теплового состояния элементов электрохимических накопителей может привести к неэффективной работе системы управления тепловым режимом крупномасштабных электрохимических СНЭ.

Список литературы

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf.

2. Jafari M., Botterud A., Sakti A. Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 158. P. 112077.

3. Pudjianto D. et al. Whole-systems assessment of the value of energy storage in low-carbon electricity systems // IEEE Transactions on smart grid. 2013. T. 5. №. 2. C. 1098–1109.

4. Bui Mai, et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward // Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062–1176.

5. Chombo P. V., Laoonual Y. A review of safety strategies of a Li-ion battery //Journal of Power Sources. 2020. Vol. 478. P. 228649.

6. Lin J. et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 167. P. 120834.

7. Красношлыков А. С., Кузнецов Г. В. Численный анализ температурных полей литий-ионного аккумулятора в условиях высоких токовых нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 11–12. С. 126–134.

К ВОПРОСУ РОЛИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

Л. В. Кулагина[1⁑], К. А. Штым[2], И. В. Кириллова[1], Д. А. Савчиц[1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток,
о. Русский, кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7
⁑ LKulagina@sfu-kras.ru

Для РФ характерно повсеместное применение традиционных ископаемых видов топлива, на которые приходится до 80% спроса на первичную электроэнергию. Повышение энергоэффективности и переход на альтернативные источники энергии рассматриваются специалистами как действенные подходы, необходимые для достижения углеродно-нейтральных показателей в области климата в контексте установления требований энергетической эффективности объектов промышленности, коммунального и сельского хозяйства, топливно-энергетического комплекса

Минэнерго РФ рассматривает вопрос по вовлечению местных ресурсов для обеспечения экологической безопасности предприятий ТЭК, а также для обеспечения энергобезопасности регионов. Энергосистема России поставляет около двух третей мировых выбросов CO_2, данный тренд может обернуться угрозой энергетической безопасности страны в будущем при отсутствии реальных шагов по развитию использования альтернативных источников энергии. По мнению экспертов и ученых, использование биомассы в составе топлива существенно снижает проблемы энергетической безопасности, торгового баланса и способствует социально-экономическому развитию страны. По статистике, мировое потребление биомассы как альтернативного топлива увеличивается на 3 % в год, данный вид топлива может непосредственно сжигаться для генерации энергии или служить сырьем для получения различных видов твердого, жидкого или газового продуктов с помощью целого ряда технологий [1–4].

В 2006 г. ООН объявила древесную биомассу углеродно-нейтральной: это источник энергии, который уравновешивает количество углекислого газа, образующегося при сгорании, с количеством углекислого газа, поглощаемого в процессе фотосинтеза. Биомасса занимает четвертое место после угля, нефти и газа, обеспечивая примерно 14 % мирового спроса на энергию. Дополнительным фактором, усиливающим доводы в пользу широкого применения биомассы как компонента энергетического топлива, является компонентный состав, при сжигании которого практически не наблюдается эмиссии оксидов серы. В этом контексте перспективными являются исследования по включению биомассы в состав топливных брикетов и пеллет [4]. Энергоемкость 1 тонны пеллет составляет примерно 4 700–4 900 кВт·ч. Следовательно, энергия, необходимая для производства единицы, может варьироваться от 2 % до 25 % от их энергетической ценности.

Изготовление топливных пеллет представляет собой процесс прессования рыхлых остатков биомассы в твердый блок высокой плотности, который можно использовать в качестве топлива. В более общем смысле, это процесс физического изменения измельченного материала биомассы неправильной формы, перестроенного посредством механической и пластической деформации при определенной температуре, давлении и содержании влаги. Сжигание биомассы представляет собой сложный процесс, включающий как газовую фазу, так и твердофазные явления. Теплотворная способность и зольность пеллет зависит от большого количества различных факторов и процессов, специалистами были предприняты многочисленные попытки разработать упрощенные модели, чтобы понять эти процессы и наиболее важные характеризующие их параметры. В общих чертах модели предполагают, что во время горения твердое топливо проходит три стадии потери массы: сушку, дегазацию и обугление в результате горения. Пламенное сгорание летучих на поверхности твердого тела способствует дальнейшему термическому разложению. В [2] представлена математическая модель горения крупных частиц биомассы, в которых существует значительный температурный градиент.

Рынок топливных пеллет (или брикетов) как альтернативы традиционному топливу имеет значительный потенциал роста. Специалисты связывают медленное развитие внутреннего рынка пеллет в РФ с отсутствием административного драйвера – мер правительства, ограничивающих потребление ископаемого топлива. До сих пор 95 % произведенного в России биотоплива экспортируется (преимущественно на азиатско-тихоокеанский рынок). Во многом потребление альтернативного топлива в Европе набирает обороты за счет промышленных предприятий, которые переходят на «зеленую» энергетику полностью или частично. В этой связи актуальны исследования в области численного и компьютерного моделирования процессов сжигания топлива с включением отходов производства, оптимизации параметров топочного устройства с целью повышения энергоэффективности установок и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Mani S., Tabil L. G. and Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses // Biomass Bioenergy. 2006. 30: 648–654.

2. Кулагина Л. В., Штым К. А., Кириллова И. В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 2 (26). С. 104–114. DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010.

3. Кулагина Л. В., Кириллова И. В. Повышение экологичности сжигания смесей в топках малого объёма за счёт включения органических компонентов // E3S Web Conf. 2021. Vol. 295. International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). DOI:10.1051/e3sconf/202129502002.

4. Патент на полезную модель № 205015, Устройство для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами: № 2020104971; заявл. 2021.02.25. Публ. и выдача пат. 2023.06.23 / Кулагина Л. В., Енютина Т. А., Кириллова И. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНУЮ СЕТЬ

Я. Ю. Малькова*, Р. А. Уфа *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
* *yapower@tpu.ru*

В статье представлено обоснование необходимости учета ряда факторов при формировании и последующем решении оптимизационной задачи по определению оптимальных параметров объекта генерации на основе возобновляемых источников энергии и размещаемой совместно системы накопления энергии. В том числе обоснована необходимость проведения прогностического анализа прироста суммарной нагрузки сети. Последнее продемонстрировано на примере схемы радиальной тестовой сети (15 bus IEEE).

Объекты генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) получили широкое распространение в современных распределительных сетях. В том числе нашла свое практическое применение и соответствующее обоснование их совместная установка с системами накопления энергии, в том числе с водородными накопителями.

Мощность и место (узел) подключения к сети планируемого ко вводу объекта на основе ВИЭ выбираются, как правило, посредством решения оптимизационной задачи. В последней критерии оптимизации и соответствующие им весовые коэффициенты подбираются индивидуально для каждой конкретной задачи.

Ранее в [1] было показано, что для корректности и адекватности получаемого решения необходимо обладать сведениями об уровне инсоляции во всех узлах исследуемой распределительной сети для контрольных дней всех сезонов года. Обладая исходными данными, можно посредством ввода поправочных коэффициентов добиться оптимального решения, являющегося глобальным минимумом.

Так, было установлено, что для рассматриваемого реального объекта – автономной солнечной электростанции установленной мощностью 15 кВт, расположенной на территории карбонового полигона ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова «WayCarbon» (Грозный), при ее внедрении в тестовую схему (15 bus IEEE [2]) реальный располагаемый излишек выработки мощности данного объекта на 18,7 % меньше (для одного из контрольных дней летнего сезона), чем принятый ранее в расчетах (для идеализированного графика выработки мощности).

Отметим, что ввод поправочных коэффициентов необходим также и при решении задачи, вытекающей из данной – определение оптимальных параметров размещаемой совместно с объектом на основе ВИЭ системы накопления энергии, в частности, ее номинальной емкости [3, 4].

Далее в расчете стоит учесть тот факт, что в настоящее время имеет место тенденция к увеличению единичной мощности потребителей и их суммарной мощности (прирост нагрузки). Для количественной оценки данной тенденции необходимо иметь сведения о текущем энергопотреблении за предыдущие периоды (базу данных). Здесь заметим, что при увеличении нагрузки и обеспечении ее от основного источника возможна ситуация превышения текущего значения перетока мощности (тока) по линии связи предельно допустимого значения.

На примере тестовой схемы (15 bus IEEE) было выполнено следующее исследование. При внедренном объекте генерации на основе ВИЭ с оптимальными параметрами (узел 3, мощность 718 кВт) был реализован равномерный прирост нагрузки на 5–

25 % с шагом 5 %. Установлено, что для случая приращения суммарной нагрузки на 25 % текущие значения токов, протекающих по линиям связи, не удовлетворяют паспортным данным установленного оборудования.

Таким образом, при решении оптимизационной задачи по определению оптимальных параметров совместно размещаемого оборудования – объекта генерации на основе ВИЭ и системы накопления энергии (в том числе водородного накопителя) – необходимо выполнять прогностический анализ прироста нагрузки, а его результаты (выявленные зависимости с соответствующими коэффициентами) учитывать при формировании целевой функции и ограничительных условий.

Список литературы

1. Малькова Я. Ю., Уфа Р. А., Литвинов С. А. Учет солнечной активности в оптимизационной задаче возобновляемой генерации // Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 20–22 октября 2022 года. Казань: Фолиант, 2022. С. 279–282.

2. Basu M. Dynamic optimal power flow for isolated microgrid incorporating renewable energy sources // Energy. 2023. Vol. 264. Pp. 1–16.

3. Khan F. A., Pal N., Saeed S. H., Yadav A. Modelling and techno-economic analysis of standalone SPV/Wind hybrid renewable energy system with lead-acid battery technology for rural applications // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 55. Pp. 1–23.

4. Yang Y., Bremner S., Menictas C., Kay M. Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. Pp. 1–27.

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА И ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ИЗ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

В. Е. Мессерле[1,2], А. Б. Устименко[1,2⁑] *

[1]Институт проблем горения КН МНВО РК,
050012, Казахстан, Алматы, ул. Богенбай батыра, 172
[2]Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби,
050040, Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
⁑ ust@physics.kz

В данной работе представлены результаты термодинамических и экспериментальных исследований пиролиза углеводородного газа в электродуговом реакторе с получением водорода и технического углерода (сажи), содержащих наноуглеродные структуры. Технология плазменного пиролиза заключается в нагреве углеводородного газа в электродуговом реакторе до температуры его пиролиза (1900–2300 К) и образовании водорода и высокодисперсного технического углерода в едином технологическом процессе.

Несмотря на бурное развитие возобновляемых источников энергии, их доля в энергетическом мировом балансе не превышает 10 %, а основная часть энергии (62,8 %) вырабатывается на тепловых электростанциях, сжигающих ископаемое топливо [1]. При этом образуется значительное количество диоксида углерода (CO_2), являющееся основным парниковым газом, способствующим глобальному потеплению. Для снижения влияния на климат весьма актуальной задачей при выработке энергии является переход от ископаемых топлив, являющихся одним из основных источников выбросов парниковых газов, к экологически чистому альтернативному топливу – водороду, являющемуся самым распространенным элементом в мире. В мире ежегодно уже производится и потребляется в различных отраслях промышленности более 70 млн тонн водорода [2]. К 2050 г. прогнозируется 10-кратное увеличение потребности в водороде, что позволит снизить выбросы CO_2 на 25 %. При этом доля водорода в мировом энергетическом балансе составит 18 %, а потенциальный рынок водорода и водородных технологий возрастет до 2,5 трлн долл. США в год.

В настоящее время большая часть производимого в мире в промышленном масштабе водорода получается в процессе паровой конверсии (риформинга) газообразных углеводородов [3]. Принципиальные отличия плазменной технологии получения водорода из углеводородных газов – C_nH_m (метан, пропан, бутан и др.) от существующих технологий заключаются в использовании электродугового реактора совмещенного типа для осуществления термической диссоциации углеводородных газов с образованием водорода и технического углерода. Плазменный метод имеет ряд существенных технологических преимуществ: уменьшение объема реактора в 6–8 раз (при сохранении производительности по водороду) и соответствующее снижение площади необходимых производственных помещений, существенное снижение объема отходящих газов и увеличение температуры в реакционной зоне электродугового реактора до 2000 К и более, позволяющее повысить эффективность пиролиза углеводородного газа. Плазмохимический реактор с совмещением зон выделения и поглощения энергии позволяет проводить пиролиз газообразных углеводородов без использования дополнительных плазмообразующих газов. Технология плазменного пиролиза заключается в нагреве углеводородного газа в электродуговом реакторе совмещенного типа до температуры его пиролиза (1900–2300 К) и образовании высокодисперсного технического углерода и водорода в едином технологическом процессе. После выделения технического углерода из потока продуктов пиролиза водород направляют на очистку и компримирование. Исследование пиролиза углеводородных газов проведено на примере пропанобутановой газовой смеси (ПБС): 50 % C_3H_8 + 50 % C_4H_{10}.

Для проведения термодинамического анализа использовали программу TERRA, имеющую собственную базу термохимических свойств 3500 индивидуальных веществ в газообразных, ионизированных и конденсированных состояниях в диапазоне температур от 300 до 6000 К [4]. Согласно расчетам, концентрация водорода близка к 100 % в интервале температур 1500–2800 К. Конденсированный углерод, образующийся в интервале температур 1000–2800 К, полностью переходит в газовую фазу при температуре выше 3200 К. Удельные энергозатраты на процесс монотонно возрастают от 0 до 8 кВт·ч/кг (Т = 300–3200 К).

Эксперименты по плазменному пиролизу углеводородного газа с получением водорода и сажи проведены на экспериментальной плазменной установке, основным узлом которой является вертикальный плазменный реактор постоянного тока, состоящий из водоохлаждаемого металлического корпуса, футерованного изнутри графитом в виде кольцевой вставки, выполняющей функцию кольцевого анода. Катодом является подаваемый стержневой графитовый электрод, расположенный в центре крышки плазменного реактора. Внутренний диаметр реактора составляет 150 мм, высота реактора – 300 мм. Номинальная мощность реактора составляет 100 кВт [5]. В реакторе происходит нагрев и пиролиз ПБС при ее взаимодействии с вращающейся электрической дугой. При этом из ПБС по реакции $C_3H_8 + C_4H_{10} = 7C + 9H_2$ образуется технический углерод и водород. Было выполнено два эксперимента по пиролизу ПБС, исходные данные и результаты которых представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Режимные параметры экспериментов по плазменному пиролизу ПБС

№ опыта	I, А	U, V	P, kW	$G_{ПБС}$, л/мин	КПД, %	T_{AV}, К
1	307	360	110.5	4.8	75	2123
2	304	377	114.6	7.0	75	2173

Таблица 2

Состав отходящих газов при плазменном пиролизе ПБС, об.%

№ опыта	H_2	N_2	CO_2	CO	CH_4	Σ
1	68.9	18.6	0.2	0.1	12.2	100
2	70.8	18.6	0.1	0	10.5	100

Из табл. 2 видно, что концентрация водорода в отходящих газах достигает значительной величины (70,8 %) при КПД реактора 75 % и среднемассовой температуре в реакторе 2173 К. Методом плазменного пиролиза углеводородного газа были получены водород и технический углерод. Физико-химические исследования технического углерода выявили наноструктуры в виде колоссальных углеродных нанотрубок, обладающих высокой электропроводностью и механической прочностью, в 30 раз превышающей таковую у кевларовой ткани.

Список литературы

1. BP Statistical Review of World Energy 2020. 69th edition. BP p.l.c., 2020. 66 p. URL: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.

2. Хужина Я. Водородное будущее. Академик Н.Н.Пономарев-Степной об атомно-водородной энергетике // Научная Россия. 3 декабря 2020 г. URL:

https://scientificrussia.ru/articles/vodorodnoe-budushchee-akademik-n-n-ponomarev-stepnoj-ob-atomno-vodorodnoj-energetike.

3. Dagle R., Dagle V., Bearden M., Holladay J., Krause T., Ahmed S. An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products. United States: Report of Northwest National Laboratory. November 2017. 73 p. URL: https://doi.org/10.2172/1411934.

4. Gorokhovski M., Karpenko E. I., Lockwood F. C., Messerle V. E., Trusov B. G., Ustimenko A. B. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory // Journal of the Energy Institute. 2005. Vol. 78, No. 4. P. 157–171.

5. Galvita V., Messerle V. E., Ustimenko A. B. Hydrogen production by coal plasma gasification for fuel cell technology // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32, Issue 16. P. 3899–3906. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.039.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ «ЗЕЛЕНОГО» ВОДОРОДА ПРИ СЖИГАНИИ БИОМАССЫ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Г. А. Рябов[⁎], О. М. Фоломеев [*]

ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт»
115280, Российская Федерация, Москва, Автозаводская, 14
[⁎]*GARyabov@vti.ru georgy.ryabov@gmail.com*

Показано, что технологии с отрицательными выбросами CO_2 будут востребованы, в особенности технологии переработки биомассы с улавливанием CO_2 для производства энергии и полезных продуктов, например, водорода. Разработана схема установки с сжиганием биомассы с добавкой кислорода от электролизера для получения водорода. Особенностями расчетов являлся учет влияния характеристик газовой фазы на гидродинамику и теплообмен в вариантах сжигания биомассы в среде кислорода с рециркуляцией CO_2. Определено значение приведенной за жизненный цикл стоимость водорода (LCOH), которое составит 2,2 долл/кг. Показано, что предложенная углеродно-нейтральная установка дает значение приведенных затрат на нижней границе существующих установок с электролизом из возобновляемых источников.

Ожидается, что технологии с отрицательными выбросами (NET) будут играть важную роль в достижении целей глубокой декарбонизации. BECCS это группа технологий с улавливанием и захоронением CO_2 в результате процессов, в которых биомасса преобразуется в энергию или используется для производства материалов [1]. В последние десятилетия водород приобретает все большее значение как источник для транспорта, энергетики и строительства [1, 2]. Это во многом связано с все большим использованием возобновляемых источников энергии и необходимостью сохранения энергии, а также отсутствием выбросов CO_2 при сжигании водорода. В [1] указывается, что стоимость водорода с низким углеродным следом по технологии SMR с CCS будет оставаться на уровне 1–2 евро/кг в период с 2019 по 2050 г. Стоимость водорода, полученного путем электролиза, составляла 3–7 евро/кг в 2019 г., но в дальнейшем предполагается ее снижение. Водород, произведенный электролизом из энергии ветра, требует значительно большей площади (почти на три порядка), чем по технологии SMR из органических топлив.

Следует отметить, что производство водорода электролизом от энергии ветра и солнца вряд ли оправдано в условиях России. Причиной этому является низкое прямое нормальное излучение и малое число часов использования номинальной мощности. Поэтому интерес представляет исследование возможности использования электроэнергии от паросилового цикла при сжигании биомассы как возобновляемого источника энергии. При этом биомасса сжигается в котле с ЦКС, а кислород от электролизера поступает в котел для организации кислородного сжигания. Схема подобна традиционной для паросилового блока, добавляется только электролизер с подводом к нему очищенной воды и отводом кислорода в воздушный тракт котла, а также линией отвода водорода для дальнейшего использования. Рассмотрено два варианта биомассы – щепа с теплотой сгорания 8,52 МДж (2000 ккал/кг, влажность 40 %) и пеллеты с теплотой сгорания – 20,9 МДж (5000 ккал/кг). Котел рассчитывался для воздушного сжигания, кислородного сжигания с рециркуляцией CO_2 и вариантов с добавкой кислорода от электролизера при 50 % и 100 % подачи выработанной электроэнергии.

При расчете котла использовались методики, разработанные ВТИ для воздушного и кислородного сжигания [3–5]. Рассчитывались показатели гидродинамики топки, теплообмена в топочном контуре, определялись не только его технические показатели, но и размеры топки. Особенностями расчетов являлся учет влияния характеристик газовой фазы на гидродинамику и теплообмен в вариантах сжигания биомассы в среде кислорода с рециркуляцией CO_2.

Для того чтобы сравнить предложенную систему получения водорода с другими системами генерации водорода с низким углеродным следом необходимо выполнить оценку приведенной стоимости водорода в течение жизненного цикла и определить углеродный след (грамм CO_2 на килограмм H_2). Приведенная стоимость производства продукта (электроэнергии или водорода) рассчитывается как результат деления суммы затрат (капитальные затраты, затраты на топливо и другие эксплуатационные затраты, например, оплат труда, ремонты и так далее) по каждому году (с учетом переменного дисконта на сумму произведенного продукта по годам, а также с учетом дисконта).

Установка вырабатывает 511,5 кг/ч водорода, за 30 лет эксплуатации вырабатается 107,4 млн кг водорода. Таким образом, приведенная за жизненный цикл стоимость водорода (LCOH) составит 2,2 долл/кг. Аналогичные расчеты для сжигания пеллет дают значение LCOH на уровне 4 долл/кг, что связано с их стоимостью (в 5 раз выше щепы). Сравнение с данными по LCOH [1] показывает, что предложенная углеродно-нейтральная установка дает значение приведенных затрат на нижней границе существующих установок с электролизом из возобновляемых источников.

Организация одновременно получения водорода и улавливания CO_2 при кислородном сжигании делает такой вариант типичным проектом BECCS. Очевидно, что экономические показатели в части приведенной стоимости водорода в этом случае будут значительно хуже. Однако если учитывать гипотетическую плату за выбросы CO_2 (в данном случае это «отрицательные» выбросы), то такое решение может быть вполне оправданным.

Общее количество уловленного CO_2 с КПД 90 % за жизненный цикл составляет 6,36 млн тонн. Расчеты показали, что при плате за выбросы 30 долл/т CO_2 LCOH будет порядка 2 долл/кг водорода. Такой проект BECCS будет достаточно перспективным. Следует отметить, что крупнейший проект по использованию биомассы компании DRAX в Великобритании предусматривает возможность кислородного сжигания биомассы с улавливанием CO_2 [6].

Грубые оценки показали, что косвенный углеродный след для предложенной установки равен 0,38–0,95 кг/кг. Сравнивая эти результаты с данными для других технологических решений, можно заключить, что предложенная схема безусловно соответствует требования по низкоуглеродному водороду (углеродный след менее 4,4 кг/кг).

Список литературы

1. Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. CCUS in clean energy transitions. Paris: International Energy Agency. URL: https://webstore.iea.org/ccus-in-clean-energy-transitions.

2. IEA Bioenergy (2013), Using a life cycle assessment approach to estimate the net greenhouse gas emissions of bioenergy, https://www.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/2013/10/Using-a-LCA-approach-to-estimate-the-net-GHG-emissionsof-bioenergy.pdf, accessed 23 May 2019.

3. Рябов Г. А., Фоломеев О. М. Обоснование расчета топочного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика. 2011. № 6. С. 12–18.

4. Ryabov G. A., Folomeev O. M. Features of particle flows hydrodynamics in recirculating systems and pneumatic valves of CFB boilers // J. Phys. Conf. Series. 2020. V. 1683. No. 2. P. 2063. URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022035.

5. Мельников Д. А., Рябов Г. А. Особенности сжигания твердых топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO_2 // Сб. докладов Международного Российско-Казахстанского Симпозиума «Углехимия и экология Кузбасса», 5–8 октября, 2014. Кемерово, 2014.
6. URL: https://www.bioenergy-news.com/news/drax-considers-new-pellet-projects/

ЭФФЕКТ КАЖУЩЕЙСЯ КРИВИЗНЫ ПРОФИЛЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЛОПАСТИ ЦИКЛИЧЕСКОГО РОТОРА

А. В. Сентябов[1, 2*], А. А. Дектерев[1, 2], Ар. А. Дектерев[2], Д. А. Дектерев[1, 2], С. А. Филимонов[1, 2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[*] Sentyabov_a_v@mail.ru

В работе рассмотрено описание аэродинамики крылового профиля при его сложном движении в составе циклического ротора. Вследствие вращательного и качательного движений лопасти в составе такого ротора разные её части находятся в разных условиях обтекания, порождая эффективные кривизну и угол атаки лопасти, что, в свою очередь, осложняет использование данных продувок профиля в прямолинейном потоке.

При исследовании характеристик крыловых профилей проводится их обдувание прямолинейным потоком в аэродинамической трубе. Такая постановка эксперимента хорошо соответствует полету самолета с заданной скоростью при известном угле атаки крыла. Крыловые профили используются не только в прямолинейном, но и во вращательном движении. Например, вертикальные ветровые турбины с ротором Дарье или циклоидальные роторы летательных аппаратов. В этих условиях обтекание лопасти похоже на обтекание в аэродинамический трубе только в том случае, если радиус вращения много больше, чем хорда профиля. Вместе с тем хорда лопасти может быть сравнимой с радиусом вращения. В этом случае при вращательном движении симметричного профиля разные его участки обтекаются под разными углами. Если преобразовать криволинейный поток в прямолинейный, сохраняя угол между потоком и хордой, то прямая хорда преобразуется в криволинейную (рис. 1). Это называют эффектом «кажущейся кривизны» («virtual camber») профиля [1, 2]. Нетрудно понять, что зависимости коэффициентов подъемной силы и коэффициента сопротивления от «угла атаки» будут сильно отличаться от зависимостей, построенных для исходного профиля в аэродинамической трубе, а углы срыва потока будут сильно отличаться от аналогичных углов, полученных для симметричного профиля.

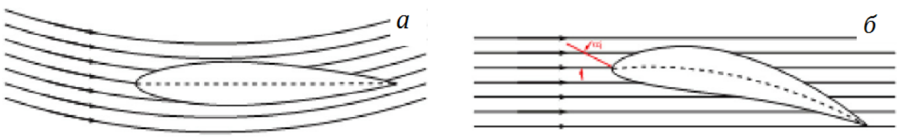


Рис. 1. Обтекание крылового профиля при вращательном движении: *а* – симметричный профиль при вращательном движении; *б* – аналогия, криволинейный профиль в прямолинейном потоке

В качестве примера рассмотрим работу циклоидального движителя, состоящего из нескольких крыловых профилей (рис. 2). Такой ротор может использоваться как в качестве движителя летательных аппаратов или судов, так и в качестве вертикальной ветряной турбины [3]. Схему движения лопасти циклоидального ротора представляет рис. 2, *а*. Лопасть вращается относительно оси ротора с началом координат в точке *O* и одновременно способна поворачиваться вокруг собственной оси.

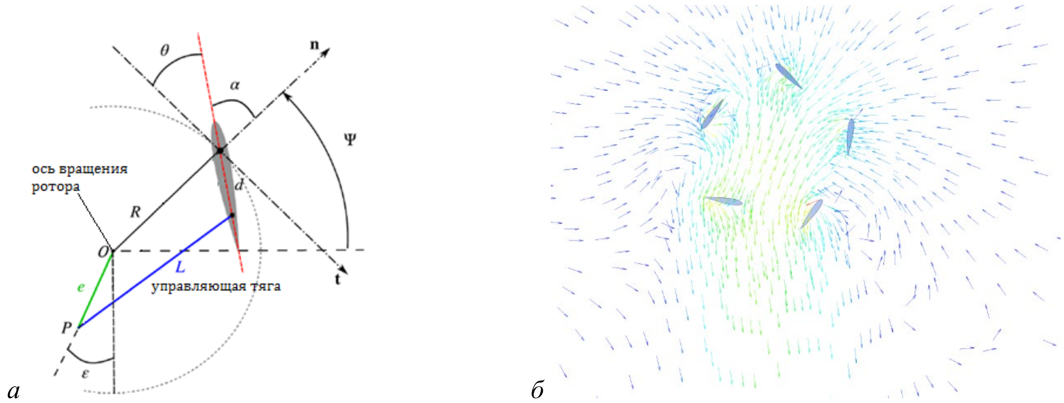


Рис. 2. Циклический ротор: *а* – кинематическая схема движения лопасти циклического движителя; *б* – пример течения, индуцируемого циклическим ротором (численное моделирование)

Методика преобразование хорды симметричного крылового профиля в хорду с кривизной приводится в работах [1, 2, 4]. Она состоит в построении такой кривой (хорды профиля), которая в каждой точке имела бы такой же угол наклона к набегающему прямолинейному потоку, какой имеет скорость точек хорды исходного профиля в процессе своего вращательного движения по отношению к окружающему воздуху (рис. 1). При этом учитывалось как вращательное, так и качательное движение лопасти.

Данный подход был применен к симметричной лопасти циклического ротора беспилотного летающего аппарата с отношением хорды к радиусу, равным 0,5 (рис. 2, *б*). В результате получилось, что хорда имеет отрицательный эффективный изгиб в верхней части траектории лопасти и положительный – в нижней (рис. 3, *а*). Довольно большой эффективной кривизны профиль достигает в четвертой четверти. Помимо этого, в анализ было добавлено влияние скорости потока, индуцированного самим ротором в процессе создания тяги, на эффективный угол атаки (рис. 3, *б*).

Такие преобразования, естественно, носят приблизительный характер, однако позволяют лучше понять аэродинамические основы работы крылового профиля в условиях сложного движения.

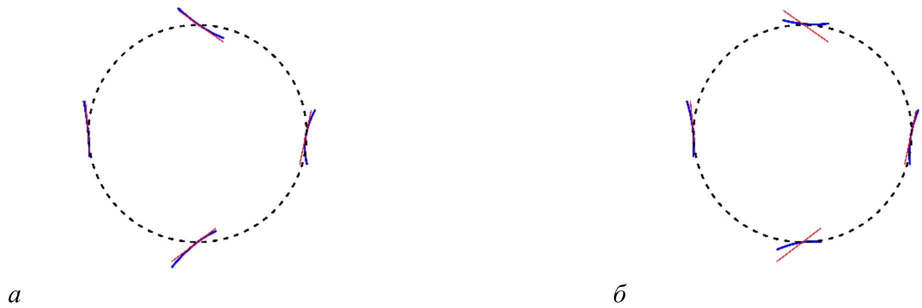


Рис. 3. Преобразование симметричного профиля в профиль с кривизной (вращение ротора против часовой стрелки): *а* – преобразованием с учетом вращения и качения лопасти; *б* – преобразование с учетом индуцированной скорости (красные линии – исходная хорда симметричного профиля, синие линии – преобразованная хорда)

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. Migliore P. G. and Wolfe W. P. Effects of Flow Curvature on the Aerodynamics of Darrieus Wind Turbine // Dept. of Aerospace Engineering,West Virginia Univ. ORO-5135-77/7, Morgantown, WV, July 1980.

2. Migliore P. G., Wolfe W. P. and Fanucci J. B. FlowCurvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics // Journal of Energy, vol. 4, No. 2, pp. 49–55, 1980. doi:10.2514/3.62459.

3. 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, vol. 1382, 012129, 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1382/1/012129.

4. Palash J. and Abhishek A. Modeling and Simulation of Virtual Camber in Cycloidal Rotors // AIAA Journal, vol. 55, No 4, pp. 1465–1468, 2017. https://doi.org/10.2514/1.J055316.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ РАБОТЕ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКАХ

И. Н. Сеськин*, С. Л. Елистратов *

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

Исследование термодинамических циклов рабочих тел природного происхождения и возможностей повышения эффективности работы при применении в тепловых насосах парокомпрессионного типа.

В докладе конференции рассматриваются возможности для повышения эффективности рабочих циклов парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) при работе на низкотемпературных теплоисточниках. Подавляющее большинство серийно выпускаемых тепловых насосов (ТН) эффективны при работе на теплоисточниках с температурой выше +6 ºС. В условиях Сибири, а также в северных территориях температура некоторых теплоисточников редко поднимается выше +4 ºС, что делает ограниченным или даже невозможным использование большинства ПКТН.

Аммиак обладает очень высокой удельной энтальпией испарения (кДж/кг) по сравнению с R134a. Это приводит к расходу малой массы, которая снижает необходимые размеры трубопроводов и клапанов. Другим преимуществом, является то, что объемная способность нагрева (кДж/м^3) – относительно высокая. При –5 ºС/50 ºС температуре испарения/сжатия необходимый объем компрессора для систем тепловых насосов, работающих на R134a, будет превышать систему, работающую на аммиаке.

Расчеты показывают, что высокотемпературные тепловые насосы на изобутане (R600a) могут обеспечить нагрев горячей воды до 95 ºС, что полностью обеспечит нужды в отоплении.

При использовании одного из самых распространённых рабочих тел в тепловых насосах, фреона R134a, практически невозможно достичь температуры конденсации выше 70 ºС, его критическая температура 101 ºС.

Анализ термодинамических свойств рабочих тел природного происхождения: R717 (NH3 аммиак) R600a (C4H10 изобутан) (рис. 1, 2).

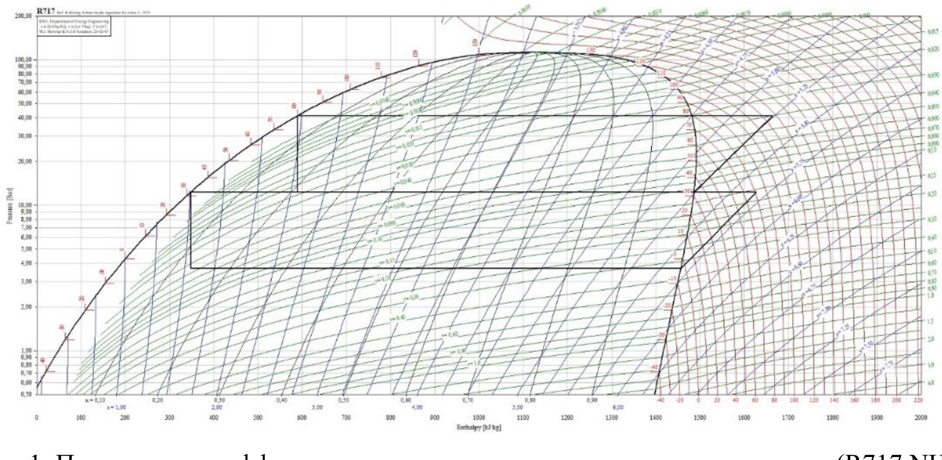


Рис. 1. Пример энергоэффективности двухступенчатого цикла аммиачного (R717 NH3) теплового насоса при температуре испарения и конденсации –4 °С и 80 °С соответственно

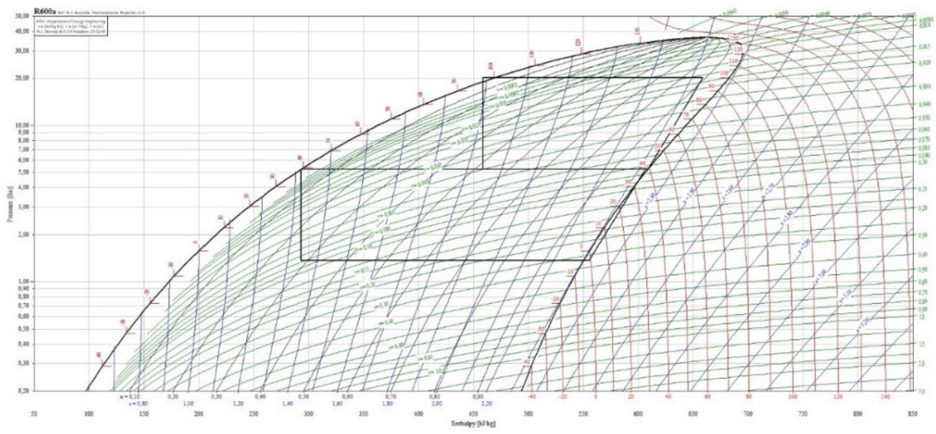


Рис. 2. Пример двухступенчатого цикла высокотемпературного теплового насоса с рабочим телом R600a (C4H10 изобутан). Температура испарения и конденсации -4°C и 100°C соответственно. Перегрев 3К, переохлаждение 3К

Список литературы

1. Бондаренко Д. В., Шевчук И. И. Высокотемпературный тепловой насос для нужд отопления, использующий в качестве источника теплоты воды озера Старая Кубань // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2.

2. Стин Дж. 1998: МЭА Приложение 22: Заключительный Отчет – Инструкции по проектированию и эксплуатации систем компрессионных тепловых насосов, кондиционирования воздуха и охлаждения, работающих на природных рабочих жидкостях. МЭА ПТН Отчет №. HPP-AN22-4. ISBN 90-73741-31-9.

3. Дзино А. А., Малинина О. С. Тепловые насосы: учеб.-метод. пособие. СПб., 2016.

4. Миронова Н. В., Елистратов С. Л., Овчинников Ю. В., Томилова В. Г. Повышение термодинамической эффективности рабочих циклов парокомпрессионных тепловых насосов // Научный вестник НГТУ. 2018. Т. 71, № 2. С. 143–156.

5. Половинкина Е. О. Использование тепловых насосов в системах теплоснабжения зданий и сооружений. URL: https://geo-comfort.ru/images/PDF/Teplovie%20nasosy/Statyi%20po%20teplovym%20nasosam/7781.pdf.

6. Трубаев П. А., Гришко Б. М. Тепловые насосы. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2010.

7. Боне Ян, Хамаока Тадаси, Овсянников Н., Дмитриев В. Утилизация тепла конденсации холодильной установки с помощью аммиачного теплового насоса. MAYEKAWA MFG. CO., LTD. Токио, Япония // Холодильный бизнес. 2015. № 7.

8. CoolPack, 2000. Программа моделирования для тепловых насосов и холодильных установок, разработанная в Техническом Университете Дании (свободно распространяемое ПО). URL: http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИИ

Н. Н. Храпко⁑, Т. Н. Патрушева *

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1
⁑ *khrapko_nn@voenmeh.ru*

В работе рассмотрена перспективная технология создания солнечных элементов. Описано создание элементов, состоящих из системы тонкопленочных оксидных покрытий, полученных экстракционно-пиролитическим методом. Проведено натурное измерение эффективности образцов.

В настоящее время солнечная электроэнергетика имеет самые высокие темпы роста среди всех источников электроэнергии и на ее долю по выработке электричества в 2020 г. приходилось более 2,6 % и это значение увеличивается с каждым годом [1]. Хотя солнечная энергетика обладает рядом преимуществ, чтобы добиться более широкого использования данного вида энергии необходимо решить ряд проблем солнечных элементов, таких как повышение КПД, долговечности, степени экологичности и снижение стоимости [2].

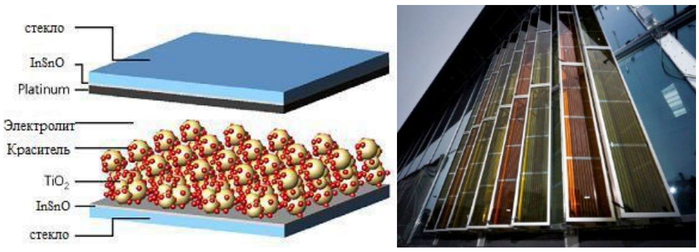
Получение энергии от возобновляемых источников, хотя и считается более экологичным, в сравнении с традиционной углеводородной энергетикой, зачастую также наносит вред окружающей среде. Это обусловлено прежде всего применением громоздкого энергоемкого оборудования и ресурсозатратных технологий производства преобразователей альтернативных источников энергии. Получение кремниевых солнечных батарей сопряжено с использованием вредных веществ, таких как тетрахлорид кремния и неорганических кислоты, а также образованием токсичных отходов.

Тонкопленочные солнечные элементы, сенсибилизированные красителем (DSSC) [3], являются новой более дешёвой технологией создания солнечных элементов. Это солнечные батареи нового поколения, имитирующие естественный процесс фотосинтеза растений, поэтому такую разработку можно отнести к дружественным окружающей среде технологиям, к тому же процесс их производства более экономичен, благодаря использованию тонких слоев материалов.

Одно из главных преимуществ разработки – эффективное накопление энергии вне зависимости от угла падения солнечных лучей. Такие панели могут питаться даже от преломленного или отраженного света. Что особенно актуально для населений с коротким световым днем. Тонкопленочные солнечные панели способны работать на различных частотных диапазонах светового излучения, вплоть до инфракрасного. Еще одно преимущество – возможность производства ячеек из недорогих органических материалов на стекле.

DSSC-элемент в основном состоит из слоев полупроводникового оксида TiO_2, красителя, электролита и катализатора, которые расположены между двумя прозрачными проводящими электродами (рис. 1).

В данной работе для получения DSSC-элемента авторы использовали наиболее практичный, безопасный и экономичный способ получения оксидных пленок – экстракционно пиролитический метод [4]. Пленкообразующие растворы оксидов металлов (титана и индия-олова) получали методом экстракции из растворов солей данных металлов. В качестве экстрагента использовалась смесь органических кислот.



а б

Рис. 1. Функциональная структура и компоненты DSSC (а) и общий вид солнечного модуля (б)

Для получения проводящих электродов готовый раствор оксида индия-олова (ITO) наносился на стеклянные подложки методом накатывания и сушился в вертикальной печи при 580 °С. После получения каждого слоя контролировалось сопротивление стекла, которое уменьшалось с увеличением числа слоев. Сопротивление 12 слоев составило 4–5 кОм. После кипячения в бензиловом спирте сопротивление снизилось до 600–800 Ом. Далее на одно из проводящих стекол наносились слои диоксида титана – TiO_2, методом накатывания, отжиг проводился при температуре 450–500 °С. Слой диоксида титана должен составлять порядка нескольких микрон, что значительно больше толщины слоев ITO, которые не превышали 100 нм. В качестве красителя был использован экстракт рутения, который наносился на слой TiO_2. Далее происходила сборка солнечной ячейки – проводящее стекло с покрытием TiO_2 накрывалось вторым проводящим стеклом, так чтобы оставить место для вывода контактов. Стыки двух стекол запаивались парафином, в пространство между электродами вводился квазитвердый электролит – KI/I_2.

Лабораторный опыт состоял из трёх этапов (частей). Первая часть опыта – создание фотохимического солнечного элемента с применением коммерческой суспензии диоксида титана (TiO_2) «Дегусса» (P25). Во второй части опыта создавалась вторая солнечная ячейка, слой TiO_2 в которой, был получен экстракционно-пиролитическим методом. Заключительная – третья часть опыта состоит в измерении эффективности каждого солнечного элемента и сравнении их КПД.

Измерения продуктивности полученных образцов проводились путем проведения натурного эксперимента. Изготовленные нами солнечные пластины помещались под непрямые солнечные лучи на 5 минут. Мультиметром замерялось напряжение на пластинах. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты фотовольтаических измерений солнечной ячейки с различными покрытиями TiO_2

Покрытие TiO_2	$U_{xx\ осв}$, мВ	$U_{xx\ тен}$, мВ	КПД, %
Трехслойный TiO_2, полученный экстракционно-пиролитическим методом	230 ± 10	40 ± 10	6,1
Коммерческий TiO_2 Дегусса (Р 25)	300 ± 10	70 ± 10	4,5

Экстракционно-пиролитический метод использует экологически безопасные органические растворы экстрактов металлов для нанесения тонких пленок. Для нанесения пленок по данной технологии не требуется дорогостоящего, громоздкого оборудования, такого как вакуумные камеры. Данный метод получения оксидных покрытий позволяет получать солнечные элементы с многослойной структурой фотоанода, обеспечивающей адгезию полупроводникового слоя к проводящему стеклу, повышенное светособирание в нанопористом слое и рассеивание света в макропористом слое.

Список литературы

1. Цопа Н. В., Дикарев А. Е. Перспективы применения возобновляемых источников энергоснабжения для малоэтажных зданий в условиях Крыма // Строительство и техногенная безопасность. 2020. Т. 19 (71). С. 85–92.

2. Гвоздкова Ю. Д., Гвоздкова И. А., Горбачев С. И. Оценка перспектив использования органических материалов в энергоустановках на основе солнечных батарей // Строительство и техногенная безопасность. 2021. Т 20 (72). С. 79–91.

3. Ahmad M. S., Pandey A. K., Rahim N. A. Advancements in the development of TiO2 photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 77. P. 89–108.

4. Патрушева Т. Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей: монография. Красноярск, 2015. 328 с.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC – THERMAL COLLECTOR IN RUSSKY ISLAND

M. Farjad[*], T. A. Soloveva [*]

Far Eastern Federal University
690922, Russian Federation, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok
[*] *Fardzhad.mo@dvfu.ru*

Photovoltaic-thermal (PVT) panels combine solar thermal and photovoltaic technologies and generate simultaneously both heat and electricity in these panels. By using a cooling fluid, the electrical efficiency of the panels is increased, and in addition, because of heat transfer in the panel, the heated fluid is also used to provide the required heat in the building.

In this article, the performance of a simple photovoltaic panel and a photovoltaic-thermal system with similar dimensions in the same weather and environmental conditions are placed and their performance is investigated in different conditions, since the cell is cooled through the extraction of the thermal energy. The output of a PVT system is dependent upon three me- teorological parameters: Ambient temperature, irradiation, and wind speed. In this article, the performance of a simple photovoltaic panel and a photovoltaic-thermal system with similar dimensions in the same weather and environmental conditions are placed and their performance is investigated in different conditions, since the cell is cooled through the extraction of the thermal energy. The obtained results show that considering the effect of various factors, the thermal and electrical efficiency of the system in question is about 46,28 and 22,17 percent, which in- dicates the acceptable performance of the system.

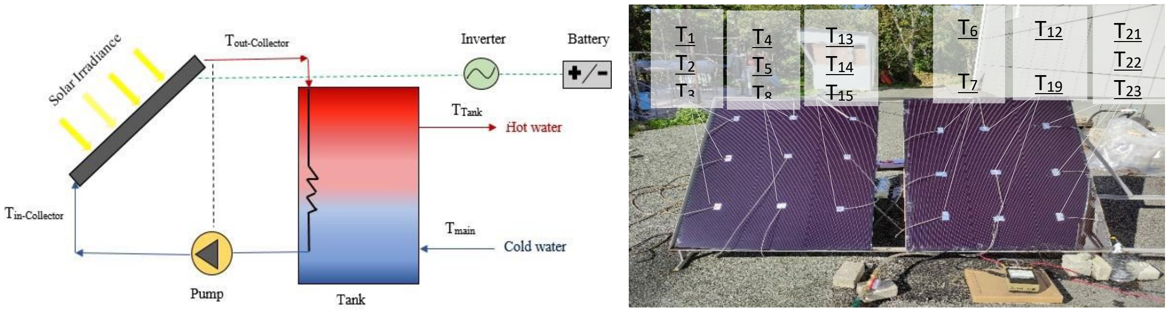


Fig. 1. Schematic of the modeled system and the experimental system

In the photovoltaic system of cold water enters the system through the copper tube behind the panel and helps to cool it and increases the electrical efficiency of the panel. Used as the required hot water (or pre-heating) [1]. The results measured in 23.09.2022 shows that the outlet water temperature changes from 16,4°C at 11:00 to 33,3°C at 16:20, while the temperature of inlet water temperature is about 15°C in whole day (Fig. 2). The average output current and voltage of PVT system were 2,03 A and 50,2 V, respectively.

The measured different points temperatures of a photovoltaic panel ($T_{1\text{-}5}$, T_8, $T_{13\text{-}15}$) and a PVT system ($T_{6,7}$, $T_{11,12}$, $T_{19\text{-}23}$) at different hours of the day shows that the optimal difference between average temperatures is about 17,8 °C in period of 15:00 to 16:40 (Fig. 3).

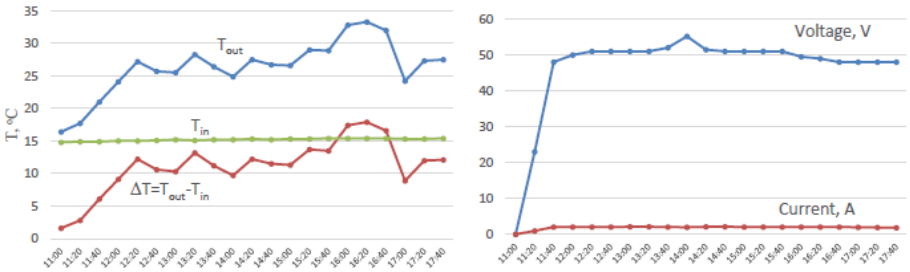


Fig. 2. The Inlet and Outlet water temperature (°C), Current (A) and voltage (V) in a PVT system

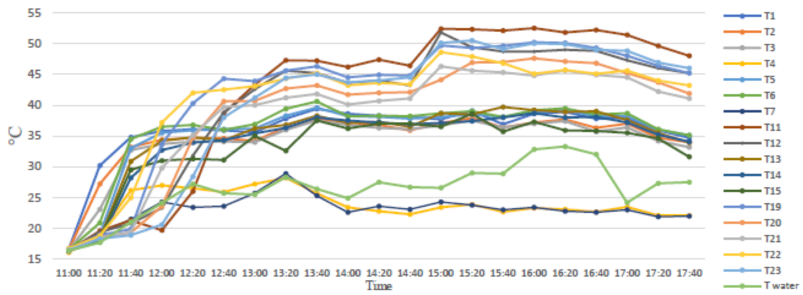


Fig. 3. Measured temperatures of different points of a photovoltaic panel and a PVT system

In Photovoltaic/Thermal systems (PVT) the energy performance can be computed in terms of thermal (η_{th}) and electrical (η_{el}) efficiencies. The electrical and thermal efficiencies are obtained from the following formulas [2]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{AG_{irr}}, \tag{1}$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{AG_{irr}} = \frac{mC_f(T_{out} - T_{in})}{AG_{irr}}, \tag{2}$$

That the electrical power generated by the system is (P_{el}), the amount of solar radiation incident on the surface of the collector (AG_{irr}) and the amount of thermal energy generated by the system (Q_{th}). The Electrical and Total efficiencies of PVT system were shown in a whole day (Fig. 4).

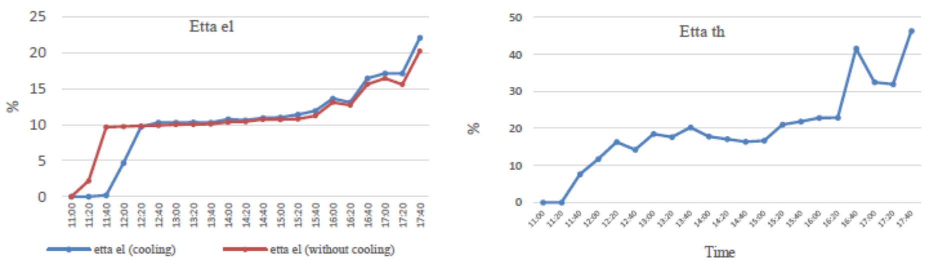


Fig. 4. Electrical and Total efficiencies of a PVT system in a same day

The obtained results show that with the increase of the inlet water flow rate, the temper- ature of the panel decreases more, and the electrical efficiency of the system increases, but the thermal efficiency decreases accordingly. The optimal efficiency of the system occurred at a water flow rate of 0,004 liters per second, which resulted in an electrical efficiency of 18,07 And the thermal efficiency was 40,73 percent. In this discharge, an increase in electrical efficiency of 11,36 percent was observed compared to the photovoltaic panel without cooling, which is a significant difference.

The Experimental calculations and the mathematical modeling were supported by the project of the FEFU (Program “PRIORITY 2030”: Engineering Center).

References

1. BRE National Solar Centre. Hybrid Solar Photovoltaic Thermal Panels-Low Carbon Heating Technologies; BRENational Solar Centre: London, UK, 2016.

2. Bombarda P.; Di Marcoberardino G.; Lucchini A.; Leva S.; Manzolini G.; Molinaroli L.; Pedranzini F.; Simonetti R. Thermal and electric performances of roll-bond flat plate applied to conventional PV modules for heat recovery. Appl. Therm. Eng. 2016, 105, 304–313.

Секция 5
«Теплофизика природных явлений»

ДИССИПАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД (ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

Ф. С. Белоусов[‡], В. А. Трофимов, Ю. А. Филиппов [*]

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН
111020, Российская Федерация, Москва, Крюковский тупик, 4
[‡] belousovf@ipkonran.ru

Создана геомеханическая численная модель для оценки параметров сферической волны в геологической среде, включая рассеяние сейсмической энергии от точечного источника. Для упруго-линейных и поглощающих сред проведены расчеты с использованием метода конечных элементов. Из расчетов следует, что созданный численный метод корректно воспроизводит волновые явления в линейно-упругой среде и, вероятно, может быть применен в более сложных сценариях.

Сейсморазведка – геофизический метод, используемый для изучения строения земных недр и свойств пород. Данный геофизический метод позволяет принимать обоснованные решения при строительстве и разработке месторождений полезных ископаемых. Основой метода является анализ параметров сейсмической волны, которая взаимодействует с массивом пород. Однако строение массива может быть сложным, и простые соотношения в некоторых случаях могут быть неадекватными. Для анализа параметров распространения сейсмической волны в массиве используется численное моделирование, которое позволяет адекватно отображать более сложные геологические и горнотехнические ситуации. Применение численного моделирования является важным фактором в развитии современных геофизических сейсмических методов [1]. Однако использование численных методов требует адаптации и калибровки расчетного алгоритма. В статье описывается использование программного комплекса ANSYS для решения динамических задач с сейсмическим воздействием.

В работе рассматривается задача о точечном воздействии на бесконечный упругий массив горных пород. Фактически это модельное представление взрыва [2–4]. В силу симметрии задачи расчеты проводятся только для одного октанта, представляющего собой кубическую область с ребром 100 м и конечно-элементной сеткой, содержащей ~1 млн элементов.

В начале исследования решалась задача о распространении взрывного импульса в упругой среде. На рис. 1 представлено положение волны возмущения на момент времени $t = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ с от начала процесса, где цвета показывают распределение смещений. Таким образом, проанализировано распространение волны возмущения в упругой среде.

По причине симметрии нагрузки форма волны является шаром с переменным радиусом. При достижении этим шаром границ расчетной области волна отражается в зависимости от граничных условий либо от закрепленной, либо от свободной поверхности. До этого момента модель отражает процесс в бесконечной среде, как изначально предполагалось. Однако после отражения решение становится непригодным для поставленных целей и его не следует учитывать, хотя расчет может быть продолжен.

Легко определить положение фронта волны и вычислить скорость распространения при известном времени. Для исследуемой упругой среды получено, что скорость распространения волны будет постоянной и составляет примерно 3000 м/с. Данное значение совпадает с теоретической величиной, которая вычисляется на основе деформационных свойств среды, принятых для моделирования, с точностью до процентов.

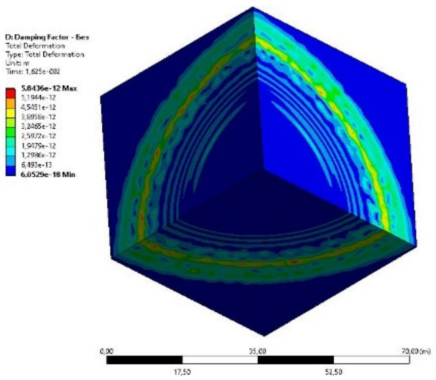


Рис. 1. Пространственное перераспределение волны в момент времени $t = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$

Анализ затухания волны по пространству позволяет построить аппроксимирующую функцию для максимальных значений смещений в виде убывающей степенной функции, которая показывает, что убывание обратно пропорционально расстоянию до источника и имеет следующий вид $\sim \dfrac{A}{r^{0.997}}$, что в полной мере соответствует хорошо известной теоретической зависимости.

На рис. 2 показано распределение потенциальной энергии деформирования для рассмотренной волны возмущения на разные моменты времени. Цветовые шкалы демонстрируют постепенное рассеяние этой энергии в силу расходящегося движения волны.

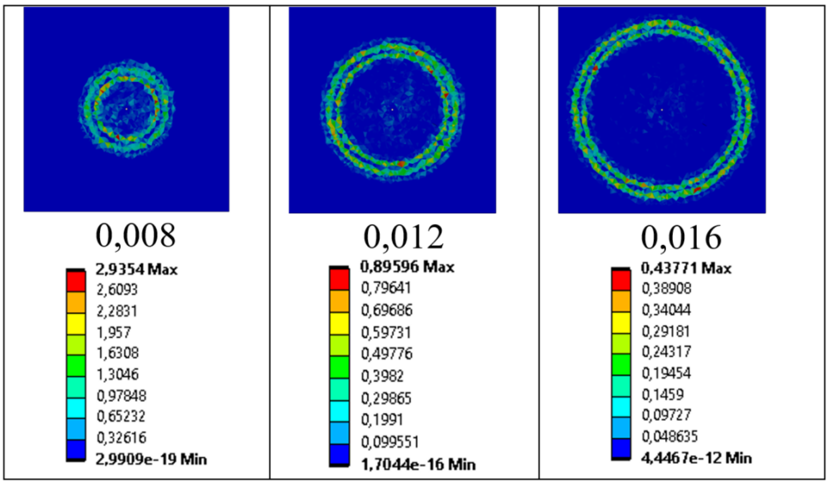


Рис. 2. Рассеяние потенциальной энергии

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что разработанный численный подход адекватно моделирует волновые процессы для линейно-упругой среды и, вероятно, может использоваться в более сложных случаях.

Список литературы

1. Белоусов Ф. С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок // Инженерная физика. 2021. № 1. С. 49–56.

2. Менжулин М. Г., Афанасьев П. И., Коршунов Г. И., Щипачев А. С. Влияние взрывных работ разреза «Заречный» на капитальные горные выработки шахты «Тал-

динская-Западная-2» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. Т. 2. С. 591–596.

3. Erten O., Konak G., Kizil M. S., Onur A. H., Karakus D. Analysis of quarry-blast-induced ground vibrations to mitigate their adverse effects on nearby structures // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2009. V. 1. N 4. P. 313–326.

4. Bernardo G., Guida A., Mecca I. Advancements in shotcrete technology // Conference: STREMAH. 2015. P. 591–602.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Ф. С. Белоусов[‡]**, А. В. Шляпин** [*]

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН
111020, Российская Федерация, Москва, Крюковский тупик, 4
[‡] *belousovf@ipkonran.ru*

Одной из главных проблем при комбинированной отработке месторождений полезных ископаемых является недостаточная оценка взаимного влияния и взаимосвязи открытых и подземных горных работ. Это может создать опасные условия для работы горняков и привести к техногенной катастрофе. Чтобы предотвратить такую ситуацию, необходимо использовать оптимальный метод контроля, который позволит оценить изменения строения и упругих свойств в локальных областях массива горных пород. Для этой цели в работе рассмотрен метод ультразвукового каротажа в вертикальных скважинах, который позволяет оценить строение и физико-механические свойства массива горных пород по глубине. В результате опытно-промышленных исследований была выявлена возможность обнаружения неоднородностей упругих свойств массива горных пород на малых интервалах прозвучивания. Каротажные диаграммы, полученные в результате исследований, могут быть использованы для определения зон возможной трещиноватости исследуемого массива, включая горизонтальную слоистость.

При разработке месторождений полезных ископаемых все чаще используется комбинированный метод открытых и подземных горных работ, который позволяет улучшить эффективность извлечения полезных ископаемых и снизить вредное влияние на окружающую природу. При этом необходимо учитывать природно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия, а также технологическую взаимосвязь открытых и подземных горных работ, чтобы избежать возможной техногенной катастрофы. В работе рассматривается применение метода ультразвукового каротажа для определения изменений с глубиной строения и физико-механических свойств массива горных пород по скоростям продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн. Это поможет выявить возможные зоны геологических нарушений и решить технологические задачи, связанные со снижением влияния горных работ на вышерасположенный защитный целик. Исследования методом шахтного ультразвукового каротажа, направленные на изучение строения и физико-механических свойств массива горных пород, имеют важное промышленное значение и являются актуальной задачей.

Для ультразвуковых исследований использовалась искровзрывобезопасная станция УК-2010 с семиэлементным скважинным зондом, разработанная в ИПКОН РАН. Зонд имеет семь пьезоэлектрических датчиков (приёмников сигнала) с шагом 10 см, выполненных из кристаллов сегнетовой соли, расположенных в герметичных латунных корпусах с наполнителем из касторового масла. Датчики точечно прижимаются к стенке скважины, обеспечивая надежный контакт с породой. Крепежный узел в передней части зонда с возможностью регулировки расстояния от приёмников сигнала используется для излучения акустических колебаний. Регистрация акустического сигнала осуществляется на частоте свыше 15 кГц. Это оборудование позволяет выбирать методику наблюдений в зависимости от целей исследований и условий приёма.

Ультразвуковые исследования были выполнены по общепринятой методике [1, 2]. Обработка данных включала выделение и корреляцию продольных и поперечных волн, на основе которых рассчитывались скорости и строились каротажные диаграммы.

Анализ скоростей определял наличие зон трещиноватости, разуплотнения и напряженного состояния пород [3].

Ультразвуковой каротаж был выполнен на горизонтах –210 (две скважины), –265 (две скважины) и –310 (три скважины) с глубиной каждой вертикальной скважины около 20 м и шагом между измерениями 0,1 м. В некоторых скважинах был зафиксирован подъем воды с мелкодисперсной фракцией, что может свидетельствовать о наличии питающих трещин в массиве и последующем изливе.

По результатам метода УЗК по скоростям продольных и поперечных волн по трем исследуемым горизонтам получено, что скорости продольных волн варьируются от 2,52 до 4,8 км/с, что указывает на неоднородность исследуемой среды. На основе полученных данных построены каротажные диаграммы, отображающие изменения скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн с глубиной (рис. 1).

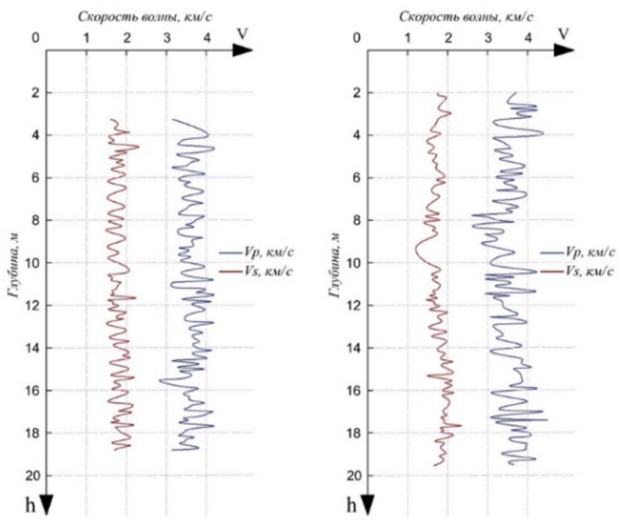


Рис. 1. Примеры каротажных диаграмм на основе данных УЗК
(для горизонтов −265, скважины 1 и 2)

При более тщательном анализе диаграмм заметно, что кривые скоростей упругих волн имеют многочисленные изменения (шаг составляет от 0,2 до 0,4 м) на всем протяжении, что может свидетельствовать о возможной слоистой структуре или трещиноватости исследуемого массива. Согласно первоначальным горно-геологическим данным исследуемого рудника АК «АЛРОСА», все трещины в кимберлитовом массиве имеют размеры от 1 до 7 мм и содержат минерализацию, преобладающим заполнителем является галит [4].

Ультразвуковой каротаж вертикальных скважин показывает высокую эффективность для определения упругих характеристик исследуемого массива. Излив мелкодисперсной фракции контрольных скважин может указывать на наличие питающих трещин. Выявлена изменчивость свойств горных пород на малых интервалах прозвучивания по каротажным диаграммам метода УЗК, что свидетельствует о горизонтально слоистой (трещиноватой) структуре исследуемого массива. Ультразвуковые измерения рекомендуется использовать для локальных исследований свойств массива горных пород, а также для лабораторных определений физико-механических свойств и установления корреляционных связей для интерпретации данных сейсмического просвечивания в величинах степени трещиноватости и интегральных физико-механических свойств.

Список литературы

1. Белоусов Ф. С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок // Инженерная физика. 2021. № 1. С. 49–56.

2. Савич А. И. и др. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969. 239 с.

3. Шкуратник В. Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы: учеб. пособие. М.: МГИ, 1990.

4. Исходная горно-геологическая и техническая информация по руднику «Мир» // г. Мирный, институт «Якутнипроалмаз», 2018. 36 с. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2018/01/Исходная-горно-геологическая-и-техническая-информация.docx.

УЧЕТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ВОДОЕМА

Е. Н. Васильев*

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
ven@icm.krasn.ru

В работе рассмотрена нестационарная вычислительная модель для определения температурного режима водоема и динамики ледяного покрова в холодное время года. Модель основана на численном решении задачи Стефана, в которой учитывались основные климатические факторы: температура и влажность воздуха, параметры снежного покрова, поток солнечной радиации, скорость ветра, состояние поверхности и внутренних слоев водоема. Моделирование динамики ледяного покрова дает возможность оценки безопасности ледовых переправ.

В холодных регионах ледовые переправы обеспечивают доступ к удаленным населенным пунктам, обеспечивая грузовое снабжение и транспортировку людей. Для безопасности использования ледовых переправ необходимо прогнозирование установления ледяного покрова и оценка его прочности. Прочность ледяного покрова зависит от многих факторов: толщины, температуры, структуры льда и др. Влияние этих факторов существенно меняется в зависимости от климатических условий. Настоящая работа посвящена вычислительному моделированию состояния ледяного покрова, что позволяет оценивать его динамику с учетом основных метеорологических данных.

Моделирование динамики ледового покрова водоема проведено на основе численного решения задачи Стефана. Задача представлена в обобщенной формулировке, когда теплота фазового перехода «лед – вода» 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 – вертикальная координата, направленная вниз от поверхности водоема; q_v – мощность объемного источника теплоты, обусловленного поглощением потока солнечного излучения в глубине водоема. Неоднородность c_s, ρ и λ связана с наличием фазового перехода и различием теплофизических свойств воды, льда и снега. Уравнение теплопроводности дополнено граничным условием третьего рода на верхней границе водоема

$$\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_T T\right]_{x=0} = q\big|_{x=0},$$

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 окружающей среды, толщины слоя снега, величины радиационного потока, теплофизических свойств воды, льда и снега, скорости ветра и состояния поверхности водоема.

Климатические условия при моделировании учитывались в виде таблиц среднесуточных значений температуры, влажности, скорости ветра и мощности солнечного излучения в течение холодного периода. В расчетах использованы климатические данные холодного периода (октябрь 2021 г. – март 2022 г.) метеостанции Минино (широта 56,07; долгота 92,73), которая находится у озера Бугач.

Температурный режим водоема и динамика нарастания ледового покрова определяется балансом тепловых потоков, соотношение этого баланса в значительной степени зависит от наличия снега и его толщины. На рис. 1 представлены результаты вычислительного моделирования при толщине снега 10 см, временные зависимости отображают температуру атмосферного воздуха (1), поверхности льда (2) и на глубине 10 см (3) в слое льда.

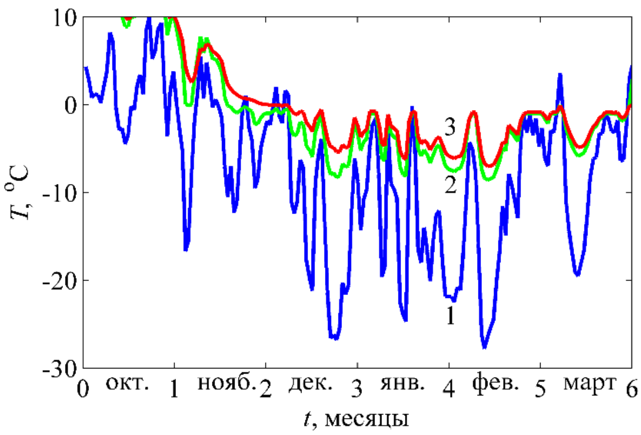


Рис. 1. Временные зависимости температуры

Рассчитанные временные зависимости толщины льда $d(t)$ приведены на рис. 2, численные значения на графиках указывают соответствующую расчету толщину снежного покрова в сантиметрах. Толщина слоя снега на ледовом покрове существенно влияет на тепловой баланс водоема из-за изменения значений альбедо и степени черноты поверхности водоема, а также вследствие низкой теплопроводности, приводящей к дополнительной теплоизоляции льда.

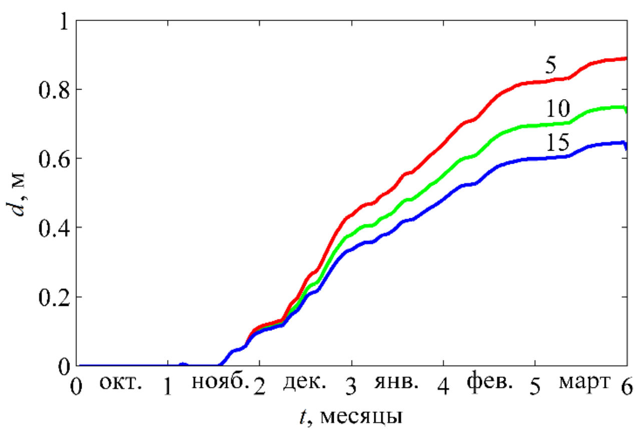


Рис. 2. Временные зависимости толщины люда

Вычислительное моделирование дает возможность непрерывно и оперативно получать информацию о динамике ледяного покрова с учетом всего комплекса метеорологических факторов. При этом результаты моделирования требуют периодической корректировки для учета реальной толщины и состояния снежного покрова на поверхности водоема, на которое помимо общего количества осадков существенное влияние оказывает воздействие ветра, солнечного излучения, прибрежного рельефа и растительности.

Список литературы

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.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ СВОБОДНОПЛАВАЮЩЕГО ТЕЛА В КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ

А. Ю. Васильев*, Е. Н. Попова,
П. Г. Фрик, А. Н. Сухановский [*]

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Российская Федерация, Пермь, ул. Академика Королева, 1
** vasiliev.a@icmm.ru*

Экспериментально изучена одномерная динамика свободноплавающего тела в условиях естественной конвекции при радиационном нагреве. Эксперименты показали, что динамика тела зависит от поглощающих свойств поверхности тела. Если поверхность диска отражает свет, наблюдаются квазипериодические движения тела. Период колебаний зависит как от длины полости, так и от глубины погружения диска. Если поверхность диска поглощает свет, диск перемещается к одной из боковых стенок и остается в этом положении длительное время.

Естественная конвекция является основным источником движения в самых разных геофизических системах, таких как атмосфера, океан, мантия, и обеспечивает эффективный перенос тепла. Пространственно-временная динамика конвективных течений существенно зависит от геометрии области, граничных условий и физических свойств среды. Кроме того, на поведение конвективной системы может оказывать влияние наличие свободноплавающего тела на поверхности или в объеме жидкости, которое блокирует потоки импульса и тепла. К таким системам можно отнести тепловую конвекцию в мантии, которая вовлекает литосферные плиты в движение, что приводит к изменению структуры течения. Обратная связь приводит к более сложной динамике конвективного течения. Лабораторное моделирование взаимного влияния конвективного течения и свободноплавающего тела друг на друга проводились в идеализированной постановке [1, 2]. Другой пример системы, в которой наблюдается блокировка потока тепла, – атмосфера. Ключевую роль в тепловом балансе Земли играют облака, поскольку они рассеивают и поглощают коротковолновое излучение от Солнца и поглощают длинноволновое излучение, испускаемое земной поверхностью [3]. Блокировка радиационного нагрева Земли облаками заслуживает особого внимания, поскольку блокировка влияет на атмосферную циркуляцию. В данной работе экспериментально исследуется динамика свободноплавающего тела в объеме жидкости в условиях естественной конвекции при радиационном нагреве.

Экспериментальная установка представляет собой прямоугольную полость длиной 500 мм, шириной 100 мм и высотой 180 мм. Вертикальные стенки изготовлены из оргстекла толщиной 10 мм. Основание модели изготовлено из стеклотекстолита толщиной 10 мм и выступает в качестве нагревателя. Для поглощения электромагнитного излучения поверхность основания, которая контактирует с рабочей жидкостью, покрашена в черный матовый цвет. В основании имеются девять отверстий, в которые устанавливаются термопары. Нагрев нижней поверхности осуществляется при помощи света от светодиодной панели. Использование светодиодов, а не ламп накаливания, в качестве источника света обусловлено спектром излучения. В спектре обычной лампы накаливания присутствует сильное инфракрасное излучение, в связи с чем верхние слои рабочей жидкости будут поглощать инфракрасное излучение, что приведет к постепенному прогреву жидкости. Инфракрасное излучение в спектре диодов практически отсутствует. В экспериментах верхняя граница свободная. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода. Средняя температура в объеме жидкости

23 °C, что соответствует числу Прандтля Pr = 6,5. В экспериментах толщина слоя воды фиксированная (H = 40 мм), а длина полости L и положение плавающего диска h варьировались. Все эксперименты выполнены для числа Рэлея Ra = 10^6.

Свободноплавающие тело представляет собой плексигласовый диск толщиной 1 мм и диаметром 98 мм. В экспериментах использовались два диска одинакового размера, но с разными поглощающими свойствами поверхности. Поверхность одного диска покрашена в черный матовый цвет для поглощения излучения, а на поверхность другого диска наклеена тонкая пищевая фольга, которая служит для отражения света. Погружение тела на заданную глубину осуществляется при помощи тонкого стержня, установленного в центре диска. На конце стержня закреплена шайба из пористого материала, которая остается на свободной поверхности жидкости за счет действия сил поверхностного натяжения. Перемещения шайбы вдоль стержня регулируют высоту между диском и основанием экспериментальной установки. Движение диска регистрируется на камеру. В качестве индикатора положения используется тонкий стержень. Изображения положения диска сохраняются с интервалом времени 20 секунд.

На рис. 1 представлена временная эволюция координаты центра диска и показания термопар, установленных в основании экспериментальной модели. Во всех выполненных экспериментах с фольгированным диском наблюдаются квазипериодические движения. По показаниям термопар также можно определить положение диска. Диск, отражая свет, тем самым блокирует поглощение света нижней поверхностью, что приводит к уменьшению температуры под диском. Во всех режимах интервал времени, когда диск покоится вблизи боковых стенок, не одинаков. Интересная особенность наблюдается, когда поверхность диска поглощает излучение от светодиодной панели. В этом случае диск сдвигается к одной из боковых стенок и длительное время не меняет своего положения.

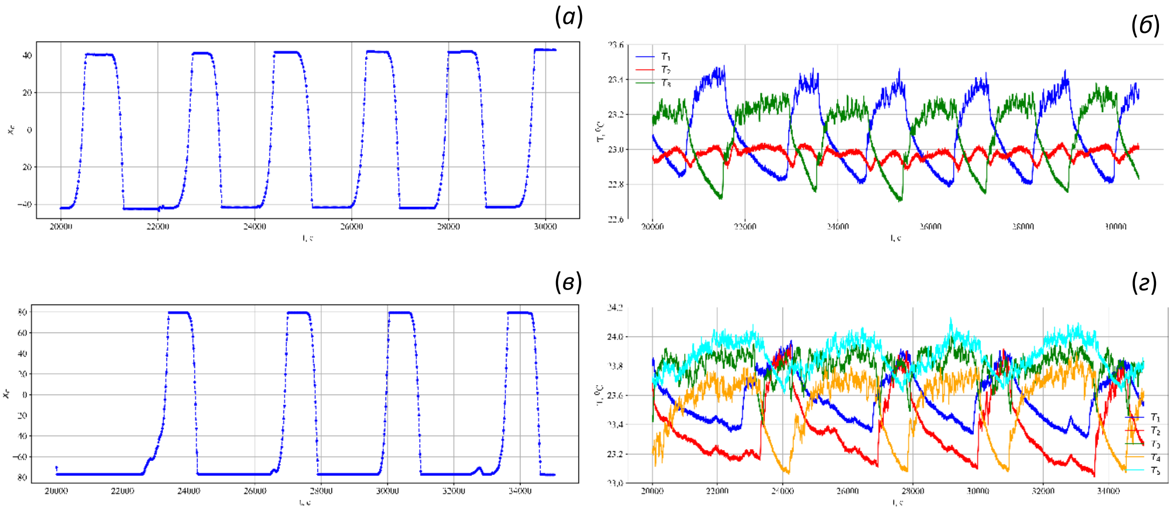


Рис. 1. Временная эволюция координаты центра диска x_c (*а, в*) и температуры на нижней поверхности (*б, г*) в случае фольгированного диска: *а*, *б* – L = 180 мм, h=4 мм; *в*, *г* – L = 250 мм, h = 4 мм

Эксперименты со светоотражающей поверхностью диска показали, что период колебаний зависит от размера прямоугольной полости и от положения диска относительно основания модели. При фиксированной длине полости период колебаний уменьшается с увеличением глубины плавания тела. В случае фиксированной глубины период колебаний увеличивается с увеличением длины полости.

Работа выполнена за счет проекта РНФ № 22-61-00098.

Список литературы

1. Попова Е. Н., Фрик П. Г. Крупномасштабное течение в турбулентном конвективном слое с погруженным в него подвижным теплоизолятора // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 6. С. 41–47.

2. Попова Е. Н., Васильев А. Ю., Сухановский А. Н., Фрик П. Г. Динамика конвективной системы с плавающим протяженным теплоизолятором // Вестник Пермского Университета. Физика. 2022. № 3. С. 38–47.

3. Чернокульский А. Климат как отражение облаков // Наука и жизнь. 2017. № 10. С. 70–77.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

А. А. Гаврилов[1⁑], Д. В. Платонов[1, 2], А. Н. Сухановский[3] [*]

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН|
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[2] Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[3] Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Российская Федерация, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
[⁑] gavand@yandex.ru

Представлены результаты прямого численного моделирования лабораторной установки, представляющей собой горизонтальный вращающийся слой с нагревателем на дне вблизи боковой поверхности и центральным холодильником. Полученные численные результаты качественно сравниваются с экспериментальными данными. Моделирование демонстрирует формирование крупномасштабных бароклинных вихрей и трёх меридиональных ячеек в волновом режиме течения.

Лабораторное моделирование помогает в понимании основных закономерностей и явлений общей циркуляции атмосферы, играющей важнейшую роль в погодных и климатических процессах. Лабораторная модель в идеализированной постановке, созданная в Институте механики сплошных сред УрО РАН, воспроизводит основные черты глобальной атмосферной циркуляции: антициклоническое течение на малых широтах и циклоническую циркуляцию в областях средних и полярных широт [1, 2]. Прямое численное моделирование позволяет получить детальную информацию о течении в лабораторной модели. Доклад посвящён верификации и валидации численной модели вращающегося слоя со свободной конвекцией.

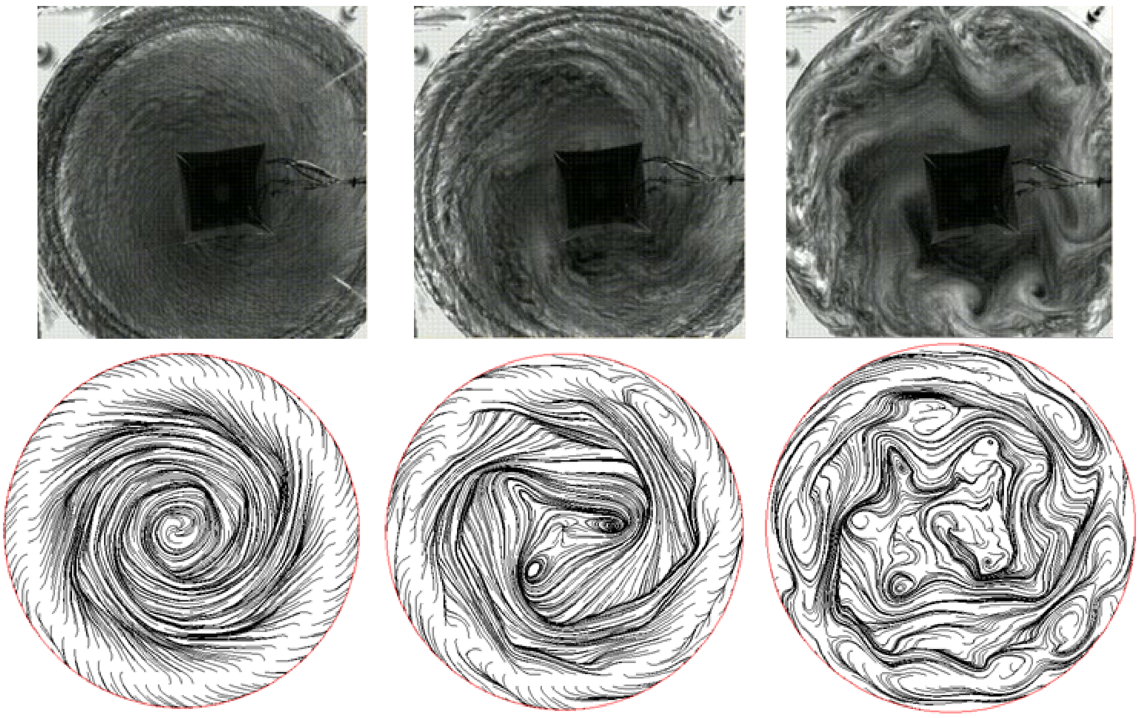
Исследуемая модель представляет собой вращающийся слой с кольцевым нагревателем вблизи боковой стенки на дне. Охлаждение происходит на свободной верхней границе и при помощи холодильника, расположенного в центральной части верхней границы. В численных расчетах задаётся однородный постоянный поток тепла на свободной поверхности. На лабораторной установке была проведена серия качественных экспериментов с визуализацией течений алюминиевой пудрой при фиксированных значениях тепловой мощности на нагревателе и холодильнике с различными значениями скорости вращения.

Для моделирования течения используются два пакета вычислительной гидродинамики SigmaFlow [3] и Ansys Fluent. Пакет Ansys Fluent используется для кросс-верификации численных результатов. Численная модель реализуется в постановке, приближенной к экспериментальной. Нестационарное пространственное течение ньютоновской несжимаемой жидкости моделируется в приближении Буссинеска. Для численных расчетов выбраны три режима: 1) с медленным вращением с периодом Trot = 77 с; 2) переходной режим при Trot = 47 с; 3) волновой с быстрым вращением при Trot = 17 с.

Качественное сравнение лабораторной и численной моделей показано на рис. 1 в виде мгновенных картин течения. С уменьшением периода вращения Trot происходит смена режима, от осесимметричного течения идёт переход к более сложному, в котором на фоне основного течения происходит формирование волн. Численные расчёты хорошо воспроизводят различные режимы течений, наблюдаемые в лабораторной установке.

Нагрев жидкости на нижней стенке приводит к развитию подъёмного течения от нагревателя и формированию двух сопряжённых кольцевых вихрей у свободной поверхности. Опускное течение в центре слоя от холодильника сопровождается генерацией вихревых структур, локализованных в центральной части. В режиме 1 с медленным вращением внешние вихревые структуры, вызванные подъемным тёплым течением, остаются слабо возмущены и сохраняют кольцевую форму. В течении наблюдаются вытянутые в тангенциальном направлении вихри, сопровождающиеся радиальным переносом тепла к центру.

Течение в режиме 2 радикально отличается от режима 1. Вихри подъёмного от нагревателя течения не образуют единого кольца. В промежуточной области наблюдается формирование нескольких долгоживущих крупномасштабных вихрей с низкой температурой. В разные моменты времени обнаруживаются от 3 до 4 крупных вихревых структур. Режим 3 также соответствует волновому режиму с низкотемпературными крупномасштабными вихрями в середине слоя. В отличие от режима 2, течение в режиме 3 содержит больше вихревых структур во внешней области.



а) б) в)

Рис. 1. Мгновенное течение. Верхний ряд – лабораторный эксперимент, нижний ряд – траектории частиц в относительном движении, численный расчёт. Период вращения Trot, с: а – 77; б – 47; в – 17

Проведены прямые численные расчёты трёх выбранных режимов течения во вращающемся слое со свободной конвекцией. Приведены распределения первых и вторых моментов основных полей, демонстрирующие отличия различных режимов течения в модели вращающегося слоя. Численное моделирование лабораторной установки демонстрирует формирование крупномасштабных бароклинных вихрей и трёх меридиональных ячеек в волновом режиме течения.

Исследование выполнено за счёт гранта РНФ № 22-61-00098.

Список литературы

1. Сухановский А. Н., Васильев А. Ю., Попова Е. Н. Режимы течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // Пермские гидродинамические научные чтения. 2022. С. 434–438.

2. Sukhanovskii A., Popova E. A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // arXiv preprint arXiv:2210.15266. 2022.

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. Vol. 4. N 2. С. 117–122.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕЗАМЕРЗАЮЩЕЙ РЕКИ ЕНИСЕЙ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В. В. Заворуев[1*], О. Э. Якубайлик[1,2], О. В. Соколова[2] *

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
[2]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
** valzav@icm.krasn.ru*

Рабочая гипотеза, сформулированная по результатам анализа теоретической работы М. Хребтова и К. Ханъялича [1], состояла в том, что над рекой Енисей существуют значительные градиенты температуры и влажности, которые оказывают существенное влияние на распределение взвешенных частиц в приземном слое атмосферы. Для оценки ситуации были проведены экспериментальные исследования с использованием сети станций мониторинга воздуха. Измерения концентраций взвешенных частиц были выполнены зимой, когда в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) наблюдаются очень высокие уровни загрязнения атмосферы в Красноярске. Установлено, что над незамерзающей рекой Енисей концентрация взвешенных твердых частиц меньше или такая же, как над территорией левого и правого берега. В пределах точности используемой аппаратуры не обнаружены градиенты температуры и относительной влажности в приземной воздушной среде, расположенной в границах города.

После строительства Красноярской ГЭС на Енисее сформировалась самая протяженная полынья. В зависимости от зимних условий её длина варьирует от 105 до 315 км. В нижнем бьефе на расстоянии 26–60 км от плотины расположен город Красноярск. Ширина русла Енисея в черте города варьирует от 570 до 1800 м, а приблизительная площадь акватории реки составляет 6–8 % от общей площади города Красноярска. Таким образом, в условиях Сибири сформировалась уникальная ситуация, когда в зимний период в центре миллионного города имеется незамерзающая водная поверхность площадью до 30 км^2.

Цель работы состояла в оценке влияния незамерзающей реки Енисей на экологическое состояние приземного слоя атмосферы г. Красноярска в периоды НМУ.

Измерение концентрации $PM_{2,5}$, температуры и относительной влажности воздуха проводили с помощью станций мониторинга воздуха CityAir. Они размещены на постах «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» (http://air.krasn.ru). Были использованы данные со станций, которые расположены на двух профилях. В состав первого и второго профиля входят четыре (Покровка; Ленина, 41; о. Молокова; Кировский) и пять (Шахтеров, 25; Партизана, 3г; о. Татышев; Спутник; Черемушки) станций соответственно. Посты, расположенные на островах Молокова и Татышев, предназначены для получения данных о состоянии атмосферы над руслом реки Енисей. Остальные посты характеризуют городскую воздушную среду на различном удаление от русла реки.

С помощью навесного оборудования, установленного на квадрокоптере, получены доказательства того, что станции CityAir, размещенные на островах, адекватно и непрерывно отслеживает ситуацию над акваторией Енисея от правого до левого берега [2].

Оценку загрязнения атмосферы над руслом Енисея проводили путем сравнения концентраций $PM_{2,5}$ на постах профилей. Для этого двадцатиминутные концентрации

$PM_{2,5}$, которые получены в определенный (задачей исследования) период со всех станций мониторинга, разбивали на две группы, условно названые «р. Енисей» и «город». Для каждой группы рассчитывали средние концентрации $PM_{2,5}$ и доверительные погрешности (Р = 0,95).

Согласно официальным сообщениям Среднесибирского УГМС, в январе 2021 г. на территории города Красноярска пять раз формировались метеорологические условия, неблагоприятные для рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе. Для этого зимнего месяца были рассчитаны среднесуточные концентраций $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере города и русла реки (рис. 1). Во все дни НМУ, кроме 9 января, загрязнение атмосферы над рекой было достоверно ниже, чем над городом. Впрочем, такая же закономерность наблюдалась в дни отсутствия НМУ, за исключением 14 и 24 января. Следует заметить, что в январе величины среднесуточных концентраций $PM_{2,5}$ в воздухе над рекой Енисей всегда были ниже, чем над городом.

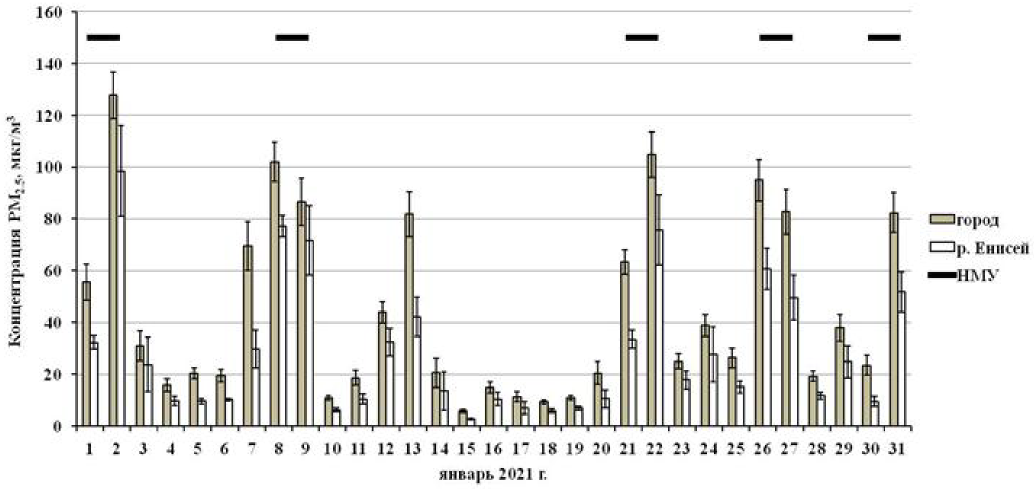


Рис. 1. Среднесуточные концентрации $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере над рекой Енисей и прилегающей к ней территории города Красноярска в январе 2021 г. Черные горизонтальные линии обозначают периоды НМУ

Аналогичным с РМ образом была выполнена оценка величин температуры и относительной влажности над акваторией реки Енисей и территорией города.

В зимний период 2020/2021 максимальная разница температур достигала 1,3 °С. Во всех остальных случаях разница была менее 1,0 °С. С учетом того, что точность датчика температуры стационарной станции мониторинга составляет ±1,0 °С, температурные различия нужно считать недостоверными. В результате проведенных исследований установлено, что в морозных условиях (до минус 37 °С) температура воздушной среды над акваторией реки Енисей не отличалась от температуры приземного слоя атмосферы над территорией города.

Установлено, что в приземном слое атмосферы относительная влажность воздуха над акваторией реки не превышает, а в некоторых случаях меньше, чем в воздушной среде над территорией города.

В заключение следует отметить следующее. Модельные расчеты предсказывали наличие градиента температуры (до 6 °С) над руслом Енисея [1]. Однако в течение трех зимних периодов такого градиента не удалось зафиксировать.

Авторы выражают благодарность АО «Красноярская ГЭС» и компании En+ Group за содействие в выполнении представленной работы.

Список литературы

1. Hrebtov M., Hanjalic K. Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // Boundary Layer Meteorology, vol. 163(3), pp. 469–495, 2017.

2. Yakubailik O. E., Tokarev A. V., Kadochnikov A. A., Zavoruev V. V., Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V. Monitoring and assessment of the state of the atmosphere over the Yenisei riverbed using drone // CEUR Workshop Proceedings, v. 3006, pp. 384–391, 2021.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКИ ЕНИСЕЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

В. В. Заворуев[1*], О. Э. Якубайлик[1],
А. В. Токарев[1], К. В. Краснощеков[2], А. В. Дергунов[2] *

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
[2]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
* *valzav@icm.krasn.ru*

Создан аппаратно-программный измерительный комплекс для мониторинга теплофизических характеристик реки Енисей, обеспечивающий непрерывное измерение температуры воды и воздуха, влажности вблизи поверхности воды. По результатам измерений формируется база данных, на основе которой можно оценивать температурные градиенты, взаимосвязи между различными теплофизическими параметрами.

Назначение измерительного комплекса – определение теплофизических характеристик реки Енисей для решения экологических задач, связанных с влиянием зарегулированной и незамерзающей реки на состояние окружающей природной среды в районе миллионного города. Измерительный комплекс представляет собой линейно распределённую по руслу реки сеть измерительных устройств, информация от которых передается через веб-сервисы в систему хранения данных. Датчики устройств непрерывно регистрируют измеряемые параметры с дискретностью полчаса-час. В базе данных представлены следующие параметры: температура воды; температура и относительная влажность воздуха на различных высотах от зеркала речной поверхности; уровень воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (около плотины); скорость сброса воды.

Устройства измерительного комплекса размещены в двух зонах реки Енисей. Первая зона находится вблизи правого берега на расстоянии 440 м от Красноярской ГЭС. Вторая зона расположена в центральной части города Красноярска, на расстоянии около 40 км от плотины ГЭС; это акватория Енисея между левым берегом реки и о. Молокова.

В первой зоне установлены следующие устройства:

1. «Термокоса плавающая» – это «поплавок» (буй) с установленным на нем стержнем длиной около 1 м, на котором на разной высоте от 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, ведут запись в свою память с периодичностью 1 час. Еще один дата-логгер измеряет температуру воды.

В качестве дата-логгеров используются регистраторы температуры TR-5L (DS1925L-F5). Они работают в диапазоне –40…+85 °С с точностью ±0,5 °С. Регистратор TR-5L внесен в Госреестры СИ РФ, РБ и Реестр ГСИ РК, имеет энергонезависимую память на 125 тыс. измерений. Прибор в своем составе имеет высокоэкономичный микроконтроллер, датчик температуры, литиевую батарею и буферную память. Компоненты регистратора размещены в небольшом герметичном виброустойчивом дисковом корпусе из нержавеющей стали.

2. «Термокоса навесная» расположена над поверхностью воды, закреплена на прибрежном сооружении вертикальным стальным тросом, обеспечивает измерение температуры и влажности воздуха в диапазоне от 1 до 8 м от поверхности воды. Ориентировочное местоположение дата-логгеров на термокосе: 2, 3, 5, 7 м от поверхности воды; периодичность записи – также 1 раз в час.

Для этой термокосы в качестве дата-логгеров используются регистраторы температуры и влажности TR-2V (DS1923-F5). Он аналогичен упомянутому выше логгеру TR-5L, отличается возможностью регистрации относительной влажности с точностью ±5 % RH. Средний ресурс (продолжительность эксплуатации) логгеров – до 8 лет при измерениях не чаще 1 раза в 10 минут.

Таким образом, «термокоса плавающая» и «термокоса навесная» дополняя друг друга, обеспечивают непрерывные измерения характеристик атмосферы над поверхностью воды в слое 0,1–7,0 м.

3. Специализированное устройство для измерения температуры воды собственной разработки, которые оснащены средствами онлайн-передачи регистрируемых данных через Интернет.

Во второй зоне установлены следующие устройства:

1. На берегу о. Отдыха вблизи уреза реки размещено устройство, измеряющее температуру воды, температуру и относительную влажность воздуха на высоте 3 м. Оно оснащено средствами онлайн-передачи регистрируемых данных через Интернет.

2. На левом берегу размещено такое же устройство, но без датчика температуры воды. Для её измерения в фарватере реки Енисей установлен дата-логгер, который проводит измерения с периодичностью 1 час.

В разработанном оборудовании для измерения состояния атмосферы и воды основой являются микроконтроллер ESP32 и набор датчиков. ESP32-WROOM-32 – миниатюрный высокопроизводительный модуль от компании Espressif, разработанный для широкого спектра применений. В приборе используется типовая макетная плата NodeMCU-32S с распаянным контроллером ESP-WROOM-32, стабилизатором питания и USB-мостом. Часть датчиков задублированы для повышения надежности.

В разработке использовались следующие датчики:

– Bosch BME280 – комбинированный модуль датчика влажности, температуры и атмосферного давления с цифровым интерфейсом. Точность измерения относительной влажности: ±3 % RH, давления: ±1,0 hPa, температуры: ±1,0 °С. Рабочий диапазон температуры: –40…85 °С, давления: 300...1100 hPa;

– Sensirion SHT31 – высокоточный цифровой датчик температуры и влажности, чип хорошо откалиброван и линеаризован. Типичная точность этого модуля составляет ±2 % RH для относительной влажности и ±0,3 °С для температуры. Диапазон рабочих температур: –40…125 °С;

– DS18B20 – цифровой датчик температуры DS18B20 в корпусе TO-92. Диапазон рабочих температур –55…+125 °С. Точность измерения ±0,5 °С.

В зимний период была измерена температура воды в первой и во второй зоне, а также температура воздуха в районе ГЭС. По этим данным определили зависимость охлаждения воды (Δ, °С) во второй зоне от температуры приземной атмосферы (рис. 1).

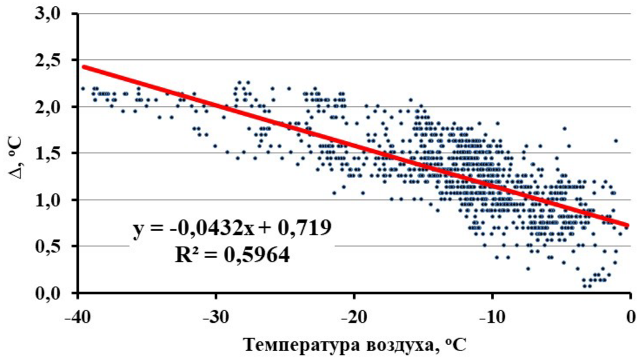


Рис. 1. Разность температуры воды у плотины ГЭС и в центре Красноярска
в зависимость от температуры воздушной среды над поверхностью реки зимой 2022/2023

Видно, что представленная зависимость достаточно хорошо аппроксимируется линейной функцией.

Авторы выражают благодарность АО «Красноярская ГЭС» и компании En+ Group за содействие в выполнении представленной работы.

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОТВОД ТЕПЛА ИЗ КАМЕР СУХОГО ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А. Н. Казюлин[1,2‡], А. А. Ящук[2] *

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»
662972, Российская Федерация, Железногорск, ул. Ленина, 53
[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 36
‡ kandr@mail.ru

В работе рассматривается зависимость теплового состояния сухого хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) от внешних параметров: температуры окружающего воздуха, скорости и направления ветра. Результаты представленных исследований будут использованы при обосновании безопасного хранения ОЯТ с повышенным тепловыделением в сухом хранилище Федерального государственного унитарного предприятия «Горно-химический комбинат» (ФГУП «ГХК»).

Для решения перспективных отраслевых задач Госкорпорации «Росатом» ФГУП «ГХК» планирует принимать в сухое хранилище ОЯТ (далее – ХОТ-2) более «горячее» топливо, чем обосновано при проектировании хранилища. С этой целью планируется проведение оценки возможности загрузки топлива с повышенным тепловыделением с использованием расчетных цифровых моделей. Для подтверждения корректности расчета теплового состояния в цифровых моделях проведено экспериментальное исследование влияния метеорологических параметров на отвод тепла из камер хранилища.

ХОТ-2 представляет собой комплекс зданий, предназначенных для длительного технологического хранения ОЯТ. Отвод тепла от гнезд хранения с ОЯТ обеспечивает система отвода тепла (СОТ), функционирующая за счет естественной конвекции.

С помощью математической модели естественно-конвективного течения воздуха в камере хранения ХОТ-2 ранее было установлено, что наличие ветра благоприятно сказывается на температурном режиме функционирования камеры хранения [1].

Для экспериментальных исследований проводились измерения температуры окружающего воздуха, скорости и направления ветра, температуры воздуха на выходе из камер хранения и перепада давления между входом и выходом камер хранения.

Измерения осуществлялись в теплое и холодное время года, для анализа выбрана камера 2 здания 2 ХОТ-2.

Для оценки суточного влияния погодных условий на отвод тепла выбран период с 29.10.2022 по 01.11.2022, так как за это время устойчивый юго-западный ветер сменился на устойчивый юго-восточный. Преобладающая скорость ветра за указанный период составила 3–7 м/с.

Как видно из графиков (рис. 1), после перемены ветра с юго-западного на юго-восточный соответственно меняется перепад давления: с восточной стороны $\Delta P_{восток}$ заметно увеличивается, а с западной $\Delta P_{запад}$ – падает. Это говорит об уменьшении создания ветром дополнительного давления на западную сторону здания 2 и увеличении на восточную сторону. Соответствующим образом изменяется интенсивность отвода тепла от камеры 2: с восточной стороны увеличивается, а с западной уменьшается, следовательно, температура воздуха на выходе с западной стороны $t_{выход\_запад}$ становится больше, чем с восточной $t_{выход\_восток}$.

Также из графиков (рис. 1) видно, что температура воздуха на выходе из камеры 2 коррелирует с температурой окружающего воздуха на входе $t_{вход}$, но имеет меньшую амплитуду колебаний и некоторое отставание по времени – это объясняется тепловой инерцией хранилища.

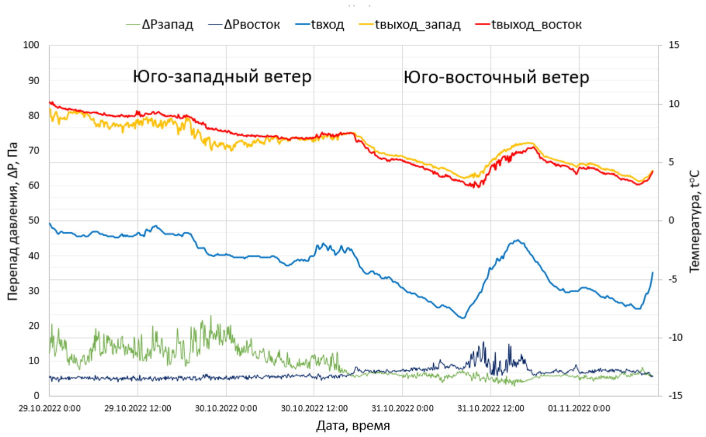


Рис. 1. Изменение параметров СОТ камеры 2 здания 2 ХОТ-2

Для оценки влияния метеорологических параметров на отвод тепла из камеры хранения ОЯТ в разное время года выбраны дни с максимальной (13.06.2022), средней (30.10.2022) и минимальной (27.11.2022) температурой окружающего воздуха (табл. 1), ветер в эти дни был юго-западный со скоростью ~ 5 м/с. Как показал анализ измеренных данных во всех трех случаях температура воздуха на выходе $t_{выход}$ и перепад давления ΔP в вытяжных шахтах камер хранения зависит от направления ветра: с подветренной стороны здания охлаждение менее интенсивное, ΔP меньше, а температура воздуха на выходе больше. Но данное влияние незначительно и разница $t_{выход}$ между западной и восточной сторонами уменьшается с понижением температуры окружающего воздуха $t_{вход}$. При этом ΔP растет с понижением температуры окружающего воздуха.

Таблица 1

Среднесуточные параметры внешней среды и СОТ камеры 2 здания 2 ХОТ-2

Дата	$t_{вход}$, °C	Скорость ветра, м/с	Западная сторона здания 2		Восточная сторона здания 2	
			$t_{выход}$, °C	ΔP, Па	$t_{выход}$, °C	ΔP, Па
13.06.2022	23,4	5,1	30,4	5,2	31,1	1,7
30.10.2022	-2,6	5,6	7,2	12,7	7,7	5,5
27.11.2022	-29,4	4,7	-17,3	16,1	-17,2	9,6
05.12.2022	-15,3	1,7	-8,3	6,2	-8,5	6,3
10.01.2023	-2,5	9,1	3,6	22,2	6,3	3,9

Для оценки влияния скорости ветра дополнительно сравнивались показания за 05.12.2022 и 10.01.2023 с минимальной и максимальной скоростью ветра соответственно (табл. 1). Направление ветра в эти дни также было юго-западное. При сильном ветре (10.01.2023 – 9,1 м/с) давление на наветренную сторону здания значительно выше, и разница $t_{выход}$ между восточной и западной сторонами составляет 2,7 °C, в то время как при скорости ветра 5,6 м/с и практически идентичной температуре окружающего воздуха (30.10.2022) $t_{выход}$ между разными сторонами здания отличается на 0,5 °C. При минимальной скорости ветра (05.12.2022) перепад давления и температура воздуха в вытяжных шахтах с разных сторон здания практически совпадают.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что интенсивность отвода тепла из камер сухого хранилища ОЯТ зависит как от температуры окружающего воздуха, так и от скорости и направления ветра и имеет как суточные, так и годовые колебания.

Список литературы

1. Крайнов А. Ю., Миньков Л. Л., Сеелев И. Н., Шрагер Э. Р. Численное исследование течения и теплообмена воздуха в камере хранения сухого хранилища ОЯТ // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 47. С. 75–86.

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТЕРРИТОРИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОЙ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

А. А. Карсаков[1⁑], Е. И. Пономарёв[1, 2] [*]

[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/28
[⁑] metall8-8@ya.ru

В настоящей работе рассматриваются возможности использования многозональных космических снимков и средств автоматизированной обработки для выявления изменений теплового состояния территорий при интенсивном воздействии инфраструктуры нефтегазового комплекса. Спутниковыми средствами с использованием индекса LST выполнена оценка вариации тепловых характеристик локального участка Тагульского лицензионного участка на юге Таймырского полуострова Красноярского края за период 2013–2022 гг. В качестве исходных данных использованы съемки Landsat-7, -8. Показана корреляция индекса LST с температурой воздуха и ее динамика в условиях активного техногенного вмешательства, что отражается в статистических характеристиках распределения теплового поля.

В условиях интенсивного освоения арктической зоны Сибири всё большую актуальность приобретает вопрос разработки систем мониторинга состояния и динамики природных и техногенно-преобразованных экосистем. Прогнозируемые изменения климата и последствия антропогенной деятельности могут выступать взаимодополняющими факторами значительных деструктивных изменений, которые в условиях криолитозоны могут иметь необратимые последствия на больших территориях [1, 2]. В этой связи перспективно использовать возможности спутникового мониторинга [3].

Цель работы – оценить степень изменения теплового режима локальных территорий в процессе техногенного воздействия с использованием материалов дистанционного зондирования. Были изучены динамика и тренд регистрируемой температуры поверхности для участка Тагульском нефтегазовом месторождении (север Красноярского края, 67,3° с. ш. 83,02° в. д.), активно осваиваемого с 2014 г.

Исходными данными были материалы спутниковой съемки из открытого каталога сайта геологической службы США (https://earthexplorer.usgs.gov), метеоданные с метеостанции WMO ID 23274 аэропорт Игарка из базы данных компании ООО «Расписание Погоды» (https://rp5.ru), границы лицензионных участков по данным сайта ФГБУ «Российский федеральный геологический фонд» (https://rosgeolfond.ru). С целью минимизации погрешности выполнялась предварительная обработка данных: процедура радиометрической калибровки [4] и атмосферной коррекции методом DOS [5].

Ряд спутникового мониторинга температурного индекса поверхности (LST) коррелирует с данными температуры воздуха на уровне 0,35 (рис. 1).

Результаты обработки позволяют констатировать, что усредненные значения показателя LST в условиях естественного функционирования экосистем арктической зоны в большей степени коррелируют с метеорологическими данными о температуре воздуха.

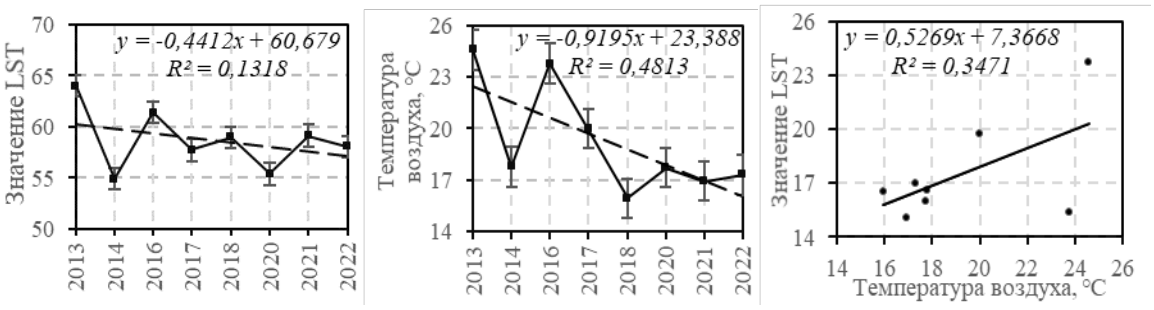


Рис. 1. Сравнение трендов индекса LST и температуры воздуха по данным метеостанции

По нашим оценкам, текущая степень воздействия инфраструктуры нефтегазового комплекса на температурный режим участка Тагульского месторождения характеризуется смещением средних значений LST. Техногенные изменения провоцируют избыточный прогрев трансформированных участков, что в значительной степени меняет тепловой режим. В частности, фиксируется повышение средней температуры в терминах LST с 54,9 в 2014 г. до 58,06 в 2022 г., в среднем на 5 %, и смещение гистограммы распределения значений в сторону высоких значений – до 84,5 (рис. 2). Изображение температурного градиента включают спорадические максимумы индекса LST, связанные с присутствием факелов открытого горения.

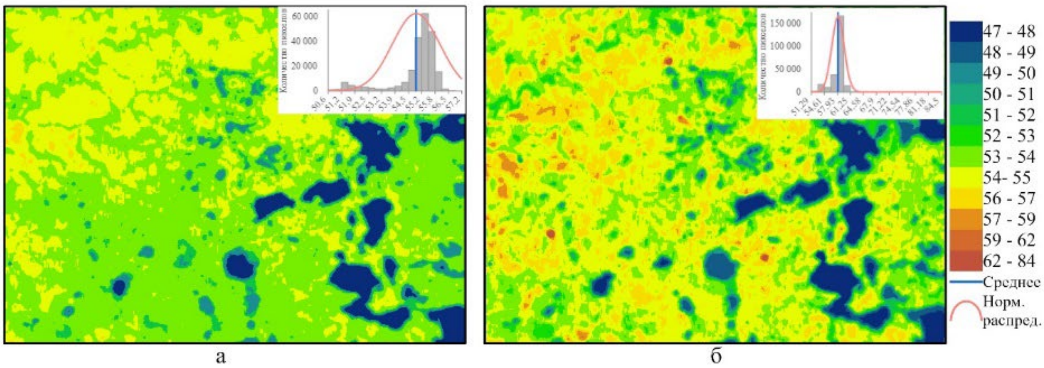


Рис. 2. Исследуемая территория в температурном градиенте на основании индекса LST. Распределение пикселов индекса LST на основании данных Landsat-8: *а* – в 2014 г.; *б* –в 2022 г.

Температура воздуха и ключевые климатообразующие показатели, по всей вероятности, остаются основными факторами динамики температурного режима территорий на севере Красноярского края. При этом техногенные изменения в экосистемах могут быть дополнительным триггером необратимых процессов в условиях криолитозоны Сибири в ближайшей перспективе. Это требует дальнейшего развития систем и технологий на основе материалов спутникового мониторинга.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, https://rscf.ru/project/23-14-20007, Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

1. Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю., Финников К. А., Якимов Н. Д. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, № 3. С. 16–35.

2. Грищенко М. Ю., Чернулич К. К. Расчёт значений температуры воздуха по значениям температуры земной поверхности, полученным по тепловым снимкам (на примере Южно-Курильского района) // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы 2-й Международной науч. конф. 22–25 сент. 2015. Красноярск, 2015. С. 251–255.

3. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Манвелова А. Б., Тронин А. А. Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 23–34.

4. Корниенко С. Г. Коррекция тепловых изображений со спутников Landsat при изучении трансформаций тундровых ландшафтов на примере района Уренгойского НГКМ // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. № 3(26). С. 17.

5. Seidel F. C., Kokhanovsky A. A., Schaepman M. E. Fast and simple model for atmospheric radiative transfer // Atmos. Meas. Tech, vol. 3, pp. 1129–1141, 2010.

ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКИ ЕНИСЕЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

А. К. Матузко[1‡], Н. Я. Шапарев[1, 2], О. Э. Якубайлик[1, 2] [*]

[1] *Институт вычислительного моделирования СО РАН*
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
[2] *Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»*
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
[‡] *akmatuzko@icm.krasn.ru*

Работа направлена на сравнение результатов получения значений температуры воды тремя способами: данные гидропостов, математическое моделирование гидротермического режима и данные дистанционного зондирования. Сравнение результатов проводится на дату 3 июля 2016 г. на четырех контрольных точках реки Енисей (от Красноярской ГЭС до 124 км).

Гидротермический режим реки можно описать уравнением Фурье:

$$\frac{\partial T_w(x,t)}{\partial t} = -V(x,t)\frac{\partial T_w(x,t)}{\partial x} + \frac{D}{pc}\frac{\partial^2 T_w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{W(t)}{pc}\frac{B(x)}{S(x)}, \tag{1}$$

Первый член в правой части уравнения связан с переносом тепла за счет течения реки, второй определяется теплопроводностью воды, а третий описывает энергообмен воды с окружающей средой. Здесь $T_w(x, t)$ – усредненная в поперечном сечении температура воды, °C; t – время; x – расстояние вдоль реки от плотины; D – коэффициент теплопроводности в направлении течения; c – удельная теплоемкость воды; ρ – удельная плотность воды.

Средняя по сечению реки скорость течения $V(x, t) = Q/S(x)$, где Q– расход воды из плотины, а S – поперечное сечение реки. $B(x)$ – ширина реки. $W(t)$ – мощность энергообмена воды с окружающей средой, которая в нашем случае равна

$$W(t) = W_s + W_{ss} + W_a - W_w + W_c - W_e, \tag{2}$$

где Ws и Wss – прямая и рассеянная солнечная радиация, поглощаемая водой; Wa – поглощаемая водой тепловая инфракрасная радиация (ТИР) атмосферы; Ww – ТИР, поступающая с поверхности воды в атмосферу; Wc– конвективный теплообмен воды с атмосферой; We – затраты энергии на испарение воды.

Переходя в систему координат, движущуюся со скоростью $V(x)$, и пренебрегая теплопроводностью, уравнение (1) можно переписать так [1]:

$$\frac{\partial T_w(t)}{\partial t} = \frac{W(t)}{pc}\frac{B(x(t))}{S(x(t))}, \tag{3}$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$T_w(t) = \frac{1}{pc}\int_{t_0}^{t}\frac{B(x(t))}{S(x(t))}W(t)dt + T_w(0,t_0), \quad x(t) = Q\int_{t_0}^{t}\frac{dt}{S(x(t))}, \tag{4}$$

где $T_w(0, t_0)$ – температура воды при выходе из плотины в момент времени t_0.

По данным дистанционного зондирования Landsat-8 Collection 2 Level 2 Science Product, используя метод расчёта, как и в работе [2]:

$$T_w = \frac{T_B}{1+(\frac{\lambda T_B}{c_2} ln\, \varepsilon)} \quad (5)$$

где T_w – температура воды; T_b – яркостная температура, λ=10.9 μm, что соответствует длине волны десятого канала Landsat-8; c_2 – вторая радиационная постоянная (c_2=1,439·10^{-2} мК); ε – коэффициент излучательной способности.

На шаге предварительной обработки учитываются атмосферные параметры (тепловое излучение, восходящее излучение, спектральный коэффициент пропускания атмосферы, нисходящее излучение) [3].

На рис. 1 представлены значения температуры воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на дату 3 июля 2016 г., полученные тремя различными методами: измерением температуры поверхности с помощью космических снимков, в результате математического расчёта и температуры от гидропостов.

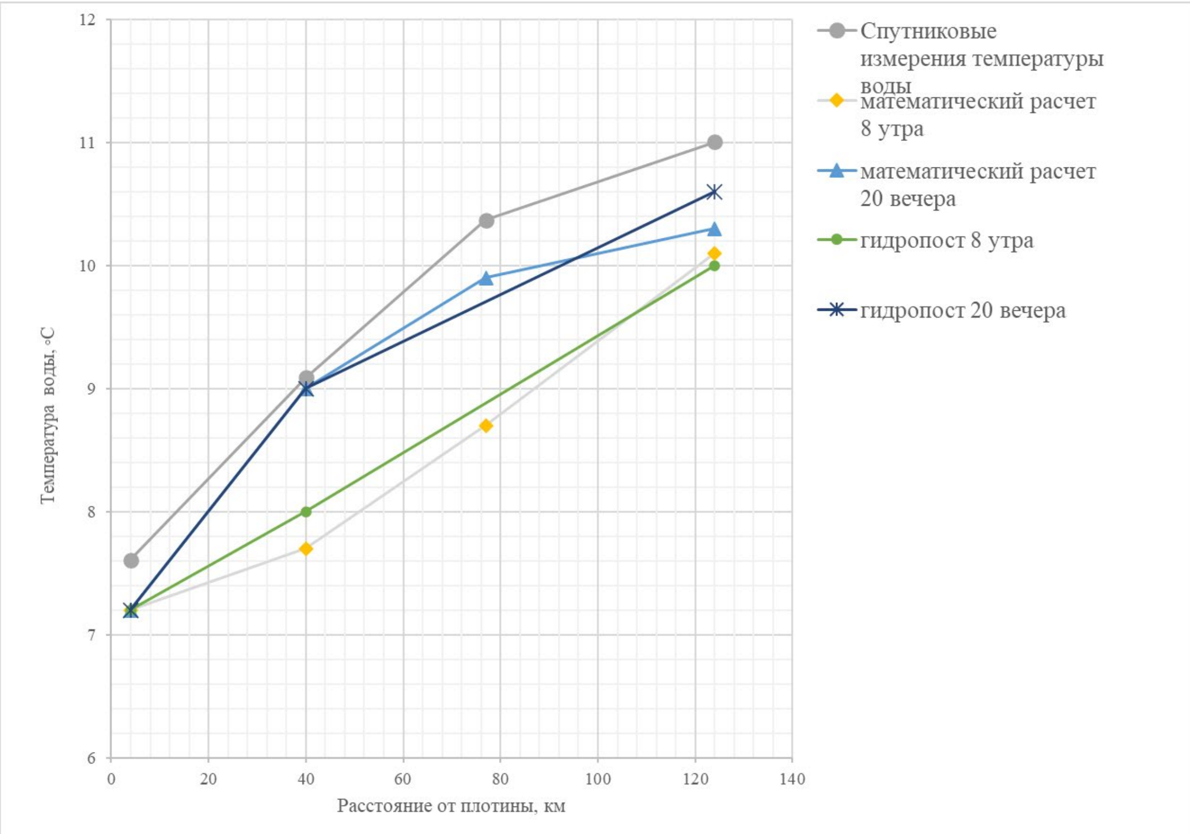


Рис. 1. Температура воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, полученная разными способами

Температура воды в контрольных точках нижнего бьефа Красноярской ГЭС на р. Енисей, рассчитанная по предложенной выше модели, близка к температуре, полученной по данным дистанционного зондирования спутника Landsat-8 и на гидропостах. Предложенный выше подход, сочетающий методы физико-математического моделирования и дистанционного зондирования, перспективен для использования в задачах и моделях, связанных с конкретными территориями и учитывающих их специфику в условиях природно-климатических изменений.

Список литературы

1. Shaparev N. Y. Modelling summer water temperature on the Yenisei River // Thermal Science. 2019. Vol. 23, No. S2. P. S607–S614. DOI 10.2298/TSCI19S2607S. EDN IPWSYF.

2. Shaparev N. & Shokin Y. & Yakubailik Oleg. (2018). Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei river (Russia). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 211. 012022. 10.1088/1755-1315/211/1/012022.

3. Cook M., Schott J. R., Mandel J., & Raqueno N. (2014). Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the archive. Remote Sensing, 6(11), 11244-11266. http://dx.doi.org/10.3390/rs61111244.

СБОР МЕТЕОДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И МЕТОДОЛОГИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ КОМФОРТА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

**К. Н. Мешков[1*], А. А. Дектерев[1, 2],
В. Д. Мешкова[1], П. Д. Шульженко[1]** [*]

[1] Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[*] kostya_meshkov@mail.ru

В работе представлено описание создания единой базы метеоданных с открытых телекоммуникационных источников. В качестве примера приведен сбор данных с федеральных постов наблюдения города Красноярска. Описана методология использования собранных данных для оценки температурного уровня комфорта внешней среды Красноярска. Результаты исследований представлены в виде графика показателя комфорта эквивалентно-эффективной температуры за трехлетний период.

Климатические параметры формируют погодные условия окружающей среды. В результате взаимодействия метеорологических факторов с городом происходит изменение микроклимата. В городской среде формируется микроклимат уже с учётом связанных между собой явлений, таких как погодные условия, дополнительные источники антропогенного тепла, а также изменённый аэрационный режим. Вследствие этого возникает потребность в оценке складываемых условий для определения степени их влияния на организм человека.

Уровень комфортности можно оценить с помощью температурных индексов, которые являются косвенными индикаторами восприятия внешней среды через теплоощущение погоды человеком [1, 2]. Исходными данными для выполнения данного рода исследований являются значения метеорологических величин, таких как температура, сила ветра, влажность и атмосферное давление. Основными источниками для сбора данных могут послужить метеорологические станции и сети мониторинга окружающей среды.

Основоположником в области гидрометинформации в Красноярске является ФГБУ «Среднесибирское УГМС» [3]. Информация по метеорологическим параметрам на сайте госучереждения находится в открытом доступе и представлена в виде графиков изменения метеоданных в реальном времени [3]. Графическое представление хорошо подходит для визуального наблюдения, но анализировать данные за большой период наблюдений в таком виде не представляет возможным, поэтому необходимо осуществить сбор данных за весь период работы станций, систематизировать их и сделать мобильными для дальнейшего анализа.

Для сбора данных был написан web scraping сайта с помощью языка программирования Python, с использованием модуля requests mmm. Meteo.krasnoyarsk.ru работает по прикладному протоколу http, который в отличие от https, не поддерживает протоколы шифрования, что делает уязвимым данный сайт. Модуль requests для python позволяет отправлять различные http запросы, результаты которых можно автоматически систематизировать в удобном виде. Собранный материал систематизируется в СУБД, которая администрируется инструментом Navicat Premium. Указанная база данных значительно облегчает задачу изучения климата и его изменения.

Для оценки температурного уровня комфорта городской среды Красноярска была разработана методика расчета, в основу которой легли температурные индексы комфорта. Методика расчёта рассматриваемых критериев была реализована в программном продукте Lampyre. Алгоритм применения методики состоит из четырех основных этапов.

Первый этап заключается в сборе и систематизации данных метеорологических параметров, приоритетных загрязняющих веществ их фиксации в разработанную базу данных.

На втором этапе выполняется анализ собранных данных метеорологических параметров и определение начальных и граничных условий, таких как температура (t), скорость (v), влажность (f), на основании которых будет осуществляться оценка и прогнозирование условий комфорта.

Третий этап подразумевает математическую обработку данных.

На четвёртом этапе выполняется интерпретация полученных численных значений согласно рассматриваемым критериям и описываются складываемые условия внешней среды, как она воспринимается человеком.

В качестве примера в работе представлен анализ наиболее показательного температурного индекса комфорта – эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ, °С), так как учитывает комплексное влияние на человека температуры, ветра и влажности. Расчет ЭЭТ осуществляется по формуле А. Миссенарда:

$$ЭЭТ = 37 - \frac{37 - t}{0.68 - 0.0014f + \dfrac{1}{1.76 + 1.4v^{0.75}}} - 0.29t\left(1 - \frac{f}{100}\right),$$

где t – температура воздуха, оС; v – скорость ветра, м/с; f – относительная влажность, %.

Результаты обработки полученных данных представлены в виде графика колебания ЭЭТ за трехлетний период по месяцам, посчитанный по средним значениям метеорологических величин, полученных со станций мониторинга города Красноярска (рис. 1). В правой части графика приведена шкала, которая отображает закономерность между физической функцией организма человека с изменением эквивалентно-эффективной температуры.

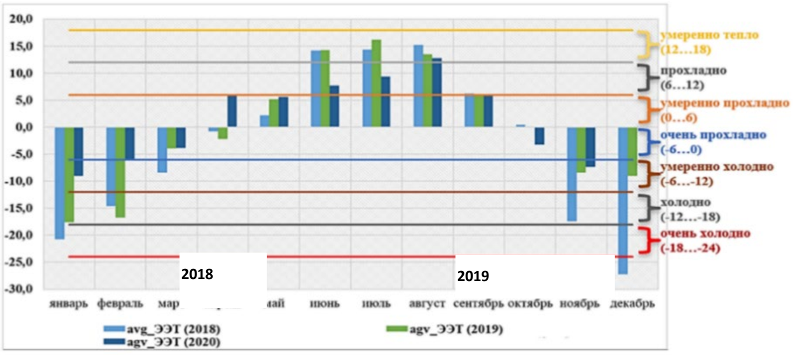


Рис.1. График колебания ЭЭТ, °С за рассматриваемый период

Представленная методология использования метеорологических данных для оценки температурного уровня комфорта позволяет комплексно оценить восприятие человеком климата территории. Отработанные алгоритмы методики позволяют адаптировать ее под исследования для любого города, возникает только необходимость постоянного пополнения единой базы данных.

Список литературы

1. Головина Е. Г., Трубина М. А. Методика расчетов биометеорологических параметров (индексов). СПб., 1997. 110 с.

2. Андреев С. С. Биоклиматические показатели (индексы) // Известия вузов. Северно-кавказский регион. 2007. № 4. С. 109–110.

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Среднесибирские управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» // Интернет-портал. Режим доступа: http://meteo.krasnoyarsk.ru.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

И. А. Перминова*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
iap25@tpu.ru

Рассматриваются экологический аспект сжигания отходов и образования дымовых газов, существующие пути обезвреживания оксидов азота, перспективы использования каталитических систем, изменение свойств вещества при переходе в наносостояние.

В современном мире экологические проблемы имеют глобальное значение, нормы выбросов постоянно ужесточаются. Актуальным вопросом экологической и экономической эффективности предприятий становится безопасная и экономичная утилизация неизбежных выбросов, таких как дымовые газы, что особенно актуально для мусоросжигающих заводов.

Основными компонентами дымовых газов после сжигания отходов, согласно нормам ИТС 9-2020, являются: N_2, CO_2 ,H_2O, NO, NO_2, твердый осадок в виде золы, содержащей неорганические соли и оксиды металлов, часто присутствуют SO_2, SO_3, галогеноводороды, диоксины и фураны. Значительную долю токсичных компонентов составляют оксиды азота [1].

В промышленности широкое применение при борьбе с оксидами азота получили методы восстановления данных соединений до молекулярного азота. В качестве неселективных восстановительных агентов могут выступать метан, пропан, бутан, водород, оксид углерода [2]. В промышленности более распространено селективное восстановление – нейтрализация с использованием аммиака или карбамида, реагирующими с оксидами азота, не расходуясь при этом на взаимодействие с кислородом, присутствующим в смеси. Реакции взаимодействия представлены ниже, оптимальная температура протекания селективного некаталитического восстановления (СНКВ) 850–950 °С для аммиака и 540–1000 °С (до 1050 °С) для карбамида, конверсия NO_x составляет до 60–80 % [1]:

$$(NH_2)_2CO + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$$

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$$

$$6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$$

Впрыск аммиака при СНКВ производится непосредственно в дымоход после печи сжигания, при этом возрастает нагрузка на последующие аппараты за счет увеличения общего количества отходящих газов. Оптимальные параметры протекания химической реакции с карбамидом накладывают ограничения на технологический процесс в рамках связанных с данным процессом аппаратов. Малый температурный интервал оптимального протекания процесса создает риск проскока и выбросов аммиака в окружающую среду при выходе за нижнюю границу интервала, и образование NO_x по конкурирующей реакции – при выходе за верхнюю границу.

Использование каталитических методов позволяет избежать отмеченных недостатков. Степень разложения при селективном каталитическом восстановлении (СКВ) составляет свыше 90 %, а температура реакции снижается до 170–380 °C. При всех преимуществах важным ограничением является стоимость катализатора, в состав которого часто входят дорогостоящие компоненты, такие как металлы платиновой группы. Также катализаторами могут выступать MnO_2, V_2O_5, CuO, Fe_2O_3, Cr_2O_3, Co_2O_3, MoO_3, NiO, WO_3, Ar_2O, ZnO, Bi_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, PbO и их комбинации [2]. В представленном ряду каталитическая активность при 200–350 °C убывает.

Реакционная способность катализаторов обусловливается их электронными свойствами, зависящими от химического состава и определяющими энергию связи катализатора с реагентом [3]. При переходе вещества в наносостояние – порядка единиц и десятков нанометров, оно претерпевает изменение многих свойств, в том числе электронных, приобретая некоторое промежуточное состояние между свободным атомом и массивным телом. Каталитическая реакция протекает на поверхности катализатора, на активных центрах. При уменьшении размера катализатора до значения 2–10 нм около 50 % атомов находятся в поверхностном слое, при увеличении размера частиц свыше 30 нм их доля составляет менее 2 % [4]. Снижение размера частиц до нанометров создает условия для повышения эффективности работы катализатора и расширяет возможности применения различных веществ в качестве катализаторов. При выборе многокомпонентных катализаторов также стоит учитывать возможный эффект синергизма [5].

Из представленных выше возможных катализаторов наиболее перспективными с точки зрения доступности, стоимости и каталитической активности представляются железный и медный. Перевод их в наносостояние и изучение свойств, проверка синергизма с материалом подложки, предварительно алюмосиликатной, должны привести к улучшению их характеристик и возможности использования бесплатиновых катализаторов в промышленном процессе.

На основании анализа литературных источников, представленных в них результатов исследований и текущей ситуации было предложено использование для очистки отходящих газов от оксидов азота наноструктурированного железного катализатора, по результатам испытаний которого в случае недостаточно эффективной очистки может быть предложено введение модифицирующих добавок, проявляющих синергетический эффект. Работа нацелена на поиск оптимального экономически эффективного решения задачи очистки дымовых газов промышленных предприятий.

Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям: ИТС 9-2020 Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 г. № 2181.

2. Справочник азотчика / под общ. ред. Е. Я. Мельникова. М.: Химия, 1987. 464 с.

3. Боресков Г. К. Гетерогенный катализ. М.: Наука, 1986. 304 с.

4. Бухтияров В. И., Слинько М. Г. Металлические наносистемы в катализе // Усп. хим. 2001. Т. 70 (2). С. 167–181.

5. Мытарева А. И. Селективное каталитическое восстановление NO_x аммиаком на композитных катализаторах : специальность 02.00.15 «Кинетика и катализ»: автореф. дис. … канд. хим. наук / Мытарева Алина Игоревна; ФГБУ «Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского» РАН. М., 2017. 27 с.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. Е. Плесовских*

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
alexandermcme@gmail.com

Повышение темпов проникновения электрокаров на рынок способно вызвать прирост потребляемой мощности и оказать влияние на работу энергосистемы города в пиковые часы. В работе рассмотрены подходы моделирования потребляемой электроэнергии, используемой для зарядки аккумулятора электрокара. Построены функции распределения времени отправки и прибытия транспортных средств. Рассчитаны средние колебания мощности в течение дня использования электрокаров в городе.

Все более наблюдаемая и масштабируемая электрификация автомобильного транспорта в Российской Федерации создаёт предпосылки рассмотрения проблемы потребления, в частности в пиковые часы, электромобилями электроэнергии в городских сетях во время зарядки аккумулятора. Объявленные задачи в Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов в РФ до 2050 г. в части стимулирования перехода на гибридные транспортные средства и электромобили в случае их достижения позволят снизить прямые выбросы парниковых газов, нагрузку на экосистему страны, нивелировав часть эмиссии загрязняющих веществ, продуцируемых в процессе сжигания ископаемых источников топлива в ДВС традиционных автомобилей [1]. Данная работа преследует цель моделирования процессов, способных оказать влияние на бесперебойную работу электросетей российских городов, на микроуровне при достижении определенных уровней электрификации транспортных средств.

Для проведения исследования с помощью языка программирования Python была сгенерирована случайная выборка, содержащая данные о 10 000 единиц электрокаров, составляющих гипотетический парк транспортных средств российского города N. Выборка представляет временный ряд, заключенный в границах одного календарного года, и включает следующие показатели: количество электрокаров, время отправления и время прибытия ТС на/с работы и из дома/домой, таким образом, описывая дневной маршрут среднестатистического жителя мегаполиса, данные включают сезонные колебания, случайные отклонения от дневного маршрута водителя и оставшийся в конце дня процент заряда аккумулятора. Время прибытия и время отправления (в часах) каждого транспортного средства (ТС) было рассчитано по методике, представленной в работе [2]. Данные были агрегированы по всему парку ТС города. Кривые распределения времени отправки и прибытия в течение дня использования электрокаров характеризуются наличием двух пиков: в утренние часы преобладает большее число водителей, следующих от места жительства до места работы/учёбы; в вечерние часы – жители города возвращаются с места работы/учёбы к месту жительства (рис. 1).

Модель исходит из предпосылки, что водители по возвращении домой безотлагательно начинают процесс зарядки аккумулятора автомобиля, если оставшийся заряд опускается ниже критической отметки, которая в работе принята равной 15 % от полной ёмкости аккумулятора электромобиля. Зарядка аккумулятора продолжается сразу по прибытии домой и продолжается до полного заряда аккумулятора. Все большее число водителей, прибывших от места работы домой, увеличивают нагрузку на сеть по мере подключения электрокаров к сети. Параметры сети предполагаются фиксированными в процессе 1 цикла зарядки и соответствуют 220 В и 6 кВт выходного напряжения. В работе учтены потери в процессе зарядки, происходящие из-за сопротивления, присущего аккумулятору электрокара и сети, которые были приняты равными 10 % от полной ёмкости аккумулятора автомобиля.

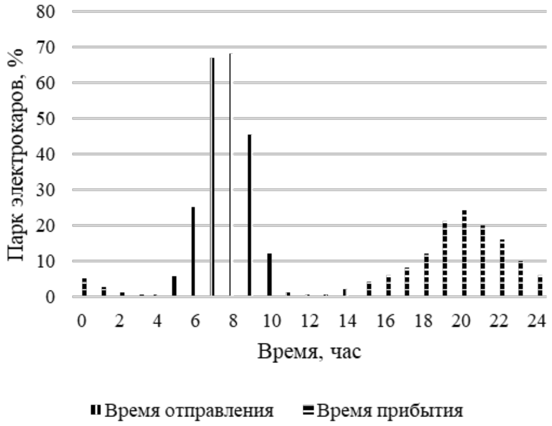


Рис. 1. Распределение времени прибытия и отправления электрокаров, % от парка

Для подсчёта нагрузки, оказываемой на электросеть города, в случае подзарядки ТС некоторой продолжительностью, рассчитанной как необходимое количество часов зарядки: от величины заряда аккумулятора, оставшейся в конце дня, до 100 %, была использована аппроксимация, предложенная в работе [3]. В качестве электрокара-референта был взят Nissan Leaf, занимающий значительную долю на существующем российском рынке электромобилей [4].

Результат моделирования пиковых нагрузок на электросеть города характеризуется низкой нагрузкой в течение дня и ростом нагрузки в вечернее и ночное время (рис. 2).

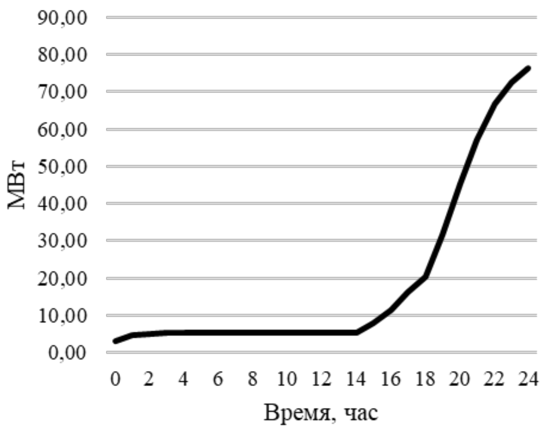


Рис. 2. Пиковые мощности во время зарядки электрокаров, МВт

Моделирование пиковых мощностей позволяет рассчитать нагрузку, оказываемую на трансформаторы энергосети города в случае повышения темпов электромобилизации российских городов. Исследования в данной области показывают, что по мере роста парка электрокаров может потребоваться модернизация существующей сети, критической точкой выступает замена 40 % парка ТС на электрокары.

Список литературы

1. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р.

2. Mitrakoudis S. G., Alexiadis M. C. Modelling electric vehicle charge demand: Implementation for the Greek power system // World Electric Vehicle Journal, vol. 13. No. 7. P. 115, 2022.

3. Gerossier A., Girard R., Kariniotakis G. Modeling and forecasting electric vehicle consumption profiles // Energies, vol. 12. No. 7. P. 1341, 2019.

4. Колян Н. С., Плесовских А. Е. Исследование распространения аккумуляторных электроавтомобилей на российском рынке // Развитие территориальных социально-экономических систем. Вопросы теории и практики. 2022. С. 82–85.

РАСТЕПЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

В. Ю. Половников*, С. Д. Шелемехова, Е. В. Любивый *

Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
* *polovnikov@tpu.ru*

Приведены результаты численного моделирования растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири. Установлено, что радиус растепления многолетнемерзлых пород за период эксплуатации скважины для типичного геотермального месторождения Восточной Сибири составляет 12–17 метров при неизменной температуре энергоносителя. Показана необходимость учета неоднородности теплофизических характеристик многолетнемерзлых пород в зависимости от глубины их залегания при проектировании геотермальных площадок.

Изучению процессов оттаивания многолетнемерзлых пород под воздействием подземного источника тепла посвящено достаточно много работ [1–3]. Преимущественно исследования, подобные [1–3], описывают различные аспекты эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Работы, посвященные растеплению многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в России, в настоящее время не опубликованы. Очевидные различия в эксплуатации нефтегазовых и геотермальных скважин обосновывают необходимость проведения подобных исследований.

Целью данной работы является определение радиуса растепления ММП от тепловыделяющей вертикальной геотермальной скважины в реальных условиях эксплуатации в Восточной Сибири.

Рассматривается геотермальная скважина, прототипом которой является наиболее распространенный в РФ вид нефтяных скважин, колонны, кондуктор и направления которой выполнены из цемента. На рис. 1 приведено схематичное изображение рассматриваемого объекта.

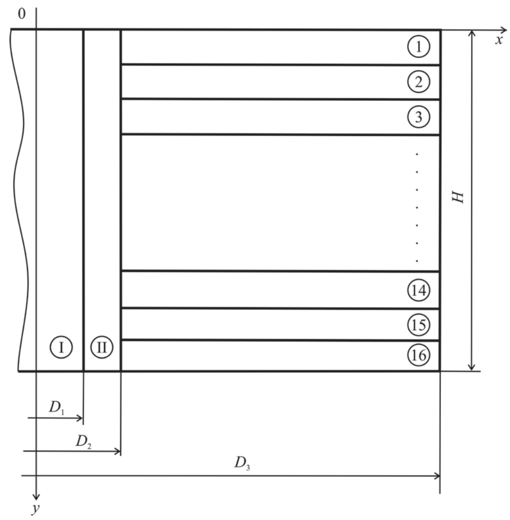


Рис. 1. Схема области решения:
I – трубопровод; II – цементные колонны, кондуктор и направления; 1–16 – слои породы/грунта [4]

Предполагается, что до начала эксплуатации геотермальной скважины в рассматриваемой области решения (рис. 1) поддерживается постоянная температура. В момент времени, отличный от нуля, по трубопроводу I начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого выше, чем начальная температура в области решения. При этом предполагается, что на внутренней поверхности трубы устанавливается постоянная температура, равная температуре энергоносителя. С учетом рассматриваемых факторов анализ растепления пород и грунтов в зоне влияния геотермальной скважины сводится к решению нестационарной задачи теплопроводности в системе «геотермальная скважина – породы/грунты».

Постановка задачи, метод решения и основные исходные данные для рассматриваемой задачи аналогичны описанным в [4]. Численный анализ проводился для геотермальной скважины со следующими геометрическими характеристиками: D_1 = 0,073 м; D_2 = 0,53 м; D_3 = 50 м, H = 50 м (рис. 1). Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным T_0 = 272,7 К и соответствовало типичной температуре многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири [4]. Температура наружной среды составляла T_{ex} = 273,15 К, а коэффициент теплоотдачи – α = 20 Вт/(м^2·К). Температура энергоносителя внутри трубы T_1 варьировалась в диапазоне от 298,15 до 373,15 К.

Основные результаты численного моделирования радиуса растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальный радиус растепления пород/грунтов в рассматриваемой области решения

T_1, К	373,15	348,15	323,15	298,15
Максимальный радиус растепления, м	16,93	15,89	14,36	11,68

Исследования проведены для периода времени, соответствующего 30 годам непрерывной эксплуатации геотермальной скважины в многолетнемерзлых породах.

Результаты численного моделирования позволили сделать вывод об ожидаемом увеличении радиуса растепления с течением времени и его зависимости от температуры энергоносителя T_1.

Значения радиусов растепления пород/грунтов в рассматриваемой области решения, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что они могут достигать существенных значений (12–17 метров) и должны учитываться при проектировании геотермальных площадок.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать расстояния между соседними геотермальными скважинами, эксплуатируемыми в многолетнемерзлых породах. Сетка размещения геотермальных скважин, основанная на подобных расчетах, будет способствовать оптимизации затрат на строительство площадок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00464).

Список литературы

1. Горелик Я. Б., Шабров А. Б., Сысоев Ю. С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли. 2008. № 1. С. 59–65.

2. Полозков К. А. Выбор расстояний между кустовыми эксплуатационными скважинами в зонах ММП // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2008. № 3. С. 21–29.

3. Гасумов Р. А., Кондренко О. С., Толпаев В. А. Расчет изотермического фронта протаивания многолетнемерзлой породы по данным, полученным при проводке скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 2. С. 20–22.

4. Половников В. Ю., Цыганкова Ю. С. Радиус растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин в Восточной Сибири // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2014. № 1. С. 38–43.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ В ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЭМИССИЙ ОТ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Е. И. Пономарёв[1, 2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/28
evg@ksc.krasn.ru

В работе выполнено обобщение сведений об эмиссиях углеродосодержащих соединений от пожаров в Сибири за период 2002–2022 гг. с применением материалов спутникового мониторинга. С использованием порогового метода оценки мощности теплоизлучения (Fire Radiative Power, FRP) получены данные о многолетнем тренде соотношения высоко- и низкоинтенсивных пожаров, определяющих удельные эмиссии с единицы площади при пожаре растительности. Даны оценки и прогностические тренды эмиссий с учётом роста горимости и доли высокоинтенсивных участков пожаров, которая за рассмотренный период увеличилась на ~24 %.

На рубеже конца XX – начала XXI в. на территории Сибири фиксируется рост числа лесных пожаров и площадей, пройденных огнём [1]. Как следствие, можно ожидать увеличение прямых пожарных эмиссий углеродосодержащих соединений в атмосферу. Задача достоверной оценки и прогноза эмиссий от пожаров растительности требует учёта энергетических характеристик и интенсивности горения, как параметра, определяющего удельного значения эмиссии с единицы площади.

Определение пожарных эмиссий углеродосодержащих соединений основывается на соотношении Сейлера – Крутцена [2], в котором в качестве параметров входят масса растительных горючих материалов, суммарная площадь пожаров и коэффициент полноты сгорания. Использование этого подхода подразумевает экспертные оценки всех входных параметров, при этом интенсивность горения, определяющая варьирование всех параметров в широком диапазоне, считается постоянной. Инструментальная оценка интенсивности горения, как и выделение категорий интенсивности отдельных фаз пожара в условиях переменной интенсивности, возможна на основе спутникового мониторинга с применением технологии Fire Radiative Power (FRP) – характеристикой мощности теплоизлучения зоны активного горения, линейно связанной с объёмом сгорающей биомассы [3–5].

В работе выполнено обобщение сведений о пожарах на территории Сибири за период 2002–2022 гг. При анализе был использован банк пожаров, реализованный на основе спутникового мониторинга в 2002–2022 гг. Институтом леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, Россия). Для оценки мощности тепловыделения пожаров использованы стандартные продукты MOD14/MYD14 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov). Пороговым методом выполнялась классификация «пожарных» пикселей с выделением категорий интенсивности горения. Пороговые значения, разделяющие категории интенсивности, определяли из статистических данных – среднее $FRP_{ср}$ и стандартное отклонение (σ). Суммарные пожарные эмиссии определяли по модернизированному [7] соотношению Сейлера – Крутцена:

$$C = CE \times \sum_i S_i(FRP) \times \beta_i(FRP) \times B_i(FRP),$$

где C – прямые эмиссии углерода (г); $S_i(FRP)$ – площадь, пройденная огнём (м^2), представленная в виде суммы площадей фаз пожара с учётом категории интенсивности горения; коэффициент полноты сгорания $\beta_i(FRP)$; $B_i(FRP)$ – запас растительных горючих материалов (кг/м^2), CE – коэффициент пересчёта (г/кг). Основные параметры рассматривались, как функции от мощности теплоизлучения для каждого i-го участка пожара.

Для территории Сибири на временном интервале 2002–2022 гг. выявлена тенденция роста доли пожаров с высокой интенсивностью (рис. 1). Усреднение по двум последним десятилетиям позволяет говорить, что площади высокоинтенсивных пожаров выросли в среднем с 0,63 ± 0,31 млн га/год (в 2002–2011 гг.) до 1,70 ± 0,49 млн га/год (в 2012–2022 гг.). Относительный рост составил ~24 %. В большей степени перераспределение связано с сокращением площадей с низкоинтенсивным горением (рис. 1, *а*, *в*).

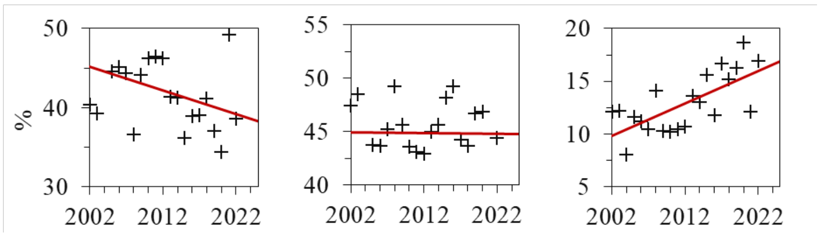


Рис. 1. Многолетние тренды площадей пожаров в Сибири с учётом интенсивности горения по мощности теплоизлучения (FRP): *а* – низкоинтенсивные; *б* – средней интенсивности; *в* – высокоинтенсивные

Можно заключить, что в современных условиях рост пожарных эмиссий вызван не только увеличением площадей пожаров растительности, но и повышением удельного значения эмиссии с единицы площади при высокоинтенсивном горении. Значения прямых пожарных эмиссий за рассмотренный период менялись с 58 Тг/год (2006) до 120 Тг/год (2014) и до экстремальных значений >350 Тг/год (2020, 2021). Среднемноголетний уровень пожарных эмиссий увеличился в три раза с 60,0 ± 25,8 Тг/год (2002–2011) до 180,0 ± 60,0 Тг/год (2012–2022).

Большинство современных прогнозов горимости лесов Сибири определяют климатические изменения важнейшим драйвером роста площадей пожаров. В этом ключе увеличение пожарных эмиссий углеродных соединений в ближайшей перспективе является общепринятой и обоснованной точкой зрения. Однако результаты данного исследования показывают, что дополнительно динамика ежегодных эмиссий будет определяться ростом числа и площадей высокоинтенсивных зон горения. Как показывают результаты, перераспределение числа низко- и высокоинтенсивных пожаров на современном временном интервале – значительно (до ~24 %). Можно ожидать, что это соотношение будет расти в сторону горения с высокой интенсивностью и определять дополнительный прирост эмиссий углеродных соединений при пожарах растительности в Сибири.

Список литературы

1. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio, vol. 50(11), pp. 1953–1974, 2021. DOI:10.1007/s13280-020-01490-x.

2. Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Climate Change, № 2, pp. 207–247, 1980.

3. 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. of Geophysical Research, vol. 110, D24311, 2005. DOI:10.1029/2005JD006318.

4. 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.

5. Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г., Харук В. И. Интенсивность горения в оценке эмиссий от пожаров // Экология. 2018. № 6. С. 1–8. DOI:10.1134/S0367059718060094.

6. Пономарёв Е. И. Способ расчёта прямых пожарных эмиссий углерода с учётом пороговой классификации интенсивности пожара растительности по спутниковым съёмкам в ИК диапазоне // Патент на изобретение. RU 2755936 C1, 2021.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ПОДЛОЖКА-ЛЕД»

Н. А. Саввинова[1⁎], С. Д. Слепцов[2] *

[1]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
677000, Российская Федерация, Якутск, ул. Белинского, 58
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 1
⁎ nasavv@mail.ru

Проведен численный расчет процесса плавления льда на вертикальной непрозрачной подложке при радиационном нагреве. Математическая модель процесса плавления представляет собой однофазную задачу Стефана. Радиационная часть задачи радиационно-кондуктивного теплообмена решалась модифицированным методом средних потоков с учетом рассеяния излучения в плоском слое льда, с учетом селективности оптических свойств. Получены численные результаты скорости таяния льда и роста температуры необлучаемой поверхности льда при разных непрозрачных подложках, проведена оценка теплового влияния подложки на таяние льда.

Прикладное применение результатов численного моделирования тепловых процессов в системе «подложка-лед» в условиях проникающего теплового излучения может быть направлено на решение проблем, связанных с технологией устранения, разупрочнения льда на различных поверхностях. В работах [1, 2] авторы показали экспериментально влияние материала подложек на интенсивность радиационного нагрева слоя льда до температуры плавления. В [3] авторы проводили эксперименты в климатической камере, где левая граница слоя льда на вертикальной подложке поддерживалась при постоянной низкой температуре и исследовалась интенсивность таяния льда в зависимости от спектрального состава источника теплового излучения. Были проведены численное моделирование с использованием постановки задачи [3] и верификация численных результатов исследования радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда авторами данной работы в [4–6] с адиабатным условием на левой непрозрачной границе слоя льда. Целью данной работы является численное исследование температурного режима системы «подложка-лед» при радиационном нагреве с учетом теплофизических свойств непрозрачной подложки.

Геометрическая постановка задачи системы «подложка-лед» подобна приведенному рисунку в [4] с учетом конечной толщины подложки. Левая граница подложки поддерживается при постоянной температуре T_{sub}, на границе «подложка-лед» выполняется условие сопряжения, температурное поле в непрозрачной подложке определяется из решения уравнения теплопроводности. На вертикальной подложке толщиной L_1 по нормали к падающему потоку излучения от источника с температурой нити накаливания 3200 К и с постоянным падающим потоком излучения E^{*}_{ν} образован анизотропно рассеивающее излучение плоский слой льда с начальной толщиной L_2. Температура окружающей среды постоянна и равна T_∞

Решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается, нагрев плоского слоя льда до достижения правой облучаемой границей температуры таяния T_f. Далее начинается второй этап – плавление ледяного слоя, в процессе которого температура правой границы остается постоянной и равной температуре плавления: $T\,(L(t),t) = T_f$. Также на этой границе выполняется условие Стефана. Математическая модель задачи плавления льда представляет однофазную постановку задачи Стефана. Численно определяются температурные поля, тепловые потоки, скорость таяния. Положение границы раздела фаз $L(t)$ (толщина слоя тающего льда) определяется из решения краевой задачи.

Рост температуры левой необлучаемой границы слоя льда $T_2(0,t)$ (рис. 1) показывает, что при $\mathrm{A} = \Lambda = 0{,}01$ температура достигает положительного значения на 13 минуте для условий данной задачи. Здесь $\Lambda = \lambda_1/\lambda_2$ – отношения теплопроводностей подложки и льда, $\mathrm{A} = a_1/a_2$ – температуропроводностей. Дальше возможен перегрев, процесс, который не моделируется в данной постановке.

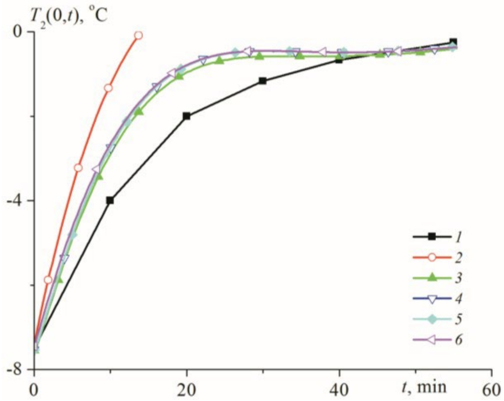


Рис. 1. Динамика роста температуры левой поверхности льда на разных подложках: 1 – данные [3], 2 – А=Λ=0,01, 3 – подложка из бакелита, 4 – при А=Λ=1, 5 – при А=Λ=100, 6 – расчет по [6]

Методами численного моделирования в рамках однофазной задачи Стефана проведена оценка теплового влияния подложки на таяние льда. При решении тепловой задачи использовались свойства как реального материала, так и модельные свойства материалов с разными теплофизическими свойствами. Радиационная часть задачи радиационно-кондуктивного теплообмена решалась модифицированным методом средних потоков, учет анизотропного рассеяния осуществлялся транспортным методом [4–6]. Получены численные результаты скорости таяния льда и формирования температурного поля льда при разных непрозрачных подложках. Показано, что при наличии теплопроводящих подложек существенно теплообмен будет определяться оптическими свойствами подложки. Для подложек с низкими теплопроводящими свойствами становится важным учет теплофизических свойств подложки и развитие математической постановки задачи радиационно-кондуктивного теплообмена при радиационном нагреве льда с учетом другой физической модели.

Список литературы

1. Savvinova N. A., Timofeev A. M., Malyshev A. V., Sleptsov S. D. Radiation Heating of Ice Formed on the Substrate // IEEE Xplore, 4 p., 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271295
2. Song B., Viskanta R. Deicing of solids using radiant heating // J. Thermophysics and Heat Transfer, vol. 4, No. 3, pp. 311–317, 1990.
3. Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung, vol. 12, Iss. 2, pp. 137–144, 1979.
4. Слепцов С. Д., Рубцов Н. А., Саввинова Н. А. Моделирование нагрева и таяния льда в приближении задачи Стефана с учетом излучения // ТиА. 2018. Т. 25, № 3. С. 439–446.

5. Sleptsov S. D., Savvinova N. A., Rubtsov N. A. Ice melting with allowance for selec- tive absorption in the medium // J. Eng. Thermophys., vol.28, No.1, pp.114–122, 2019.
6. Слепцов С. Д., Саввинова Н. А., Гришин М. А. Численное исследование теплового состояния льда содержащего пузырьки воздуха // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 3. С. 118–125.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАЗРУШЕННЫХ ПРОЦЕССОМ ТЕРМОКАРСТА ЗЕМЕЛЬ В КРИОЛИТОЗОНЕ

М. А. Сивцев*, А. Ф. Жирков *

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
677010, Российская Федерация, Якутск, ул. Мерзлотная, 36
* *sivtsevi@mail.ru*

Доказана возможность восстановления разрушенных термокарстом земель с помощью комбинированного способа тепловой защиты, включающего создание теплоизоляционного (восстановление растительного покрова) и теплоемкого (увеличение льдистости грунта) слоев, обеспечивающих оптимальный уровень теплообмена в системе «атмосфера-грунт» в течение годового цикла, для достижения минимальной глубины деятельного слоя грунта. Применение нового способа позволит не только обеспечить скорую рекультивацию нарушенных термокарстом земель, но и сократить объем выбросов углерода за счет снижения степени деградации верхних слоев мерзлых пород. На основании численного моделирования установлены основные закономерности формирования деятельного слоя грунта при использовании различных вариантов тепловой защиты, подтверждающие эффективность и целесообразность использования предлагаемого способа для широкого внедрения на криолитозоне.

Нарушение естественного равновесия, связанное с глобальным потеплением климата и техногенными нарушениями, приводит к деградации многолетнемерзлых пород (ММП). Разрушенные ландшафты отличаются тонким защитным [1–2] или переходным [3] слоем (либо его отсутствием). Особенность этого слоя заключается в его большой теплоемкости за счет льдистости. Исходя из этого, учитывая мероприятия восстановления пашен [4–5] и методы мелиорации [6], обосновывается гипотеза скорого
(за 2–3 года) и эффективного восстановления нарушенных термокарстом территорий, которая является основной нашей целью.

Изучение того, как развивается деградация ММП и типизация влияющих на это факторов в современных условиях, имеют большое значение, в том числе для понимания будущих изменений в арктических и субарктических регионах. Это обосновывает фундаментальный и прикладной интерес наших исследований.

С целью оценки воссоздания условий, при которых возможно оптимальное восстановление защитного слоя, нами был использован пакет программ Frost 3D Universal. Решение задачи тепло- и массообмена в трёхмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [7].

Для оценки воссоздания условий, при которых возможно оптимальное восстановление защитного слоя, нами были рассмотрены и рассчитаны разные варианты увлажнения грунтов, и для каждого варианта было применено по пять сценариев разного снегонакопления. Для примера приведены результаты восстановления защитного слоя при полной влагоемкости грунтов, которые показывают разные условия образования защитного слоя (рис. 1).

Условия, при которых возможно лучшее восстановление защитного слоя, достигаются при максимальном предзимнем влагонасыщении грунтов и снегоочистке весь зимний период. Оптимальное же восстановление при этом, с учетом финансовых и трудозатрат, наблюдается при максимальном увлажнении грунтов и уплотнение снега через каждые 5 лет.

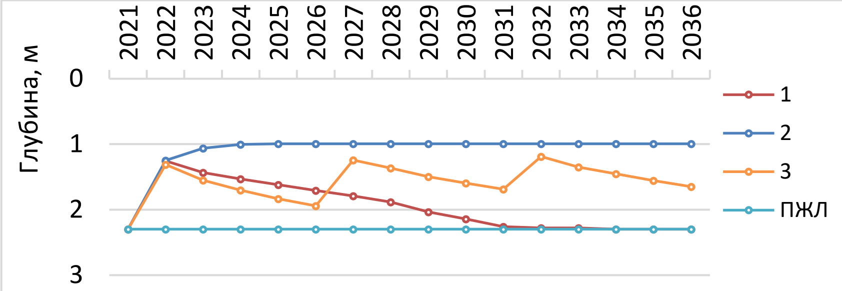


Рис. 1. Изменение глубины протаивания грунта во времени при увлажнении деятельного слоя до полной влагоемкости в зависимости от степени изменения снежного покрова: 1 – снегоочистка поверхности только в первый год; 2 – полное отсутствие снега в течение всего срока; 3 – уплотнение снега через каждые 5 лет; ПЖЛ – глубина залегания подземного льда

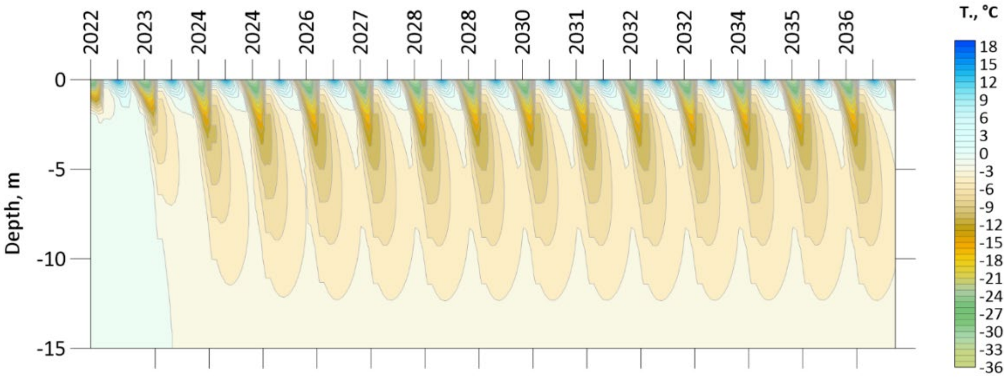


Рис. 2. Динамика температуры грунтов варианта 1 по II сценарию

Из этого следует, что явное восстановление защитного слоя будет наблюдаться при максимальном предзимнем влагонасыщении грунтов и при снегоочистке весь зимний период, что и будем использовать при натурном эксперименте (рис. 2).

Исследование поддержано РФФИ № 21-55-15013 НЦНИ_а.

Список литературы

1. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., Kirillin A., Séjourné A., Wen Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. Land. 2023; 12(1):197. https://doi.org/10.3390/land12010197

2. Ефимов А. И., Граве Н. А. Погребенные льды района озера Абалах // Социалистическое строительство. 1940. № 10. С. 65–78.

3. Шур Ю. Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, 1988. С. 200–210. ISBN 5-02-029065-3.

4. Гаврильев П. П., Угаров И. С., Ефремов П. В. Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2001. С. 196.

5. Угаров И. С. Опыт восстановления нарушенных сельскохозяйственных угодий // Успехи современного естествознания. 2012. № 11. С. 137–139.

6. Zhirkov A., Permyakov P., Wen Z., Kirillin A. Influence of Rainfall Changes on the Temperature Regime of Permafrost in Central Yakutia // Land, 2021. 10 (11):1230. https://doi.org/10.3390/land10111230.

7. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1989. С. 616.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ПЕРЕНОС ТЕПЛА И ВЛАГИ В СЕЗОННО-ТАЛОМ СЛОЕ ПОЧВЫ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К. А. Финников[1⁑], Е. И. Пономарев[1, 2, 3], К. Ю. Литвинцев[4], Т. В. Пономарева[1, 2], О. В. Масягина[1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/28
[3]Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
[4]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
⁑kfinnikov@sfu-kras.ru

Больше половины территории лесных экосистем Сибири относится к зоне мерзлоты. Деградация мерзлоты и долговременные аномалии сезонно-талого слоя (СТС) могут определять масштабные изменения в существующих экосистемах. Причиной аномальных процессов в почвах, наряду с влиянием климатических изменений, является значимое воздействие массовых природных пожаров. На основе данных спутникового мониторинга нами было установлено, что за период 2000–2019 гг. огнем пройдено около 20 % лесопокрытой территории. Зафиксировано существенное увеличение среднегодового числа (с 44 до 299 пожаров в год) и площадей пожаров (с 0,11 до 0,99 млн га) в периоды 2000–2009 гг. и 2010–2019 гг. соответственно. Спутниковые данные [1, 2] и наземные эксперименты [3, 4] констатируют статистически значимые величины тепловых аномалий на послепожарных участках в течение не менее 15–20 лет. Послепожарные изменения в лесах криолитозоны характеризуются полным или частичным прогоранием мохово-лишайникового покрова и подстилки – естественного теплоизолирующего слоя, изменением альбедо и степени черноты.

Моделирование и прогноз динамики тепловых процессов в верхних горизонтах почвы и сезонно-талом слое мерзлоты – задача актуальная и широко обсуждаемая в отечественной и зарубежной литературе. Теплофизические свойства почв сильно зависят от количества почвенной влаги, поэтому для задачи численного моделирования переноса тепла большое значение имеет корректное задание влагосодержания. В настоящей работе температурные аномалии поверхности послепожарных участков исследованы с применением численного моделирования переноса тепла и влаги в почве на многолетнем промежутке времени. Математическая модель процесса теплопереноса в почве формулируется как многомерная нестационарная и основывается на уравнениях переноса тепла и почвенной влаги с учетом замерзания и таяния воды, неоднородности тепло-, влагопроводящих и влагоудерживающих свойств почвы. Граничные условия на поверхности задаются в соответствии с реальными метеоусловиями (температура воздуха, поток падающего и испущенного излучения в диапазонах от видимого до длинноволнового ИК-излучения, скорость ветра, толщина снежного покрова, относительная влажность и осадки на поверхности) на многолетнем временном промежутке. В качестве результата воздействия пожара принята потеря верхнего органического горизонта. Сопоставление расчетных результатов для состояния ненарушенной почвы с состоянием послепожарной проведено для условий криогенных почв в лиственничниках Среднесибирского плоскогорно-таежного лесного района, а также для модельных условий с аналогичными свойствами почвы, но с метеоусловиями, соответствующими центральным районам Красноярского края.

Результаты расчетов установившегося квазипериодического с периодом 1 год температурного поля в почвах представлены на рис. 1. Результаты демонстрируют существенно более раннее оттаивание грунта в корнеобитаемом слое на послепожарных участках. Изменение во влажностном режиме почвы приводит к тому, что на послепожарных участках в криолитозоне температура превышает фоновые значения практически на всем протяжении года. В летний период это обусловлено отсутствием органического слоя, создающего термическое сопротивление, в зимний период – напротив, увеличением термического сопротивления верхних минеральных слоев почвы в результате снижения их влажности. Данный эффект не наблюдается для модельных условий центральных районов Красноярского края ввиду существенно меньшей влагонасыщенности на начало зимы.

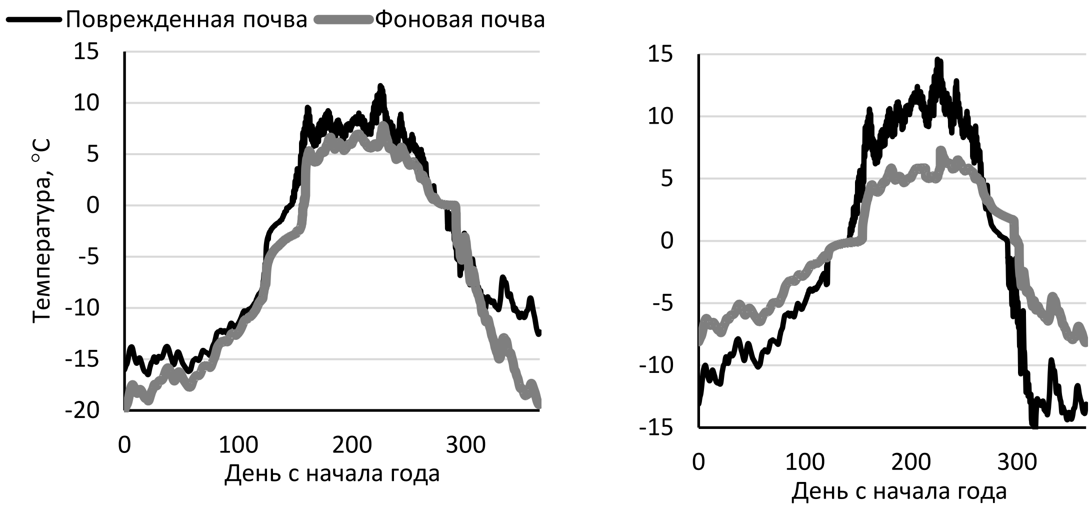


Рис. 1. Изменение температуры на глубине 1 м в течение года. Слева: условия лиственничников в криолитозоне Среднесибирского плоскогорья. Справа: модельные условия на широте Красноярска

Из полученных результатов следует, что в криолитозоне послепожарные изменения значимы во всем корнеобитаемом слое. Это вкупе с увеличением глубины сезонно-талого слоя после пожаров может быть положительным фактором, например, влияющим на величину годичного прироста древостоев. Однако в условиях масштабных пожарных воздействий такие эффекты в меняющемся климате могут сказаться на устойчивости лесных экосистем криолитозоны.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, https://rscf.ru/project/23-14-20007/, Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

1. Пономарев Е. И., Пономарева Т. В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сибирский экологический журнал. 2018. № 4. С. 477–486. DOI:10.15372/SEJ20180408.

2. Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на многоспектральных спутниковых данных // Сибирский экологический журнал. 2020. № 1. С. 129–140. DOI 10.15372/SEJ20200110.

3. Безкоровайная И. Н., Борисова И. В., Климченко А. В., Шабалина О. М., Захарченко Л. П., Ильин А. А., Бескровный А. К. Влияние пирогенного фактора на биологическую активность почв в условиях многолетней мерзлоты (Центральная Эвенкия) // Вестник КрасГАУ. 2017. № 9. С. 181–189.

4. Knorre A. A., Kirdyanov A., Prokushkin A., Krusic P., Buntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of the Total Env. 2019. Vol. 652. P. 314–319.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЛЕД ДЫМОВ ЯКУТСКИХ ПОЖАРОВ В ОКРЕСТНОСТЯХ КРАСНОЯРСКА В АВГУСТЕ 2021 ГОДА

Н. Я. Шапарев*, А. В. Токарев, О. Э. Якубайлик *

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/44
* *shaparev@icm.krasn.ru*

Рассматриваются изменения состояния окружающей природной среды в городе Красноярске и его окрестностях в период прихода дымов масштабных диких якутских пожаров в августе 2021 г. Появление дымовых аэрозолей в атмосфере привело к уменьшению величины солнечного излучения на поверхности Земли и соответственно к падению температуры деятельного слоя почвы и приземного слоя атмосферы. Адвекция охлаждённого воздуха с большой относительной влажностью над поверхностью реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС сформировала туманы охлаждения.

Лесные пожары являются экстремальным явлением в природе, нарушающим экологическое равновесие и приводящим к изменению метеорологических условий. Образующиеся при сжигании биомассы дымовые аэрозоли поглощают и рассеивают солнечное излучение, в результате нагревают атмосферу и уменьшают величину солнечной радиации, достигающей подстилающей поверхности [1].

В мае 2021 г. в Якутии возникли масштабные лесные пожары, дым от которых достиг Красноярска 7 августа и сохранялся до 10 августа. Объектом нашего исследования являлось поведение окружающей природной среды в городе Красноярске и его пригороде (д. Минино) при наличии дымов якутских пожаров. Для первичного сбора и обработки данных использовался блок научно-исследовательского мониторинга Геопортала ИВМ СО РАН [2]. Система обеспечивает сбор данных из внешних источников, хранение и агрегацию данных, автоматическое вычисление производных показателей, выгрузку и представление данных через веб-интерфейс.

Авторами проведена регистрация изменения теплофизических характеристик окружающей среды в городе и его пригороде с 6 по 10 августа. Для анализа использовались данные по метеоусловиям (температуре и влажности атмосферного воздуха, концентрации частиц $PM_{2.5}$, скорости и направлению ветра), температуре почвы и температуре воды в реке Енисей. Пространственно-временная динамика дымов была получена на основе ультрафиолетового аэрозольного индекса UVAI, рассчитанного по данным ДЗЗ.

На рис. 1 представлено поведение температуры деятельного слоя почвы, температуры воздуха и концентрации частиц $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы в д. Минино, а также значение индекса UVAI. Экспериментально установлено, что за рассматриваемый период пожары обуславливали изменение концентрации $PM_{2.5}$ от 25 до 300 мкг/м^3. Наличие аэрозолей $PM_{2.5}$ вызвало увеличение оптической толщины атмосферы и уменьшение величины поглощаемой солнечной радиации почвой.

В период наблюдения мы зафиксировали холодный след якутских пожаров: уменьшение температуры верхнего деятельного слоя почвы ($\Delta T = 5{,}6°C$), обусловленное уменьшением величины солнечной радиации за счет аэрозоли дымов; уменьшение температуры нижней части приземного слоя атмосферы, вызванное турбулентным теплообменом с почвой, составило ($\Delta T = 1{,}6°C$); формирование адвективных туманов охлаждения над поверхностью реки Енисей в городе Красноярске [3].

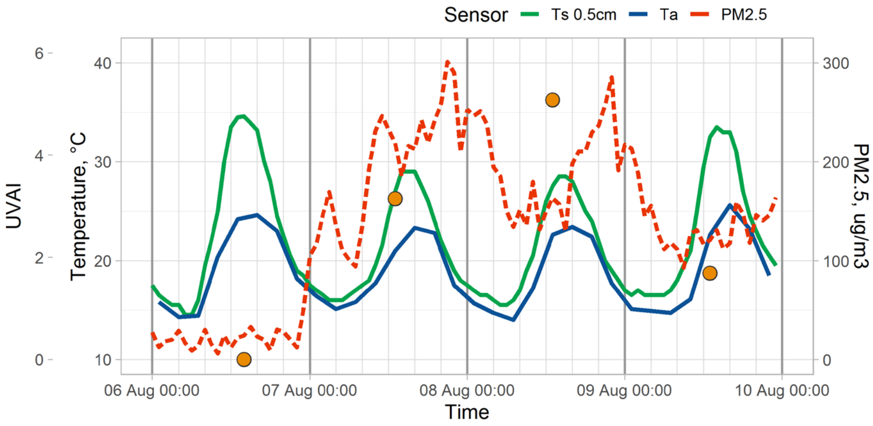


Рис. 1. Температура деятельного слоя почвы TS (на глубине 0,5 см), температура воздуха TA, концентрация PM2.5 (на высоте 2 м), значение индекса UVAI в д. Минино

Мы впервые экспериментально проследили причинно-следственную связь: формирование аэрозолей дымов → экранирование солнечной радиации → уменьшение температуры деятельного слоя почвы → уменьшение температуры приземного слоя атмосферы → формирование тумана на реке Енисей на расстоянии в 2200 км от местоположения пожаров в Якутии. Полученные результаты подтверждают значимость последствий диких лесных пожаров для моделирования «ядерной зимы».

Согласно современным модельным представлениям происходящие климатические изменения могут привести к удвоению числа пожаров в бореальных лесах к концу нынешнего века, которые будут создавать особое состояние атмосферы и сезонной погоды на огромных площадях и расстояниях в несколько тысяч километров [4]. Поэтому влияние дымов от пожаров будет увеличиваться, а изменение температурных режимов окружающей природной среды, вызванное ими, будет всё более значимо.

Список литературы

1. Панченко М. В., Журавлева Т. Б., Козлов В. С., Насртдинов И. М., Полькин В. В., Терпугова С. А., Чернов Д. Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 45–54.

2. Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O., Soldatov A. Web technologies for rapid assessment of pollution of the atmosphere of the industrial city // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 363 (1), p. 012034, 2018.

3. Шапарев Н. Я., Токарев А. В., Якубайлик О. Э. Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 5. С. 397–401.

4. Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Ваганов Е. А., Сухинин А. И., Максютов Ш. Ш., МкКалум И., Лакида И. П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // ДАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.

Секция 6
«Теплофизика
и гидродинамика
двухфазных потоков»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ AL_2O_3

П. Г. Бобылев*, А. В. Павлов,
Н. Е. Кикоть, А. В. Бикмулин, С. З. Сапожников *

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
**bobylev_pg@spbstu.ru*

В работе представлены экспериментальные данные исследования теплообмена при кипении на перегретой поверхности. В качестве базовой жидкости использовалась вода с добавлением микро- и наночастиц Al_2O_3 массовой концентрацией 0,32 % и размерами 1 мкм и 54 нм соответственно. Эксперименты проводились при недогревах воды Δt = 36; 27 и 20 °C. Основной метод исследования – градиентная теплометрия. Метод основан на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока из меди и никеля. Результатом работы стала зависимость критической плотности теплового потока от недогрева воды с микро- и наночастицами Al_2O_3. Относительно кипения чистой воды отмечено увеличение максимальной плотности теплового потока в 2,3 раза при кипении микрожидкости. При этом кипение воды с добавлением наночастиц Al_2O_3 показало снижение максимальной плотности теплового потока в среднем на 10 %. Точный механизм, влияющий в большей степени на интенсификацию теплообмена, до сих пор не известен.

Кипение жидкости – один из наиболее эффективных и широко применяемых способов отвода теплоты от перегретых поверхностей. Несмотря на многочисленные работы в этой области, появляются новые данные, дополняющие или подтверждающие основные результаты, полученные преимущественно еще в прошлом веке. Анализ осложняет отсутствие достоверной математической модели, которая позволила бы корректно оценить теплообмен при кипении.

Количество исследований, связанных с интенсификацией теплообмена при кипении, постоянно растёт, ввиду увеличения тепловых потоков, которые необходимо эффективно отводить. При этом значительная часть работ рассматривает вопросы интенсификации процесса путем добавления микро- и наночастиц оксидов металлов к базовой жидкости [1]. На сегодняшний день исследователи не пришли к однозначному ответу о влиянии наночастиц оксидов металлов на теплообмен при кипении. Только 55 % исследователей говорят об увеличении коэффициента теплоотдачи (КТО) и критической плотности теплового потока (ПТП), против 37 % исследований, где теплообмен ухудшался и 8 % с отсутствием влияния частиц на теплообмен при кипении [2].

Экспериментальной моделью является цилиндр из титана марки ВТ22 диаметром d = 34 мм и высотой h = 22,3 мм. Исследуемый образец помещается в проходную печь и фиксируется в ней державкой. Сигналы ГГДТП и термопар записываются на измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) модели NIPXI-1050 с частотой записи 5000 измерений/с. При достижении необходимой температуры модели державка высвобождается, и образец погружается в аквариум емкостью 10 л. Температура воды поддерживается омическим нагревателем и отслеживается мультиметром с термопарой модели Fluke 289 [3].

Основной метод, используемый в данной работе – градиентная теплометрия. Метод основан на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека в средах с анизотропией теплопроводности и электропроводности. При прохождении теплового потока через анизотропную среду, возникает поперечная составляющая его вектора,

$$E_0 = S_0 \cdot A \cdot q, \tag{1}$$

где E_0 – термоЭДС, мВ; S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГГДТП, мВ/Вт; A – площадь ГГДТП в плане, м^2; q – ПТП, Вт/м^2 [4].

В наших экспериментах применялись ГГДТП из металлов меди и никеля. Такая модификация имеет температурный диапазон выше своего аналога из монокристалла висмута (1500 К). При этом вольт-ваттная чувствительность имеет экспоненциальную зависимость вида,

$$S_0 = 4.7806 \cdot e^{(-0.011 \cdot t_{\text{ГГДТП}})}, \tag{2}$$

где $t_{\text{ГГДТП}}$ – температура ГГДТП, °C [5].

В работе эксперименты проводились при атмосферном давлении в недогретой воде с массовой долей микро- и наночастиц Al_2O_3 ω = 0,32 %. Размеры микрочастиц не превышали 1 мкм, наночастицы размером 54 нм. Температура модели во всех экспериментах составляла $T_w = 464$ °C; температура воды в зависимости от эксперимента менялась: $T_f = 64$ °C; $T_f = 73$ °C; $T_f = 80$ °C.

По результатам эксперимента были получены значения критической ПТП в зависимости от недогрева жидкости в чистой воде, а также с добавлением микро- и наночастиц Al_2O_3 (рис. 1).

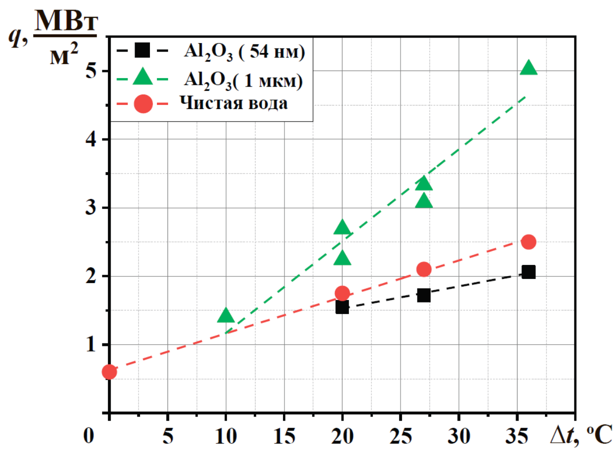


Рис. 1. Зависимость местной ПТП от недогрева чистой воды и воды с добавлением микро- и наночастиц Al_2O_3 с массовой концентрацией 0,32%

Результаты показывают рост критической ПТП при увеличении недогрева как чистой воды, так и при добавлении оксида алюминия. При этом интенсивность теплообмена при кипении наблюдается только при добавлении микрочастиц Al_2O_3. Использование наночастиц негативно влияет на процесс теплообмена, снижая максимальное значение ПТП на 10 % и увеличивая время остывания модели. Подобные результаты напрямую связаны с разными механизмами влияния микро- и наночастиц на процесс теплообмена при кипении.

Исследование поддержано РНФ № 22-29-00160.

Список литературы

1. Ruiz-Jorge F., Portela JR, Sánchez-Oneto J., Martínez de la Ossa EJ. Synthesis of Micro- and Nanoparticles in Sub- and Supercritical Water: From the Laboratory to Larger Scales. // Applied Sciences. 2020; 10(16):5508.

2. Mukherjee S., Ebrahim S., Purna C. M., Naser A., and Chaudhur P. A review on pool and flow boiling enhancement using nanofluids: Nuclear reactor application // Processes 10, 177 (2022).

3. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В., Гусаков А. А., Павлов А. В., Бобылев П. Г. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 10. С. 434–441.

4. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A. V. Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement // St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020. 209 p.

5. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V., Pavlov A. V., Bobylev P. G., Vinogradov M. D. Gradient heatmetry in the study of boiling on spherical surface // 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1867

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ОРОШЕНИЯ СТРУКТУИРОВАННОЙ НАСАДКИ НА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ДИСТИЛЛЯЦИОННОЙ КОЛОННЕ

И. И. Гогонин *

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
gogonin@itp.nsc.ru

Известно, что неравномерность орошения приводит к существенному снижению производительности колонны и заметному снижению качества разделения смесей. Данная работа посвящена исследованию неравномерности орошения насадки, которая создавалась искусственно разными способами. Результаты этих опытов сопоставлены с данными, когда насадка орошалась равномерно при прочих равных условиях.

Подробное описание колонны и методики проведения опытов изложены в [1].

Колонна из нержавеющей стали имела диаметр 200 мм и позволяла разместить в ней шесть слоев насадки, каждый из которых имел высоту 200 мм. Слои насадки были повернуты на 90º относительно друг друга. Опыты выполнены с насадками, имеющими отношение площади к объему 430 или 515 [$м^2/м^3$]. Рабочим веществом являлась смесь хладонов R114/R21.

Колонна оснащена оптическими окнами по всей своей высоте. Окна предназначены для визуализации течения жидкости в насадке при различных режимах работы установки.

Измеряемыми параметрами в эксперименте являлись: концентрация паров смеси на входе и выходе из насадки, температура парожидкостного потока на входе и выходе из насадки, температура жидкости в парогенераторе, температура охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора, давление в колонне парогенератора, перепад давления в насадке, расход пара, поступающего в конденсатор и флегмы поступающий в колонну, расход охлаждающей воды в конденсатор. Концентрация смеси измерялась модернизированным газовым хроматографом.

Линии отбора проб пара от колонны до хроматографа во избежание конденсации пара были термостатированы.

Перепад давления в колонне измерялся дифференциальным датчиком давления. Наружный корпус всех основных узлов установки снабжен охранными нагревателями и теплоизолирован. Тепловой баланс сводился по результатам измерений расхода охлаждающей воды конденсатора и изменения ее энтальпии, по расходу флегмы, расходу пара и скрытой теплоте парообразования смеси, и сравнивался с измерениями электрической мощности парогенератора. Тепловой баланс по всем способам измерения мощности сходился с погрешностью не более ± 5 %.

Опыты проведены при $L/V = 1.0$ и давлении $P = 2{,}96 \cdot 10^5$ Па.

Распределитель жидкости (стандартный распределитель) имел 33 жиклера диаметром 2,3 мм каждый. Плотность точек орошения равнялась 1051 [$1/м^2$]. Паровые каналы этого устройства имели прямоугольное сечение. Их суммарная площадь составляла примерно 20 % от поперечного сечения колонны. Такое устройство достаточно равномерно орошало насадку. Расстояние между краями жиклеров и верхним слоем насадки составляло 75 мм и во всех последующих опытах было неизменным. С данными, полученными при равномерном орошении насадки, сравнивались результаты измерений при неравномерном орошении из различных конструкций оросителя.

Первая серия опытов заключалась в увеличении диаметра жиклера от 2,3 мм до 3,4 мм и снижении их числа от 33 до 18 при равномерном орошении насадки. Плотность орошения в этих опытах составляла 573,2 [1/м^2]. При двукратном изменении плотности орошения эти данные совпадают с данными при плотности орошения 1051 [1/м^2] во всем диапазоне изменения потоков массы.

Во второй серии опытов флегма подавалась через трубу внутренним диаметром 21 мм, расположенную по оси колонны. Плотность орошения в этих опытах составляла 31,8 [1/м^2]. Фактически распределителем жидкости являлся верхний слой насадки. При малых и умеренных потоках массы наблюдалось значительное ухудшение массообмена по сравнению с экспериментами, принятыми в качестве эталона.

Третья и последующие серии опытов выполнены с насадкой, имеющей отношение площади к объему 515 [м^2/м^3].

В опытах при неравномерном орошении всегда использовались жиклеры d = 3,4 мм.

Другая серия опытов проведена, когда неравномерность орошения создавалась посредством выключения жиклеров на одной половине оросителя. Серия «а» выполнена, когда флегма подавалась через 16 жиклеров, расположенных на одной половине распределителя. Неравномерность распределения флегмы была поперечной по отношению к ориентации листов верхнего слоя насадки (поперечная неравномерность орошения). Серия «в» проведена при условии, когда 16 жиклеров, расположенных на одной половине распределителя, создавали неравномерность орошения флегмой, которая была параллельна по отношению к верхнему слою насадки (продольная неравномерность орошения). Результаты этих опытов представлены на рис. 1.

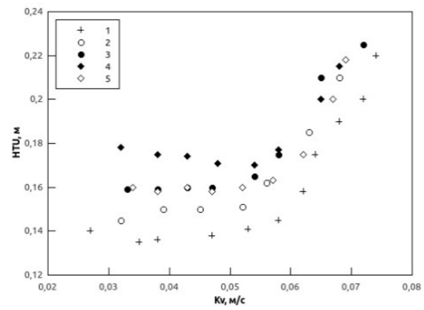


Рис. 1. Зависимость HTU=f(Kv): L/V=1,0; R114/R21. *1* – стандартный ороситель; *2* – заглушены жиклеры внешнего кольца; *3* – заглушены жиклеры внутреннего кольца; *4* – поперечное орошение верхнего слоя насадки; *5* – продольное орошение верхнего слоя насадки

При Kv ≤ 0,05 м/с для «поперечной неравномерности» массоперенос ухудшился на 17–27 % по сравнению с равномерным орошением. Для «продольной неравномерности» снижение интенсивности массопереноса наблюдается в диапазоне 8–14 % (рис. 1).

При Kv> 0,05 данные для всех перечисленных видов неравномерности орошения близки друг к другу, показывая почти одинаковое ухудшение массопереноса по сравнению с равномерным орошением насадки. Перепад давления и скорость пара при захлебывании для насадки при равномерном и неравномерных способах орошения оставались неизменными (в пределах погрешности измерений).

Неравномерность орошения насадки приводит к заметному снижению массопереноса даже для колонны малого диаметра. Перепад давления и режим захлебывания в пределах погрешности измерений практически не изменился от способа орошения насадки.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН № 12103100216-1.

Автор признателен А. И. Катаеву и И. Б. Мироновой, принимавшим участие в выполнении экспериментов.

Список литературы

1. Gogonin I. I. Analysis of Heat and Mass Transfer Characteristics of Distillation Column with Structured Packings with Different Geometrical Parameters. Journal of Eng. Thermophysics, 2021. V.30, No. 4. P. 1-10. DOI: 10.1134/s1810232821040032.

НАБЛЮДЕНИЕ ВЗРЫВНОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ СУБАТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Д. А. Гришаев[*], А. Ю. Радзюк[*]

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[*] frank_benyton@mail.ru

Зарегистрировано гармоническое изменение температуры стенки сосуда при вскипании дистиллированной воды при давлении ниже атмосферного. Полученные результаты сопоставлены с данными других исследователей, выделены три характерные фазы при кипении.

Три основных режима кипения (пузырьковый, переходный и плёночный) достаточно хорошо описаны в имеющейся литературе. Впервые кривые зависимости плотности теплового потока от величины температурного напора, соответствующие этим режимам, были получены японским учёным Сиро Нукиямой еще в 1934 г. [1] Однако при экспериментальном изучении кипения многие исследователи наблюдали аномальное поведение некоторых параметров. Термин «взрывное кипение» впервые был предложен М. М. Мартынюком в 1976 г. при исследовании жидкометаллической фазы при нагреве проводника мощным импульсом тока [2].

Эффект взрывного кипения наблюдался авторами статьи при проведении работ по исследованию тепловых эффектов кавитации. С целью определения количества пара, которое может быть сконденсировано в кавитационной каверне, был поставлен следующий эксперимент. Тонкостенная ёмкость из алюминия объёмом 500 мл, содержащая 300 мл дистиллированной воды, помещалась в термостат, где нагревалась до заданной температуры. Для создания субатмосферного давления ёмкость была соединена с полым конусом, за которым образовывалась кавитационная каверна при его обтекании в прямоточной кавитационной установке [0]. Для измерения температуры к внешней поверхности ёмкости была присоединена термопара типа К, закрытая снаружи слоем тепловой изоляции толщиной 5 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0{,}020$ Вт/(м·°С) и защищенная слоем эпоксидного компаунда (рис. 1).

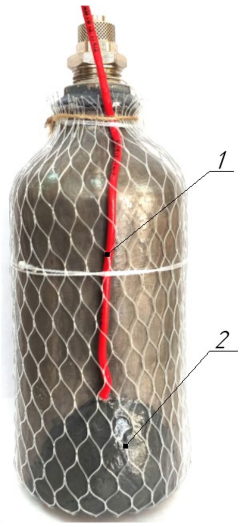


Рис. 1. Экспериментальная емкость: *1* – термопара со слоем тепловой изоляции; *2* – слой эпоксидного компаунда

Термопара подключена через клеммный адаптер Advantech PCLD-8710 к многофункциональной плате сбора данных Advantech PCI-1710. Программа на LabView выводила получаемый от термопары сигнал на графический монитор и передавала в файл Excel данные, которые считывались через каждые 100 миллисекунд.

Наиболее характерная экспериментальная кривая, показывающая изменение температуры поверхности алюминиевой ёмкости, была получена при температуре в термостате 75 °С. Фрагмент полученных данных, показывающий периоды кризисов кипения жидкости, показан на графике (рис. 2, *а*).

Полученные данные хорошо коррелируются с данными, приведенными в работе [4], где также наблюдались периодические колебания температуры поверхности нагревательного элемента, выполненного из меди, при кипении дистиллированной воды в бассейне в области субатмосферного давления (0,85 кПа). Фрагменты колебаний показаны на графиках (рис. 2, *б*–*г*).

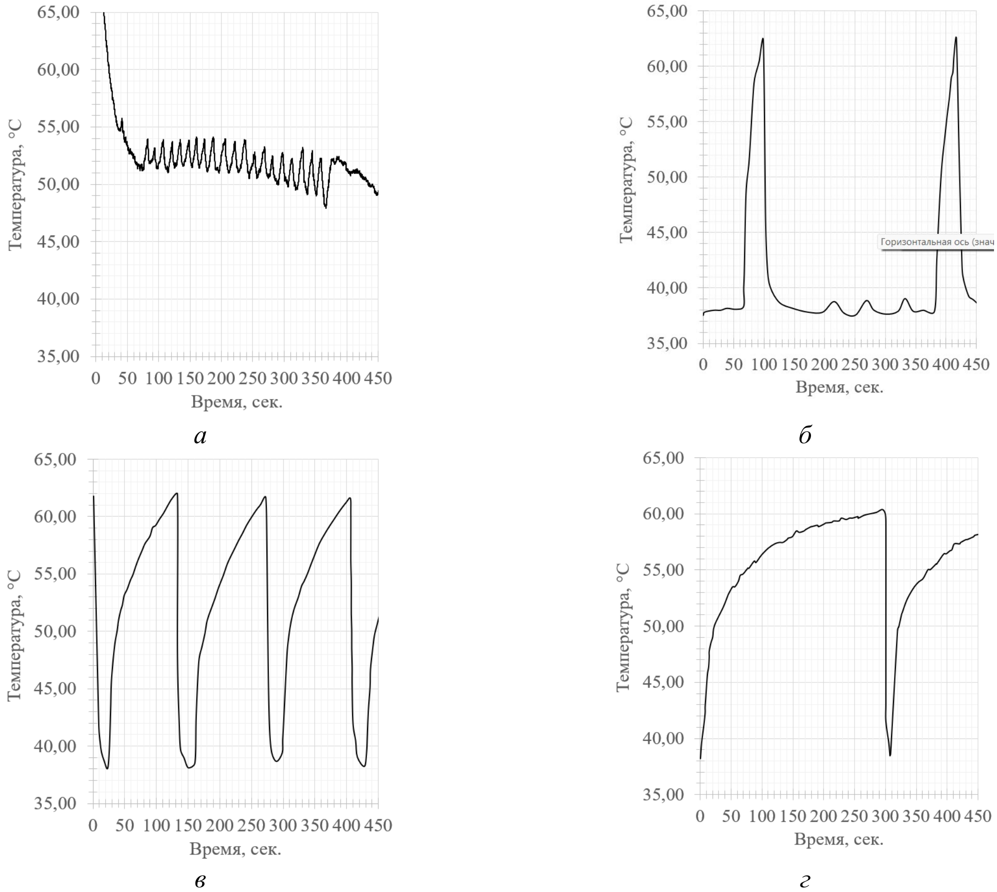


Рис. 2. Фрагмент колебания температуры стенки поверхности при следующих значениях теплового потока: *а* – данные, полученные авторами статьи; *б* – q = 23 Вт/см^2; *в* – q = 12,2 Вт/см^2; *г* – q = 9,4 Вт/см^2 [0]

В работе [4] авторы выделили три фазы. В первой фазе происходит перегрев стенки нагревателя, и температура повышается до тех пор, пока не достигнет значения, необходимого для образования достаточного количества центров парообразования для возникновения развитого пузырькового кипения. После этого начинается вторая фаза, в которой происходит рост и последующий отрыв парового пузырька. Температура стенки поверхности начинает резко падать. В третьей фазе происходит образование паровой плёнки и переход от пузырькового кипения к плёночному.

Таким образом, полученные в нашей работе данные хорошо согласуются с литературными данными, а методика проведения эксперимента и их результаты могут стать опорными при дальнейших изучениях процесса кипения.

Список литературы

1. Nukiyama S. Film boiling water on thin wires. Soc. Mech. Engng., Japan. 1934. Vol. 37.

2. Martynyuk M. M. Phase explosion of a metastable fluid. Combust Explos Shock Waves. 1977. Vol. 13. P. 178–191. DOI: 10.1007/BF00754998.

3. Радзюк А. Ю., Кулагин В. А., Истягина Е. Б., Пьяных Т. А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 4. С. 468–475. DOI 10.17516/1999-494X-0155.

4. Giraud F., Rullière R., Toublanc C., Clausse M., Bonjour J. Experimental evidence of a new regime for boiling of water at subatmospheric pressure. Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. Vol. 60. P. 45–53. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.07.011.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ОТ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ

М. И. Ершов[1, 2‡], А. Ф. Рыжков[1], В. Г. Тупоногов[1] *

[1]*Уральский федеральный университет*
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, 19
[2]*Группа компаний «ПЛМ Урал»*
620131, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Металлургов, 16б
‡*ershov1807@gmail.com*

В работе изложены результаты CFD-моделирования обтекания воздухом двух неподвижных сферических частиц, расположенных друг за другом. Основной целью моделирования являлось выявление зависимости объёмной концентрации частиц от их диаметра и плотности, при которой аэродинамическое влияние первой сферы на вторую снижается до 5 % при условии обдува частиц потоком при скорости витания данных частиц. Математическая модель была валидирована на основании экспериментальных данных. В результате расчетов 25 случаев получены аппроксимационные зависимости объёмной концентрации частиц от числа Рейнольдса. Результаты расчетов востребованы для проектирования поточных реакторов конверсии биомассы и уточнения моделей аэродинамического сопротивления при CFD-моделировании систем с дисперсными фазами.

Поточные процессы пневмотранспорта горючих частиц хорошо изучены и разработаны для тяжелых топлив, применяемых в пылеугольных котлах и газификаторах [1]. Тогда как для биомассы и продуктов её пиролиза подобные процессы изучены слабее и встречаются в литературе реже. Для того чтобы разрабатывать и оптимизировать реакторы на биомассе, необходимо исследовать влияние параметров частиц (диаметр и плотность) на максимальную объёмную концентрацию частиц, при которой ещё реализуется устойчивый режим пневмотранспорта частиц.

Для получения качественной оценки зависимости объёмной концентрации частиц φ от их параметров была решена задача обтекания двух расположенных в ряд одна за другой неподвижных сфер с помощью пакета CFD-моделирования Ansys Fluent. Основной целью расчетов было получение отношения силы сопротивления, действующей на вторую сферу F_2 к силе сопротивления, действующей на первую сферу F_1, при различных межсферных расстояниях x для различных диаметров сфер d и скоростей воздуха u.

Сначала была произведена валидация математической модели на основании экспериментальной работы [2]. Первоначальные расчеты показали, что результаты сильно зависят от профиля скорости на входе в канал. Использование установившегося профиля скорости привело к отклонению от эксперимента в среднем на 10 %, а неустановившегося – менее 2 %. Однако использование неустановившегося профиля скорости приводит к слишком быстрому росту отношения сил сопротивления F_2/F_1. Использование установившегося профиля скорости также мешает исследованию физических явлений, поскольку стенки оказывают влияние на отношение сил сопротивления F_2/F_1.

Таким образом, чтобы отстраниться от значительного числа влияющих факторов, были приняты следующие допущения на этапе постановки CFD-расчета:

1) задача обладает осевой симметрией;

2) рассматривается ламинарный режим течения;

3) стенки канала «проскальзываемы» для потока, отсутствует гипотеза прилипания;

4) на входе задается равномерно распределенная по сечению скорость воздуха;

5) частицы считаются закрепленными и неподвижными.

Всего в моделировании было рассмотрено 25 комбинаций диаметров (от 100 до 3 000 мкм) и плотностей частиц (от 100 до 3 000 кг/м^3). Для приближения к реальным условиям пневмотранспорта для каждой комбинации диаметра и плотности частицы вычислялась скорость витания по формуле Розенбаума – Тодеса [3], которая затем задавалась на входе в расчетную область. Наибольший интерес представляло относительное межсферное расстояние x/d, при котором отношение сил $F_2/F_1 = 0{,}95$ (влияние на вторую сферу 5 %), на основании которого вычислялась предельная объёмная концентрация частиц, при которой ещё возможна работа реактора в поточном режиме с незначительным уровнем сил аэродинамического взаимодействия между частицами, в предположении равноудаленного расположения сфер в узлах кубической решетки.

Результаты расчетов и корреляционная зависимость представлены на рис. 1. Моделирование показало, что с ростом числа Рейнольдса (*Re*) монотонно растет относительное межсферное расстояние x/d, при котором отношение сил $F_2/F_1 = 0{,}95$. Следовательно, с ростом числа Рейнольдса будет монотонно убывать объёмная концентрация частиц, соответствующая искомому состоянию (рис. 1).

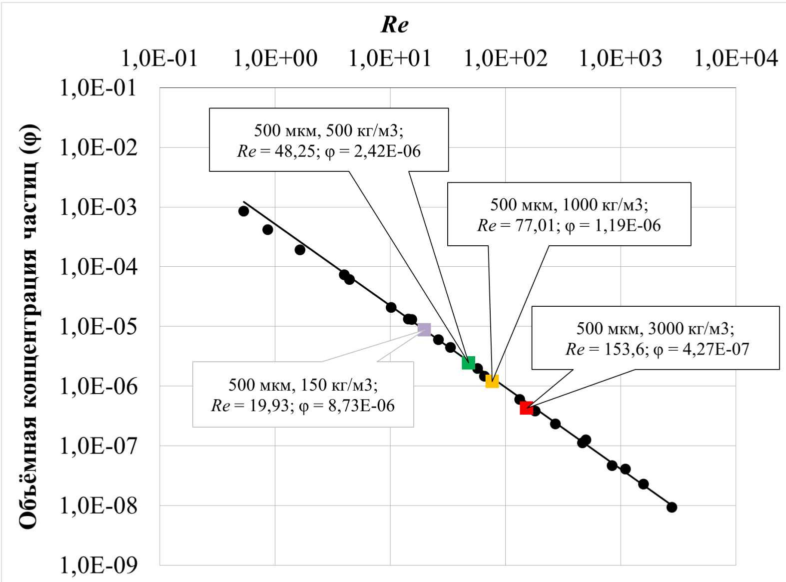


Рис. 1. Зависимость объёмной концентрации частиц при снижении влияния на вторую сферу до 5 % от числа *Re* для всех расчетных случаев (точки – результаты расчетов, кривая – аппроксимация)

Монотонная зависимость от числа Рейнольдса означает, что при постоянном диаметре частицы с понижением её плотности будет расти максимальная объёмная концентрация частиц, при которой ещё возможно витание частиц и работа пневмотранспорта. Так, на рис. 1 подсвечены точки, соответствующие частицам диаметром 500 мкм для исходной биомассы (зеленая, плотность 500 кг/м^3), продуктов пиролиза биомассы (лиловая, плотность 150 кг/м^3) и угля (оранжевая и красная, плотность в интервале 1000-3000 кг/м^3). Согласно расчетам, при переходе с угля на исходную биомассу при диаметре частиц 500 мкм, плотность газодисперсного потока может быть увеличена в 2–5 раз, а при переходе на продукты пиролиза биомассы – в 7–20 раз, что может обеспечить соответствующее снижение объема аппарата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральско-

го федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.

2. Rowe P. N., Henwood G. A. Drag Forces in a Hydraulic Model of a Fluidized Bed-Part I // Trans. Instn. Chem. Engrs., 39, pp. 43-54, 1961.

3. Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 510 с.

МОНИТОРИНГ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Э. Р. Зайнуллина*, В. Ю. Митяков *

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
* *zajnullina_er@spbstu.ru*

Работа посвящена применению градиентной теплометрии к мониторингу теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на поверхности вертикальной пластины. В эксперименте совмещены градиентная теплометрия и визуализация течения конденсата. Измерение местной плотности теплового потока выполнено гетерогенным градиентным датчиком теплового потока из композиции медь-никель, визуализация – посредством видеокамеры. Результаты подтвердили взаимосвязь плотности теплового потока с характером течения конденсата. Комплексный подход позволил выделить на временной теплограмме этапы конденсации: формирование капель с характерной средней плотностью теплового потока $\bar{q}$ = 3,2 кВт/м^2, увеличение размеров капель и их объединение – 9,6 кВт/м^2, установление капельно-ручейкового режима течения – 31,2 кВт/м^2.

В предыдущих экспериментах подтверждена применимость гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП) к изучению теплообмена при конденсации [1]. Опыты [2, 3], выполненные при совмещении градиентной теплометрии и визуализации течения, повысили информативность теплометрии. В настоящей работе принята попытка совместить возможности градиентной теплометрии и визуализации течения при изучении конденсации водяного пара на вертикальной охлаждаемой пластине.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Диск из нержавеющей стали диаметром 150 мм и толщиной 0,75 мм имеет коробчатый контур для подвода и отвода охлаждающей воды. Подвод пара к теплообменной поверхности обеспечивает парогенератор. На стенде отсутствуют стенки, препятствующие рассеиванию пара, поэтому расходы конденсата и пара не измерялись.

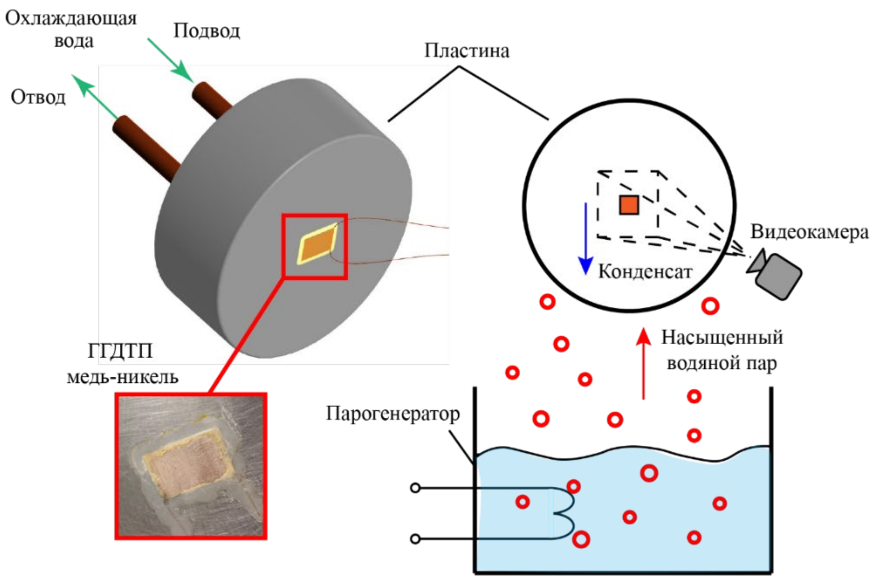


Рис. 1. Экспериментальная установка

В центре теплообменной поверхности установлен ГГДТП из композиции медь-никель размерами 10 × 15 × 0,2 мм, который подключен по «трехпроводной схеме»: к ГГДТП приварены два медных и один алюмелевый провод; подключение измерительного прибора к паре проводов медь-медь обеспечивает измерение плотности теплового потока, а к паре медь-алюмель – температуры в зоне установки датчика. Одновременно с записью сигнала ГГДТП выполнялась видеозапись конденсации на вертикальном диске, раскадровка которой позволила сопоставлять мгновенную плотность теплового потока с движением конденсата.

На рис. 2, *а* приведена временная теплограмма, полученная при конденсации водяного пара на поверхности вертикального диска. По плотности теплового потока на кривой можно выделить три этапа: на первом (I) $\bar{q}$ = 3,2 кВт/м^2, на втором (II) – $\bar{q}$ = 9,6 кВт/м^2, третий (III) – $\bar{q}$ = 31,2 кВт/м^2. На рис. 2, *б–г* приведены результаты раскадровки видеозаписи.

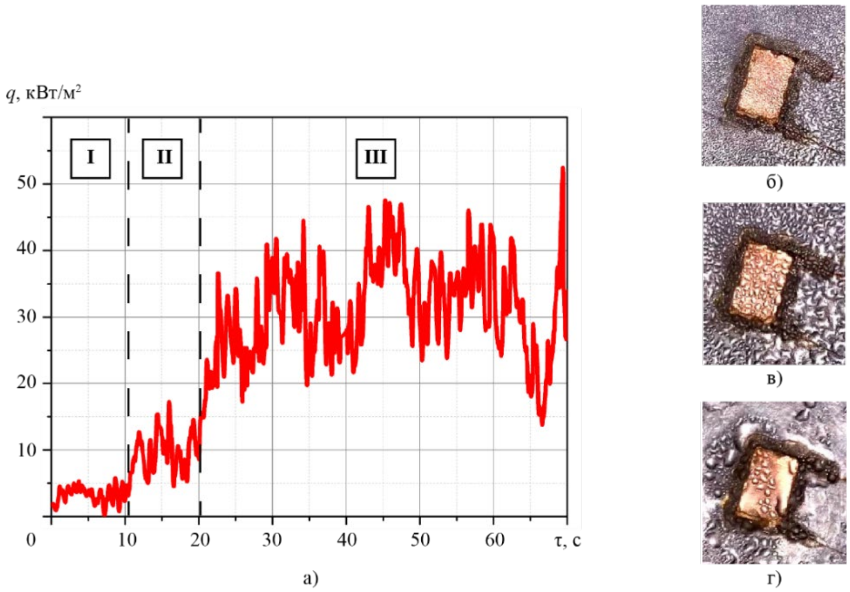


Рис. 2. Временная теплограмма (*а*) и фотографии течения в моменты времени: τ = 9 с (*б*), 19 с (*в*), 43 с (*г*) при конденсации насыщенного водяного пара на вертикальной пластине

Совместный анализ поведения временной теплограммы и картин течения конденсата позволил объяснить пульсации плотности теплового потока. В ходе комплексного исследования установлено, что при стекании конденсата в виде ручейков с поверхности пластины плотность теплового потока может резко увеличиваться от 14 до 53 кВт/м^2 за 2 с. Уменьшение плотности теплового потока объясняется скоплением конденсата на поверхности ГГДТП.

Установлено, что дальнейшее развитие предлагаемой методики позволит разработать метод мониторинга конденсации без использования визуализации, что является актуальной задачей для действующих теплоотводящих установок.

Исследование поддержано РНФ № 22-29-00152.

Список литературы

1. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В., Бабич А. Ю., Зайнуллина Э. Р. Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплометрии // ПЖТФ. 2019. Т. 45, вып. 7. С. 15.

2. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V., Pavlov A. V., Bobylev P. G., Kikot N. E. and Bikmulin A. V. Comprehensive study of boiling regimes with use of high-speed imaging and gradient heatmetry // J. of Phys: Conf Ser., V. 2127, 2021.

3. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Seroshtanov V. V. and Gusakov A. A. The combination of PIV and heat flux measurement in study of flow and heat transfer near a circular finned cylinder // J. of Phys: Conf Ser., V. 1421. 2019.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ВОЛНОВУЮ КАРТИНУ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ РЕЖИМЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ

С. В. Исаенков*, А. В. Черданцев *

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
**sergei.isaenkov@gmail.ru*

Изучено влияние низкочастотных внешних возмущений на эволюцию волновой картины на поверхности пленки жидкости в кольцевом режиме течения в вертикальном канале с внутренним диаметром 11,7 мм. Эксперименты проводились в широком диапазоне расходов жидкости и скоростей газа. Метод лазерно-индуцированной флуоресценции позволяет проводить измерения толщины пленки жидкости с высоким пространственным и временным разрешением. Анализ пространственно-временных записей толщины показал влияние возбуждения на эволюцию волновой картины течения; частота менялась в диапазоне от 0 до 10 Гц.

Течение пленки жидкости, обдуваемой высокоскоростным потоком газа, часто встречается в промышленности и энергетике. В результате взаимодействия высокоскоростного потока газа и пленки жидкости на поверхности пленки образуются сложные волновые структуры, которые влияют на интегральные характеристики потока (перепад давления, тепломассообмен).

При высоких скоростях газа и расходах жидкости происходит отрыв капель с поверхности пленки. На рис. 1, *а* представлена граница перехода к уносу, ниже которой не происходит отрыва капель. Целью данной работы является исследование возможности влияния на границу перехода к уносу посредством низкочастотных пульсаций расхода жидкости на входе.

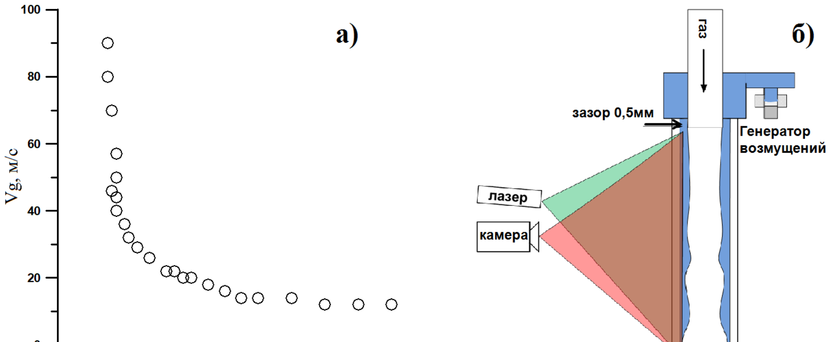


Рис. 1. Граница перехода к уносу для воды (*а*); схема работы ЛИФ-метода (*б*)

Исследование волновой картины на поверхности пленки жидкости проводилось с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Данный метод позволяет проводить полевые измерения локальной толщины пленки жидкости с высоким пространственным и временным разрешением. Рабочая область длиной 400 мм, начиная от входа, освещалась лазером с длиной волны 532 нм (рис. 1, *б*). Высокоскоростная камера с оранжевым фильтром фиксировала локальную яркость переизлученного света, на основе которой восстанавливалась локальная толщина пленки. Жидкость подается на стенки рабочего участка через щелевой распределитель (рис. 1, *б*). Генератор возмущений устанавливается в трубе подачи жидкости непосредственно перед распределителем. Скорость газа V_g варьировалась в интервале от 6 до 90 м/с, а числа Рейнольдса жидкости Re от 40 до 400. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода с кинематической вязкостью $\nu = 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (при рабочей температуре 16 °C).

Горизонтальная ветвь. Волновая структура пленки жидкости при режиме с отрывом капель с поверхности представлена крупномасштабными волнами возмущения и волнами ряби [1]. Наличие волн возмущения является необходимым условием для отрыва капель. Вопрос о механизме формирования волн возмущения оставался открытым до недавнего времени. В работе [2] говорится, что формирование волн возмущения происходит уже на первых сантиметрах от входа благодаря слиянию начальных высокочастотных волн.

Обнаружено, что локальное увеличение расхода жидкости приводит к формированию крупных волн возмущения при меньшей скорости газа (рис. 2, *а*, *б*). При скоростях газа, достаточных для формирования волны возмущения, наложение пульсаций расхода приводит к более ранней стабилизации волновых характеристик.

Вертикальная ветвь. При малых расходах жидкости, больших скоростях газа (свыше 15 м/с) и отсутствии внешних возмущений средняя толщина пленки однородна во времени (рис. 2, *в*). В этом случае волновая картина представлена первичными и вторичными волнами (обозначены на рис. 2, *г* цифрами *1* и *2* соответственно) [3]. При низкочастотной модуляции происходит перестроение течения: появляются высокоамплитудные горбы и впадины (рис. 2, *д*). Средняя толщина горба соответствует толщине, при которой происходит унос капель с поверхности пленки, т. е. реализуется дисперсно-кольцевое течение. Такой горб имеет достаточной большой продольный размер, поэтому на его поверхности успевают сформироваться волны возмущения (рис. 2, *д*). Таким образом, наложение внешних возмущений приводит к смещению границы уноса в сторону меньших расходов жидкости.

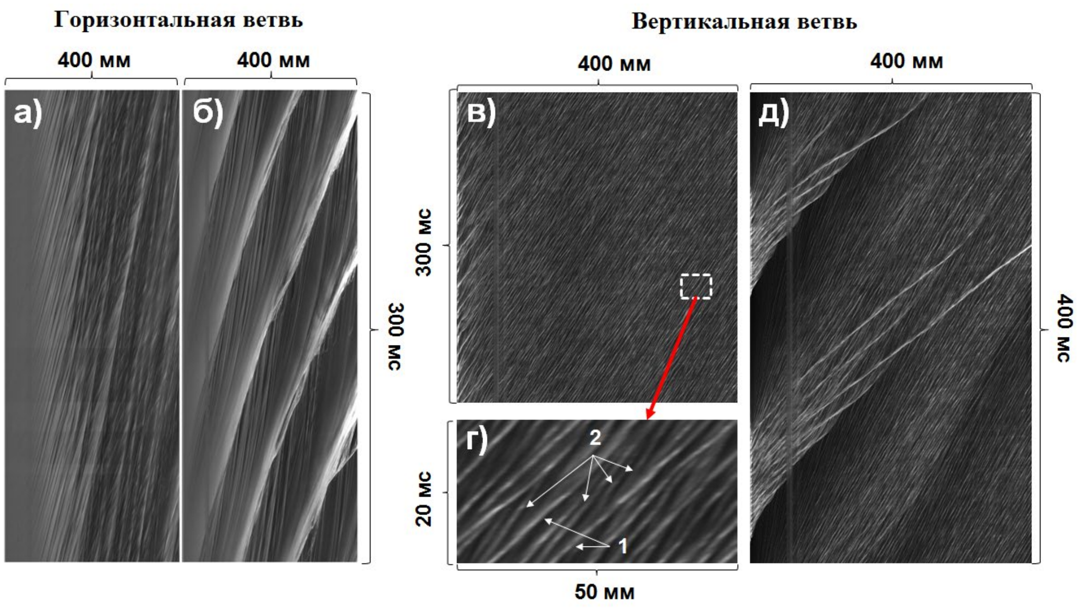


Рис. 2. *а, б*) Re = 300, Vg = 8 м/с, f = 0 Гц (а), f = 10 Гц (б);
в–д) Re = 50, Vg = 43 м/с, f = 0 Гц (в, г), f = 5 Гц (д)

Исследование поддержано РНФ № 19-79-30075.

Список литературы

1. Hewitt G. F., Jayanti S., Hope C. B. Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow // Int. J. Multiphase Flow, 16, pp. 951–957, 1990.

2. Alekseenko S. V., Cherdantsev A. V., Cherdantsev M. V., Isaenkov S. V., Markovich D. M. Study of formation and development of disturbance waves in annular gas–liquid flow // Int. J. Multiphase Flow, 77, pp. 65–75, 2015.

3. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Cherdantsev A. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment // Phys. Fluids 21, 061701–061704, 2009.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ СМАЧИВАЕМОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ С ТВЕРДЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

А. Г. Исламова[⁑], Н. Е. Шлегель, П. А. Стрижак[*]

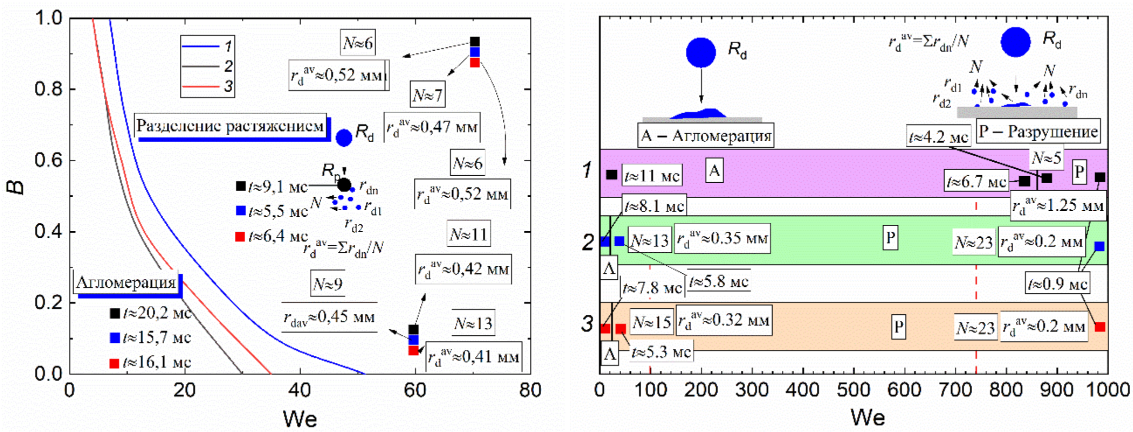
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634030, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[⁑] *agi2@tpu.ru*

Процессы взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц реализуются во многих практических приложениях: теплообменные системы, топливные технологии, оросительные установки, пожаротушение и др. Приведены результаты исследования режимов и последствий соударений капель широко используемой жидкости – воды с твердыми частицами и стальными подложками с варьируемой смачиваемостью. Построены карты двух режимов соударений (агломерация, разделение растяжением) с регистрацией количества и размеров вторичных жидкостных фрагментов в системе координат с учетом числа Вебера и безразмерного параметра взаимодействия.

Взаимодействие твердых частиц и капель жидкостей реализуется в различных приложениях. Например, можно выделить типичные соударения капель и частиц в камерах сгорания энергетических установок [1], распылительных системах при приготовлении многокомпонентных смесей или разделении компонентов [2], в испарительных и теплообменных системах [3], химических реакторах [4], пищевой промышленности [5] и др. Во всех перечисленных приложениях процессы взаимодействия капель и частиц приводят к существенным изменениям дисперсности жидкостного аэрозоля и аэровзвеси твердых частиц. Это значительно влияет на характеристики гидрогазодинамических и теплообменных процессов. Цель настоящей работы – построение карт режимов взаимодействия капель воды с твердыми частицами при варьировании их размеров и смачиваемости твердой поверхности, а также сравнение последствий соударений с результатами взаимодействия аналогичных капель с массивными подложками из аналогичных материалов.

В экспериментальных исследованиях использовались металлические сферические частицы диаметром от 2 до 4 мм, а также металлические подложки в виде цилиндрического диска толщиной 10 мм и диаметром 80 мм. Для варьирования смачиваемости поверхность подложек и шаров обрабатывалась в соответствии со следующей методикой. На твердой поверхности формировалась текстура лазерной обработкой иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм в составе лазерной установки МиниМаркер-2 Laser Center. Процедура лазерного текстурирования проводилась в воздушной среде при температуре 20 °C, атмосферном давлении, относительной влажности 40 %. На образцы воздействовали одиночными лазерными импульсами длительностью 200 нс, средней выходной мощностью 20 Вт, частотой излучения 20 кГц, скоростью перемещения луча 200 мм/с и числом линий проходов 10 1/мм. Текстура на твердой поверхности формировалась в условиях пятикратного прохождения луча. Для проведения экспериментов использовался модифицированный относительно ранее реализованных схем соударений капель жидкостей стенд [6].

По результатам экспериментов построены карты режимов соударения капли воды с частицей (рис. 1, *а*) и подложкой (рис. 1, *б*). Установлено, что при соударении капель с твердой частицей с гидрофобным и гидрофильным покрытием разрушение пленки жидкости реализуется при меньших критических значениях числа Вебера (We). Такой эффект связан с тем, что поверхность полированной частицы имеет минимальное количество элементов шероховатости и искусственной пористости, а поверхности, обработанные лазером, имеют небольшие кратеры. Попадая на такую поверхность, капля разрушается за счет интенсивной деформации слоев жидкости как в приповерхностном слое, так и над ним. При сравнении же гидрофобного и гидрофильного покрытия установлено, что отклонения критического числа Вебера, при котором происходит разрушение капли, составляют около 5 % практически во всем диапазоне изменения линейного параметра взаимодействия (B). Этот эффект обусловлен видимыми отличиями покрытий по количеству и размерам кратеров, сформированных лазером и нагревающей системой.



а б

Рис. 1. Карта режимов взаимодействия капли с частицами (*а*) и твердой подложкой (*б*): *1* – полированные поверхности частицы и подложки; *2* – нанесенное гидрофильное покрытие на частицу и подложку; *3* – нанесенное гидрофобное покрытие на частицу и подложку

Установлено, что при режиме разделения растяжением количество вторичных фрагментов для линейного параметра взаимодействия около 0 является наибольшим для гидрофобного покрытия. Для гидрофильного покрытия значение этого параметра ниже на 5–10 %, а для полированной частицы – на 10–15 %. Установлено, что при попадании капли на полированную подложку происходит режим агломерации практически до критического значения числа Вебера около 700. При попадании капли на гидрофильную и гидрофобную поверхности режим separation реализуется при числе Вебера около 30. Причем количество вторичных фрагментов практически не отличается (3–5 %). Такой эффект связан, как и в случае столкновения капли с частицей, с неоднородностью приповерхностного слоя покрытия. Установленные эффекты показывают, что за счет изменения структуры приповерхностных слоев частиц и подложек в виде твердых стенок можно стабилизировать количество и размеры вторичных капель и изменять предельные (критические) значения числа Вебера, а также, наоборот, при идентичных значениях We получать разное количество вторичных капель.

Исследования выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект 18-71-10002-п, https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/).

Список литературы

1. Yang C., Jeong J., Kim Y., Bang B., Lee U. Numerical simualtion of a circulating fluidized bed combustor and evaluation of empirical models for estimating solids volume fraction // Powder Technol., vol. 393, pp. 786–795, 2021.

2. Wang P., Zhang K., Liu R. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle // Powder Technol., vol. 355, pp. 393–407, 2019.

3. Kunkel S., Teumer T., Dörnhofer P., Schlachter K., Weldeslasie Y., Kühr M., Rädle M., Repke J. U. Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems // Appl. Therm. Eng., vol. 145, pp. 71–79, 2018.

4. Malgarinos I., Nikolopoulos N., Gavaises M. Numerical investigation of heavy fuel droplet-particle collisions in the injection zone of a Fluid Catalytic Cracking reactor, Part I: Numerical model and 2D simulations // Fuel Process. Technol., vol. 156, pp. 317–330, 2017.

5. Shlegel N. E., Strizhak P. A., Volkov R. S. Collision Behavior of Heterogeneous Liquid Droplets // Microgravity Sci. Technol., vol. 31, pp. 487–503, 2019.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ В ПРИСУТСТВИИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А. Е. Коренченко[1‡], А. А. Жукова[2] *

[1]*МИРЭА – Российский технологический университет*
107076, Российская Федерация, Москва, ул. Стромынка, 20
[2]*Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова*
119991, Российская Федерация, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
[‡] *korenchenko@mirea.ru*

Результаты экспериментов по измерению скорости испарения с поверхности жидкой лежащей капли в газ указывают, что конвективные потоки над поверхностью увеличивают скорость испарения. Однако данные относительно того, в какой мере конвекция влияет на процесс испарения, сильно разнятся и требуют уточнения. Для анализа скорости испарения с поверхности капли воды в нейтральный газ использовалась математическая модель, построенная для испарения, контролируемого диффузией в газовой фазе. Обнаружено, что скорость испарения не изменяется в присутствии течений вынужденной конвекции, что противоречит большинству экспериментальных работ. Предположительная причина расхождений заключается в возникновении неравновесных условий на границе конденсированной фазы, при которых режим испарения перестает быть диффузионным.

Испарение жидкости с поверхности является частью круговорота воды в природе, широко распространено в промышленных технологиях и повседневной жизни и поэтому активно исследуется теоретически и экспериментально [1–7]. В связи с испарением воды с поверхности установлены два экспериментальных факта: конвективные потоки воздуха над поверхностью иногда ускоряют процесс испарения; испарение происходит тем интенсивнее, чем меньше влажность окружающего воздуха φ. Однако относительно того, в какой мере эти условия влияют на скорость испарения, данные, приведенные в литературе, сильно различаются и иногда противоречивы. Например, экспериментальные исследования испарения с плоской поверхности воды в присутствии конвективных течений показывают увеличение скорости испарения, линейное по отношению к скорости течений V [2], выраженное полиномом 3-й степени [3] или пропорциональное $\sim V^{3/2}$ [4], тогда как численные расчеты указывают на слабое влияние конвекции на скорость испарения [1]. Для зависимости скорости испарения от разности между давлением насыщенного пара над поверхностью p_{vs} и парциальным давлением пара в окружающем воздухе p_{v0} эксперименты дают зависимость вида $\left(p_{vs} - p_{v0}\right)^n$, где приближение Дальтона предсказывает $n = 1$, в [2] получены значения n, меньшие 1, в [5] – бо́льшие 1, а в [4] предложено выражение, связывающее n со скоростью течений в воздухе. Разнятся также мнения относительно роли свободной конвекции при испарении. В эксперименте [6] исследовалась скорость испарения с поверхности лежащих и висящих капель воды, и авторы сделали вывод об отсутствии влияния гравитационной конвекции в газовой фазе. Однако в экспериментах [7] получено увеличение скорости испарения с поверхности лежащей капли в четыре раза по сравнению со скоростью, рассчитанной для диффузионного режима испарения. Причины, по которым воздействие одних и тех же факторов [2–7] на испарение вызывает различный отклик, неясны.

В работе рассмотрена капля жидкости, лежащая на горизонтальной поверхности; R – радиус равновеликой сферической капли. Капля находится в атмосфере нейтрального неконденсирующегося газа. Задача решена в приближении осевой симметрии методом конечных разностей. Размеры вычислительного объема намного превышают радиус капли, $R_к, H_к \gg R$ (рис. 1, схематичный, масштабы не соблюдены).

Математическая модель содержит уравнения сохранения вещества, импульса и энергии, записанные отдельно для жидкой и газовой сред. На границе жидкость-газ записаны уравнения для непрерывности потока вещества, теплового потока, формула Лапласа для баланса нормального давления. Пар на границе жидкости предполагается насыщенным. Нормальная составляющая скорости газовой среды над поверхностью капли определяется условием Стефана. Условие на трехфазной границе описывается как $\theta_0 = \text{const}$, где θ_0 – равновесный угол смачивания.

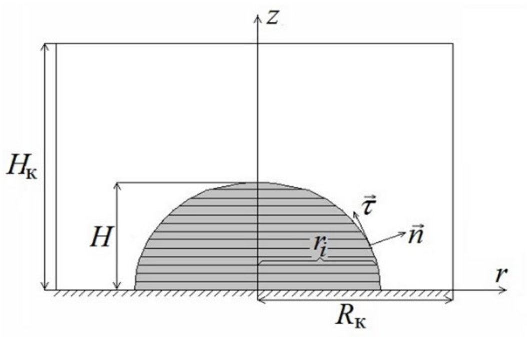


Рис. 1. Схема эксперимента

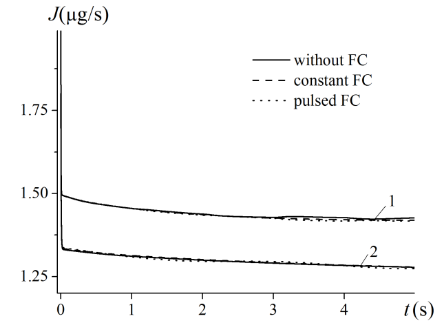


Рис. 2. Временные зависимости скорости испарения для различных режимов вынужденной конвекции: 1 – CH_4; 2 – N_2

Течения вынужденной конвекции, совместимые с условиями осевой симметрии задачи, были заданы следующим образом. На верхней границе вычислительного объема при $z = H_к$ имелось круглое отверстие, в которое задували воздух. На боковой границе при $r = R_к$ имелась щель, из которой вытекал воздух, ширина щели была подобрана так, чтобы количество втекающего и вытекающего воздуха совпадало.

Как показали расчеты, вынужденная конвекция в газовой фазе влияет на форму капли и течения в ней. В случае пульсирующих конвективных течений капля реагирует на начало и окончание конвекции колебаниями на основной частоте собственных колебаний. Временные зависимости скорости испарения, полученные для испарения в неподвижный газ и в присутствии вынужденной конвекции, совпадают между собой (рис. 2), что согласуется с результатами некоторых вычислительных работ [1] и противоречит результатам всех экспериментальных исследований [2–5,7]. Причина полученного разногласия, возможно, заключается в возникновении неравновесных условий на границе конденсированной фазы, при которых режим испарения перестает быть диффузионным.

Возможно, для адекватного численного описания влияния конвекции в газовой фазе на испарение с поверхности жидкости требуется модель взаимодействия течений с веществом в слое Кнудсена, на границе которого следует сшивать полученные условия с системами уравнений, записанными для объемных областей.

Список литературы

1. Ljung Anna-Lena, Staffan T. Lundström, Evaporation of a sessile water droplet subjected to forced convection in humid environment, Dry Technol., 37(1), pp. 129-138, 2019
.

2. Tang R., Etzion Y. Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface, Build. Environ., 39(1), 77-86, 2004.

3. Al-Shammiri M. Evaporation rate as a function of water salinity, Desalination, 150(2), 189-203, 2002 .

4. Jodat A., Moghiman M. An experimental assessment of the evaporation correlations for natural, forced and combined convection regimes, Inst. Mech. Sci., 226(1), 145-153, 2022.

5. Boetler L. M. K., Gordon H. S., Griffin J. R. Free evaporation into air of water from a free horizontal quiet surface. Ind. Eng. Chem. 1946; 38(6): 596–600.

6. Guéna G., Poulard C., Cazabat A. M. The leading edge of evaporating droplets. J. Colloid Interface Sci. 2007; 312: 164-171. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.06.023

7. Kelly-Zion P. L., Pursell C. J., Vaidya S., Batra J. Evaporation of sessile drops under combined diffusion and natural convection. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects. 2011; 381: 31–36. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.03.020.

ОСНОВЫ КАВИТАЦИОННОЙ БИОМЕХАНИКИ

В. А. Кулагин*, Л. В. Кулагина*

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
* *v.a.kulagin@mail.ru*

Кавитационная биомеханика изучает точными методами механики биологические объекты и переносит их бионические эффекты в новую технику и технологию, используя кавитацию и течение многофазных жидкостей. Общность и единство ряда различных наук с механикой неоднократно подмечал академик Л. И. Седов. Естественность этого единства послужила основой для возникновения в последние десятилетия биомеханики, геомеханики, механохимии и др.

Как отмечал академик Л. И. Седов, «… характерной особенностью современной механики является все нарастающее углубление ее связей с физикой и другими естественными науками – химией, биологией, геофизикой». Современный этап развития науки характеризуется достижениями во многих случаях именно на стыке различных направлений. Это, например, бионика (и ее самостоятельное направление – гидробионика с разделом биогидродинамики), возникшая на пересечении задач гидродинамики, биологии, математики, электроники и других классических разделов естественных наук. В основу отечественной биогидродинамики положены труды академиков В. В. Шулейкина, М. А. Лаврентьева, Г. В. Логвиновича, профессоров Л. Ф. Козлова, В. М. Ивченко и других ученых в СССР, России и за рубежом. Исследуя биологические системы в природе, можно сделать вывод, что большую роль играет не только «целенаправленное моделирование в виде оптимальных технических систем опыта эволюционного развития природы», реализуемое во взаимодействии с внешней средой (полет, плавание и т. п.), но и скрытые, внутренние, затрагивающие основы жизни процессы, проявляющиеся через свойства среды обитания. Здесь в первую очередь имеются в виду жидкие среды и явления, происходящие в них в гидромеханическом смысле изменения физических свойств, оказывающие влияния на биологическую постановку практических задач. Например, эффекты кавитации, в основу применения которых положены идеи и работы В. М. Ивченко и его учеников.

Теперь, вероятно, пришло время синтеза науки, в каком-то смысле возврата к древнему и более общему понятию физики как науки об окружающем человека мире в целом. Именно о таком органичном синтезе механики и биологии следует прежде всего говорить, имея в виду новую отрасль науки – биомеханику.

О синтезе и переносе задач и методов из механики в биологию и наоборот можно судить по известному парадоксу Грея. У живых организмов затраты мощности на движение в воде намного меньше, чем у их рукотворных копий. Детальное изучение (неоконченное) показывает его селективных характер и зависимость от ряда гидродинамических эффектов (слизистые покровы, упругодемпфирующие свойства кожи, гидроупругие свойства хвостовых плавников-движителей водных животных и рыб и т. д.), которые с успехом уже используются в технических средствах освоения Мирового океана.

Другой метод свидетельствует о переносе точных методов механики сплошных сред на изучение процессов дыхания и кровообращения у приматов и человека. В результате доказано демпфирование псевдотурбулентности при течении крови в сосудах, как следствие, выдвижение гипотезы о вырабатывании организмом в крови высокомолекулярных полимеров, обеспечивающих проявление указанного эффекта Томса.

Подобная биологическая направленность отчасти характерна и для современной гидродинамики за рубежом. Специфическая особенность гидродинамики при быстрых движениях (с кавитацией) заключается в образовании и течении многофазных парогазожидкостных сред.

Важное место следует отвести эффектам в воде и водных растворах. Вода – одно из самых удивительных веществ на Земле. Если Земля, по выражению К. Э. Циолковского, – колыбель человечества, то колыбель жизни на Земле, безусловно, – Океан. Водные системы играют уникальную роль в жизни человека и в формировании нашей планеты. Академик В. И. Вернадский говорил, что нет такого компонента, который мог бы сравниться с водой по влиянию на ход основных, самых грандиозных геологических процессов. Нет на земле таких отраслей промышленности и быта человека, где бы не применялась вода. Вода – подлинное чудо природы, стала для нас обыденным явлением. Она поражает не только разнообразием изотропных форм молекулы и не только надеждами, которые связаны с ней как с неиссякаемым источником энергии будущего, но и обыкновенным сочетанием своих необыкновенных свойств. Почти все физико-химические свойства воды – исключения в природе. В последние десятилетия путем различных физических воздействий на воду стало возможно получение новых ее физико-химических и других свойств, способных сохраняться достаточное для практического использования время. Получаемую воду стали называть активированной.

Анализ литературных источников, где рассматривается получение активированной воды и ее применение, не прояснил сущности проблем, а наоборот, поставил целый ряд вопросов, требующих своего решения. Специфика определенного круга задач, связанных с применением кавитации при воздействии на различные жидкости, влияющие на развитие жизни (как растительной, так и белковой), обуславливает необходимость образования специального направления в гидромеханике. Объединение гидромеханики и биологии в целостное самостоятельное направление – кавитационную биомеханику – это единственный путь решения, который принесет радикальные результаты для науки и техники, позволит резко интенсифицировать ряд процессов в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и т. д.

В этой связи сформулируем некоторые основные (или первоочередные) задачи кавитационной биомеханики:

1) систематизация и обобщение накопленных научных знаний на базе критического анализа результатов имеющихся исследований;

2) разработка и развитие теоретических и экспериментальных методов активации воды и водных систем;

3) оптимизация способов повышения биологической активности на единой методологической основе;

4) фундаментальное исследование изменений физико-химических свойств и молекулярных структур жидкостей при кавитации;

5) определение реологических свойств многофазных сред и межфазного взаимодействия (сил инерционной и вихревой природы, тепломассообмена, влияние стефановского потока и т. п.);

6) установление кинетических уравнений о связи параметров воздействия с технологическими показателями конкретного производства;

7) разработка математических моделей и пакетов прикладных программ для расчета сложных кавитационных течений в различных аппаратах, процессах и технологиях;

8) разработка и создание новых технологий, аппаратов и машин, работающих на кавитирующих или кипящих жидкостях;

9) разработка экологически чистых биостимуляторов роста сельскохозяйственных культур и животных, усиления обменных процессов и жизнедеятельности человека; исследование с целью использования их в медицине и фармакологии;

10) разработка экологических мероприятий по рекультивации земель и восстановлению жизнедеятельности в водоемах и др.

Создание нового направления – кавитационной биомеханики – позволит объединить научно-исследовательские силы в рамках единых целей и программ и будет способствовать ускоренному развитию жизненно важных работ.

МЕХАНИЗМ КАВИТАЦИОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫМ ПОТОКОМ

Л. В. Кулагина[1*], К. А. Штым[2] [*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Дальневосточный федеральный университет
690922, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
[*] klvation@gmail.com

Рассмотрены реологические аспекты суперкавитационных потоков в проточной части технологического оборудования на базе феноменологической модели кавитирующей жидкости. Необходимость данного исследования обусловлена развитием основ кавитационных технологий обработки гомогенных и гетерогенных смесей в теплоэнергетике и других отраслях промышленности. Учет реальных свойств потока при проектировании различных механизмов и оборудования, в которых используется кавитация для достижения определенного технологического эффекта, приводит к необходимости использовать такие математические модели движущейся среды, в которых бы учитывалась ее двухфазность.

В последние годы **кавитационные технологии** широко используются во многих промышленных производствах [1–4]. Интенсификация различных теплотехнологических процессов получения многокомпонентных сред (водотопливных смесей в виде эмульсий и суспензий, кондиционирование вод и стоков и др.) происходит за счет воздействия высокоэнергетических полей давлений и температур в результате механохимического воздействия гидродинамической кавитации, реализующей взаимодополняемость и синергию фундаментальных исследований и технических приложений с целью добиться эффекта «1 + 1 > 2». Круг проблем, относящихся к течению двухфазных сред (в данном случае – суперкавитационных потоков), чрезвычайно обширен и включает исследования течения таких систем, как «жидкость–жидкость», «жидкость–твёрдое тело», «жидкость–газ» [5, 6]. Рассматриваемый феномен лежит в основе специфических свойств и связанных с ними явлений, происходящих в воде, подвергнутой механическому (гидродинамическому) воздействию. Модифицированная в результате гидромеханической обработки (или, как называют, активированная) вода способна интенсифицировать примерно на 30 % ряд технологических процессов [7].

Согласно Р. Д. Айвени, вязкость и поверхностное натяжение не влияют на общий характер поведения каверны. Кажущиеся противоречия его результатов детально проанализированы. Результаты последующих работ показывают, что вязкость, входящая в уравнение Навье – Стокса в виде коэффициента динамической вязкости, может быть учтена более или менее удачно. Однако физическая интерпретация этого коэффициента недостаточна. Условимся под частицами жидкости понимать молекулы, надмолекулярные образования, ассоциаты и более крупные образования (как турбулентные вихри). Тогда и кавитационные микропузырьки и микровихри, образующиеся в результате их коллапса, можно ассоциировать с частицами жидкости. Исходя из этого, можно сформулировать следующую феноменологическую модель кавитирующей жидкости (в отсутствии твердых границ потока): кавитационный микропузырек в своей динамике движется в пространстве, структурированном микротурбулентными вихрями, образованными интерференцией волн разрежения-сжатия, возникающих в результате пульсации кавитационных микропузырьков.

Для изотропной среды (стохастически и статистически принимая поля кавитационных микропузырьков изотропной средой), физических констант, выражающих ее свойства, существует связь между тензором напряжений и скоростей деформации в виде соотношения $\Pi = a\dot{S} + bI$, где a и b – скаляры. Скаляр a представляет собой физическую константу, которая из условия совпадения со своим частным случаем, законом жидкостного трения Ньютона, и полагается равной 2μ. Скаляр b может быть линейно связан с П и $\dot{S}$ через их линейные инварианты. С помощью действий альтернирования и симметрирования уравнение движения в напряжениях возможно разбить на два:

$$\nabla_k(\Pi_{ki}) = \nabla_k\left[\frac{1}{2}\rho\left(V_{dk}\dot{S}_{ij}\delta_{rj} + V_{di}\dot{S}_{kj}\delta_{rj}\right)\right] - \nabla_k(\Pi I_{ki}), \tag{1}$$

$$\nabla_k(\Pi_{ki})_* = \nabla_k\left[\frac{1}{2}\rho\left(V_{dk}\dot{S}_{ij}\delta_{rj} + V_{di}\dot{S}_{kj}\delta_{rj}\right)\right] + \rho I_{ijk}\omega_k\delta_{rj}, \tag{2}$$

где V_d – скорость деформации движения; δ_{rj} – элементарный отрезок; ω – угловая скорость.

Первое из этих уравнений характеризует движение сплошной среды в случае «симметричной» гидродинамики, а уравнение (2) – «несимметричной», когда в жидкости присутствуют непрерывно распределенные пары сил. Из уравнения (1) следует новое реологическое уравнение

$$\Pi_{ki} = \rho V_{dk} V_{di} - \Pi I_{ki} = \rho\dot{S}_{kj}\dot{S}_{ij}\left(\delta_{rj}\right)^2 - \Pi_{ki}. \tag{3}$$

Введем обозначение

$$M_{kj} = \frac{1}{2}\rho V_{dk}\delta r_j = \frac{1}{2}\rho\dot{S}_{kj}\left(\delta r_j\right)^2. \tag{4}$$

Размерность тензора M_{kj} совпадает с размерностью коэффициента динамической вязкости. По физическому смыслу M_{kj} описывает внутренний момент импульса элемента жидкости, появляющийся вследствие его деформации при движении. Тогда

$$\Pi_{ki} = \left(M_{kj}\dot{S}_{ij} + M_{kj}\dot{S}_{kj}\right) - \Pi I_{ki} = 2M_{kj}\dot{S}_{ij} - \Pi I_{ki}. \tag{5}$$

При задании тензора напряжений одним из выражений (3) или (5) в уравнении Навье – Стокса дополнительная вязкость как фактор регуляризации проявляется в любом сдвиговом течении (например, введение дополнительной вязкости необходимо для удержания детерминированности процесса, особенно в области больших скоростей).

Решение для случая динамики сферического пузырька с учетом новой постановки задачи привело к более точному совпадению с результатами эксперимента благодаря более точному учету кавитационного сопротивления обтекаемых тел при проектировании суперкавитирующих установок.

Список литературы

1. Радзюк А. С., Истягина Е. Б., Кулагина Л. В., Жуйков А. В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022.* Т. 333. № 9. С. 209–218; DOI 10.18799/24131830/2022/9/3623.

2. Olesya P. Stebeleva, Ludmila V. Kashkina, Andrey V. Minakov, and Olga A. Vshivkova Impact of Hydrodynamic Cavitation on the Properties of Coal-Water Fuel: An Experimental Study [J] // ACS Omega 2022, 7, 37369−37378. doi.org/10.1021/acsomega.2c03979.

3. Кулагин В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: дис. … д-ра техн. наук: 01.04.14, 01.02.05. Красноярск: КГТУ, (2004) 406 р.

4. Kulagina Liudmila, Yenutina Tamara, and Kirillova Irina. Increasing the energy efficiency and environmental safety of the operation of small-volume furnaces by adding a water-fuel mixture and organic components [J] // E3S Web of Conferences **295,** 02002 (2021), (WFSDI 2021); doi.org/10.1051/e3sconf/202129502002.

5. Kulagin V. A., Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Markovich D. M., Shokin Yu. I. Physical and Mathematical Modeling in the Field of High-Velocity Hydrodynamics in the Experimental Base of the Krasnoyarsk Hydroelectric Plant [J] // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2016, Vol. 86, No. 6, 454–465. DOI: 10.1134/S1019331616060034.

6. Yu-Ke Li, Zhi-Ying Zheng, Hong-Na Zhang, Feng-Chen Li, Shi-Zhi Qian, Sang Woo Joo, Ludmila V. Kulagina, Numerical study on secondary flows of viscoelastic fluids in straight ducts: Origin analysis and parametric effects [J] // Computers and Fluids 152 (2017) 57–73, doi: 10.1016/j.compfluid.2017.04.016.

7. Кулагин В. А., Кулагина Т. А., Шеленкова В. В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2019. 12(7). С. 818–829. DOI: 10.17516/1999-494X-0182.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОДЛОЖКИ ПРИ ИСПАРЕНИИ ЧИСТОГО ПАРА С ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

А. Л. Куперштох*, А. В. Альянов, Д. А. Медведев *

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15
* *sknew@mail.ru*

Проведено численное исследование процесса охлаждения подложки в условиях испарения чистого пара с поверхности пленки жидкости. Моделирование такой двухфазной системы выполнялось методом решеточных уравнений Больцмана с учетом теплопроводности вещества и испарения. Использовалось уравнение состояния Ван-дер-Ваальса, описывающее фазовый переход жидкость-пар. При испарении и конденсации учитывалась скрытая теплота фазового перехода. Показано, что процесс зависит от толщины пленки и скорости удаления пара с ее поверхности, что описывается законом Герца – Кнудсена.

Для охлаждения нагретых поверхностей широко используются жидкие пленки и капли. Эффективность такого метода связана с тем, что при испарении поверхность жидкости сильно охлаждается из-за поглощения скрытой теплоты испарения. Вместе с тем процесс испарения связан с параметрами пара вблизи испаряющейся поверхности, т. е. насколько его плотность меньше, чем у насыщенного пара при данной температуре поверхности (закон Герца – Кнудсена) [1–3].

Для моделирования двухфазных систем жидкость-пар успешно применяется метод решеточных уравнений Больцмана (LBE). Течение флюида в методе LBE моделируется ансамблем псевдочастиц, которые переносятся вдоль характеристик между соседними узлами пространственной решетки [4, 5]. Компьютерное моделирование фазовых переходов методом LBE представляет собой метод сквозного счета границ раздела фаз. Вместо разрыва плотности моделируется тонкий переходной слой жидкость-пар, в котором плотность изменяется плавно на масштабах нескольких узлов решетки (аналогично методам сквозного счета ударных волн в газовой динамике). В этом случае жидкая и газообразная фазы описываются единообразно. Для этого вводятся силы, действующие между веществом в соседних узлах решетки (метод псевдопотенциала). Эти силы обеспечивают поверхностное натяжение в тонком переходном слое между фазами, где плотность вещества изменяется сильно. В работах [5, 6] был предложен вариант метода LBE для описания тепломассопереноса в среде с фазовыми переходами. В нем учитывается испарение в соответствии с уравнением состояния флюида, теплопроводность вещества, работа сил давления и теплота фазового перехода. В качестве уравнения состояния для модельной задачи выбрано уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Для плотности, давления и температуры используются приведенные переменные.

Моделирование проводилось для квазиодномерной задачи. В начальном состоянии во всей области задавалась постоянная температура T_0 и скорость u, равная нулю. На поверхности подложки создавалась пленка жидкой фазы, а над ней насыщенный пар (рис. 1, *а*). Затем температура подложки ($y = 0$) скачком увеличивалась $T_{\text{п}} = T_0 + \Delta T$. За счет теплопроводности жидкости пленка начинает прогреваться, плотность жидкости уменьшается, пленка немного расширяется. Пар над пленкой в условиях ограниченного объема сжимается (рис. 1, *б*). Поэтому из-за работы сил давления температура пара несколько увеличивается.

Если теперь на верхней границе области включить отток пара с заданной скоростью u_0, то через некоторое время в одномерном случае устанавливается квазистационарный режим истечения пара. При этом между поверхностью пленки и границей области $y = L$ создается однородный поток пара с постоянной скоростью, плотностью и температурой (рис. 1, *в*).

Поток тепла от нагретой подложки к поверхности пленки жидкости зависит от ее теплопроводности, толщины и перепада температур. Для тонких пленок и относительно высокой теплопроводности жидкости распределение температуры по толщине в квазистационарном режиме испарения пленки примерно линейное (рис. 1, *в*). На поверхности пленки происходит поглощение тепла из-за скрытой теплоты испарения, что приводит к падению температуры флюида при переходе через границу раздела фаз (рис. 1, *в*). В свою очередь, перепад температуры на пленке зависит от скорости испарения жидкости на поверхности, т. е. от скорости оттока пара от пленки. При увеличении скорости оттока пара тепловой поток с подложки увеличивается.

Проведено моделирование, в котором отток пара от испаряющейся пленки осуществляется за счет его конденсации на холодной верхней поверхности.

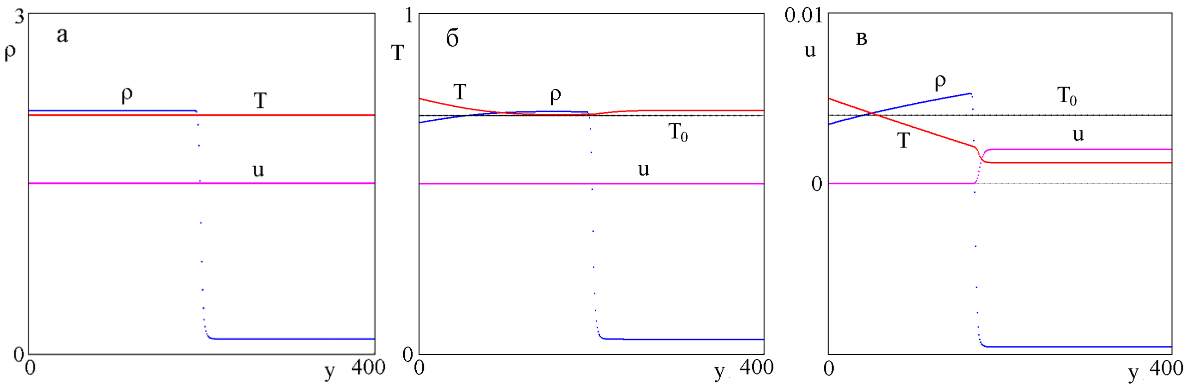


Рис. 1. Моделирование: *а* – начальное состояние, $T_0 = 0.7T_{кр}$, $u = 0$; *б* – включены нагрев подложки $\Delta T = 0.05T_{кр}$ и теплопроводность жидкости; *в* – квазистационарный режим течения при оттоке пара на границе $u_0 = 0.002$. Температура и плотность даны в приведенных переменных

В реальных инженерных конструкциях отток пара от испаряющейся поверхности осуществляется несколькими способами. В простейшем случае пары жидкости уносятся диффузионным способом в окружающем газе. В так называемых тепловых трубках при поступлении пара в специальную секцию с пониженной температурой происходит его конденсация. В другом методе используется поток холодного газа вдоль поверхности протекающей пленки, который уносит испарившийся пар. Известен эффект интенсификации теплообмена при создании контактных линий путем разрыва пленки, так как в окрестности контактной линии толщина жидкости уменьшается, градиент температуры локально увеличивается, суммарный поток тепла возрастает.

Список литературы

1. Hirth J. P., Pound G. M. Condensation and Evaporation. London: Pergamon Press, 195 p., 1963.

2. Kupershtokh A. L. An Evaporation Flux of Pure Vapor in the Method of Lattice Boltzmann Equations // J. of Phys.: Conf. Ser., vol. 2057, art. 012070, 2021.

3. Куперштох А. Л., Альянов А. В. Испарение и конденсация чистого пара на поверхности жидкости в методе решеточных уравнений Больцмана // Вычислительные Методы и Программирование. 2022. Т. 23(4). С. 311–327.

4. McNamara G. R., Zanetti G. Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-gas Automata // Phys. Rev. Lett., vol. 61(20), pp. 2332–2335, 1988.

5. Куперштох А. Л., Медведев Д. А., Грибанов И. И. Моделирование тепломассопереноса в среде с фазовыми переходами методом решеточных уравнений Больцмана // Вычислительные Методы и Программирование. 2014. Т. 15(2). С. 317–328.

6. Kupershtokh A. L., Medvedev D. A., Gribanov I. I. Thermal Lattice Boltzmann Method for Multiphase Flows // Phys. Rev. E, vol. 98(2), art. 023308, 2018.

ДВИЖЕНИЕ ПУЗЫРЕЙ ГАЗА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

П. Д. Лобанов*, Н. А. Прибатурин [*]

Институт теплофизики им С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
* *lobanov@itp.nsc.ru*

Вероятность возникновения аварийной ситуации в парогенераторе реакторной установки на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) приводит к необходимости изучения закономерностей взаимодействия теплоносителя и парогазовой смеси.

В настоящей работе проведено комплексное экспериментальное исследование процесса истечения дисперсной среды в жидкометаллический расплав (свинец, свинец-висмут), с определением параметров формирующихся пузырей газа, скорости их движения и пространственного распределения, эволюции давления и температуры. Для получения более наглядной информации проведена визуализация процесса движения двухфазного потока с использованием скоростной видеосъемки.

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде, состоящем из вертикально расположенного термостатированного рабочего участка, системы подвода газа, датчиков температуры, свободного уровня жидкости, регулирующих элементов. Измерения проводились как в режиме пузырьковой колонны, так и в замкнутом циркуляционном контуре. В зависимости от задачи эксперимента использовались рабочие участки с разным внутренним диаметром 10–30 мм. Температура, при которой в канале находится сплав свинец-висмут, 150–160 ºС, свинец – 400 ºС.

Применение оригинальных методик измерений позволило определить параметры двухфазного потока в расплавленном металле:

– частота генерации пузырей в ТЖМТ при истечении из отверстия;
– скорость движения пузырей в ТЖМТ;
– локальное газосодержание;
– режим течения и гистограммы распределения пузырей по размерам;
– эволюция давления и свободного уровня теплоносителя;
– скорость «захолаживания» металла при истечении в него инертного газа в зависимости от расхода истекающего газа.

На основе полученных данных проведена оценка отрывного диаметра пузырей в жидком металле и его сопоставление с корреляциями, имеющимся в литературе. Показано качественное совпадение отрывного диаметра пузырей в жидком металле со значениями отрывного размера пузырей в воде. Исследованы закономерности поведения свободного уровня теплоносителя при постоянном и импульсном расходе дисперсной фазы, межфазного теплообмена, построены карты режимов течения двухфазного потока с жидкометаллическим теплоносителем.

Параллельно были выполнены расчетные исследования, в которых использовался системный теплогидравлический код HYDRA/IBRAE/LM. Полученные результаты имеют важное значение для уточнения и обоснования модели межфазного взаимодействия жидкий металл – дисперсная фаза.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ, УВЛЕКАЕМОЙ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

А. С. Лобасов[1, 2*], А. В. Минаков[1, 2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[*] perpetuityrs@mail.ru

Разработана математическая модель для прямого численного моделирования тепломассобмена и гидродинамики для течения пленки в проточной испарительной ячейке в условиях сильного испарения и образования сухих пятен, проведены отладочные и тестовые расчеты для определения минимального размера расчетной области, детализации расчетных сеток, временного шага, граничных условий и других численных параметров для получения корректных результатов моделирования процессов тепломассобмена и гидродинамики при кипении жидкости в проточной испарительной ячейке, а также выполнена серия расчетов в трехмерной постановке с использованием методов вычислительной гидродинамики, модели Lee и VoF-метода.

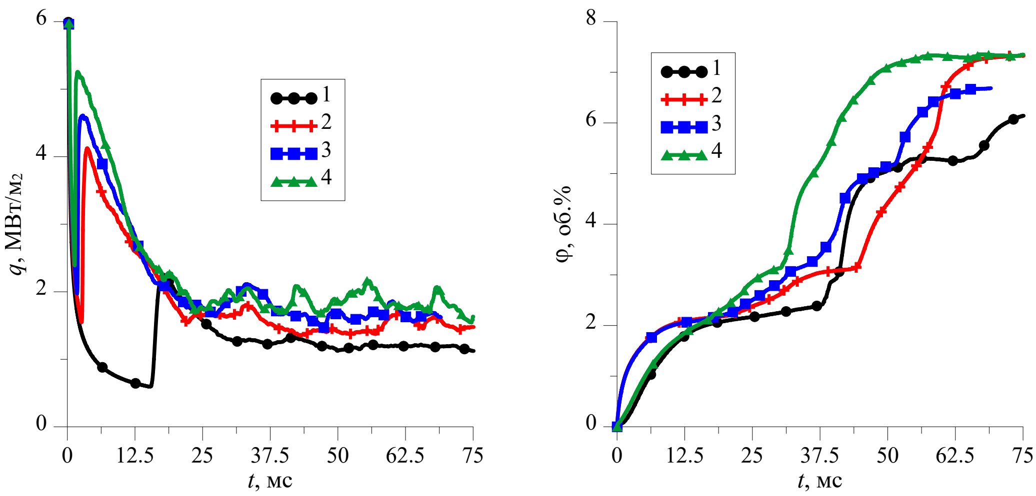
Одной из важнейших проблем теплофизики сегодня является охлаждение микроэлектронного оборудования. Существующие электронные микрочипы выделяют тепловые потоки на уровне 100 Вт/см^2. С развитием микропроцессорной техники тепловые потоки в горячих точках оборудования будут приближаться к 1 000 Вт/см^2 [1]. Поэтому проблема теплоотвода является одной из ключевых в современной электронике и от её решения во многом зависит дальнейший рост производительности микропроцессоров. Традиционные тепловые трубы в сочетании с вентилятором позволяют рассеивать порядка 200 Вт/см^2, что явно недостаточно [2]. В связи с этим широкое распространение получили мини- и микроканальные теплообменники с характерными проточными размерами меньше 1 мм.

В работе была проведена серия расчетов для задачи кипения в испарительной ячейке в трехмерной постановке. На боковых стенках устанавливались периодические граничные условия, таким образом геометрия задачи представляла собой щелевой канал бесконечной ширины. Длина нагревателя была равна 10 мм. На нагревателе задавалась постоянная температура, на входе задавались постоянные значения скоростей воды и воздуха, выход свободный. Все остальные стенки принимались адиабатическими. Было проведено исследование влияния различия в температуре нагревателя, которая варьировалась и была равна 105, 115, 120 и 126 °С. Числа Рейнольдса для воды и воздуха в этом случае были, соответственно, равны $\mathrm{Re}_l = 33{,}2$ и $\mathrm{Re}_g = 912{,}8$. Температуры воздуха и воды на входе были равными 27 °С. Для расчётов использовалась структурированная сетка с общим количеством ячеек порядка 3 млн со сгущением в области нагревателя и канала за нагревателем по ходу движения фаз. Краевой угол смачивания между паром и водой был задан равным 160°. Коэффициент диффузии пара в воздухе был постоянным и равным $2{,}88 \cdot 10^{-5}$ м^2/с. Кроме того, учитывалось наличие силы тяжести, вектор которой направлен от верхней стенки вниз к нагревателю.

В качестве основного подхода к решению поставленных задач используются методы вычислительной гидродинамики (CFD). Для описания течения многокомпонентных жидкостей используется гидродинамический подход. В рамках этого подхода микротечения моделируются посредством решения системы уравнений Навье – Стокса.

Для определения скорости массопереноса используется модель Lee. Испарение воды и прорыв пузырьками пара плёнки на границе раздела воды и воздуха моделировалось с помощью VoF-метода, при этом использовалась квазидвухфазная модель, в которой одной фазой являлась вода, а второй – паровоздушная смесь.

В результате расчётов были получены как качественные картины движения жидкости и газов и процессов фазового перехода, прорыва плёнки пузырями пара, распад плёнки, образование сухих пятен и их замывание, так и количественные значения плотности теплового потока на нагревателе, а также объёмной доли пара. Полученная зависимость плотности теплового потока на нагревателе от времени для различных значений температуры на поверхности нагревателя и чисел Рейнольдса (рис. 1, *а*) показывает, что с ростом температуры нагревателя увеличивается и значение плотности теплового потока, что очевидно. Кроме того, плотность теплового потока больше для больших чисел Рейнольдса, что также не должно вызывать сомнений. При этом колебания графика зависимости плотности теплового потока от времени соответствуют изменению толщины жидкой плёнки над нагревателем за счёт возникновения и эволюции волн на поверхности этой плёнки и сухих пятен на поверхности нагревателя. Также были получены зависимости от времени объёмных концентраций пара в испарительном канале для рассмотренных температур нагревателя и чисел Рейнольдса (рис. 1, *б*). Видно, что эти зависимости существенно нелинейны, они показывают эволюцию паровых пузырей.



а б

Рис. 1. Зависимость от времени плотности теплового потока на нагревателе (а) и объёмной концентрации пара (б) при различной $t_н$:
1 – 105°C; 2 – 115°C; 3 – 120°C; 4 – 126°C. $Re_l = 33{,}2$, $Re_g = 912{,}8$

В результате проведенного численного исследования были получены качественные картины формирования пузырей пара, эволюции поверхности жидкой плёнки и образования на ней различных волн, а также динамики появления, развития и замывания сухих пятен на поверхности нагревателя. Было показано, что при одинаковых числах Рейнольдса с ростом температуры нагревателя увеличивается количество как сухих пятен, так и волн на поверхности жидкой плёнки, при этом промежуток времени между появлениями сухих пятен уменьшается. Кроме того, на динамику процесса влияют и числа Рейнольдса. Было показано, что с увеличением скорости движения фаз количество сухих пятен на поверхности нагревателя уменьшается, а пузырьков пара – увеличивается. Это приводит к образованию более мелких волн на поверхности плёнки.

Кроме того, резкий скачок плотности теплового потока, предположительно, связан с началом процесса образования пузырьков пара, а причинами появления пульсаций плотности теплового потока от времени является появление и замывание сухих пятен, а также изменение общей толщины паровой плёнки, что нашло некоторое подтверждение при анализе полученных картин формы свободной поверхности жидкой плёнки.

Исследование поддержано РНФ № 19-19-00695.

Список литературы

1. Bar-Cohen K. A., Wang P. Thermal Management of On-Chip Hot Spots // J. Heat Transfer, vol. 134, art. № 051017, 2012.

2. Kraus A., Bar-Cohen K. A. and Wative A. A. "Cooling electric equipment" in vol. 4 of Mechanical Engineers Handbook (Wiley, Chichester, 2015), Sec. 1. Ch. 12, pp. 451–499.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДАЧИ ВОЗДУХА НА ВИХРЕВУЮ СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

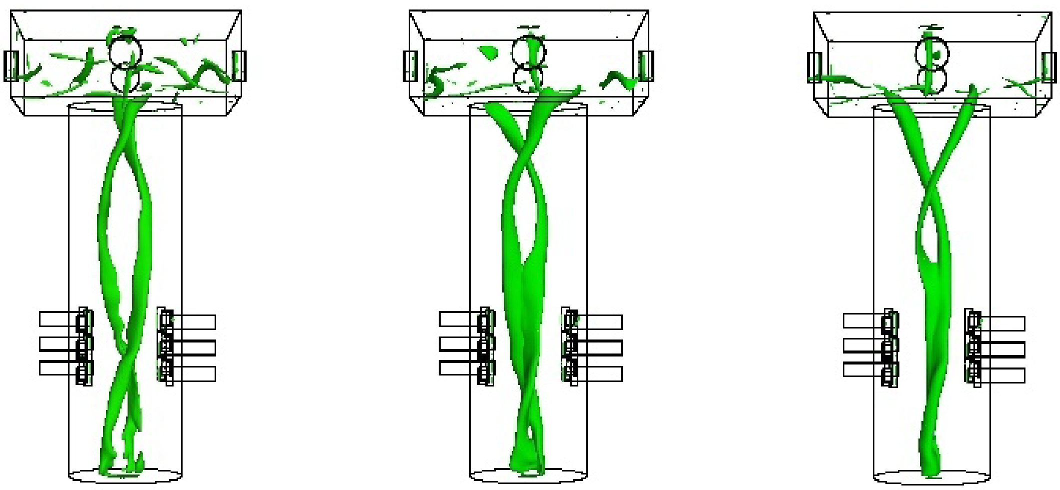
Д. В. Платонов[1, 2⁑], А. В. Сентябов[1, 2], А. В. Минаков[1, 2], С. И. Шторк[2 *]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
⁑ platonov-08@yandex.ru

В работе выполнено численное моделирование турбулентного вихревого течения в модельной тангенциальной камере. В зависимости от соотношения закрутки потока и расхода воды в камере наблюдаются различные режимы течения: колоннообразный вихрь, спиральный вихрь, двойной спиральный вихрь. В работе проведено исследование добавления воздуха для управления переходом между режимами течения. Показано, что при добавлении второй фазы происходит скачкообразный переход от двухспиральной структуры к одиночному спиральному вихрю. Данное явления полностью воспроизводит эффект, наблюдаемый в эксперименте.

Тангенциальная вихревая камера является одним из удобных объектов для изучения разнообразных вихревых структур. В камере прямоугольного сечения наблюдали различные режимы течения, такие как колоннообразный вихрь, спиральный вихрь и двойной спиральный вихрь [1]. В других экспериментальных работах переход между одиночным и двойным спиральным вихрем изучался в подобной камере круглого сечения [2, 3]. Изучались возможности и методы управления переходами между режимами, в том числе добавлением в поток газовой фазы. На основе последних исследований в данной работе было проведено численное моделирование влияния подачи воздуха на вихревую структуру турбулентного закрученного течения в цилиндрической тангенциальной камере.

Расчеты двухфазного течения в вихревой камере с помощью модели смеси (Mixture model) в этом режиме не показали влияния газовой фазы на характер течения. В режиме закрутки $S = 9.9$ в тангенциальной камере формировалась устойчивая двухспиральная вихревая структура. Газовая фаза в данных расчетах не концентрировалась в центрах вихрей (как известно из эксперимента), что показывает ограниченность модели Mixture для описания многофазного течения в условиях данной тангенциальной вихревой камеры. По этой причине для расчета многофазного течения была рассмотрена полная Эйлерова модель (Euler model), которая позволяет точнее определять скорость второй фазы относительно несущей. Использование полной Эйлеровой модели показало, что пузырьки воздуха хорошо отслеживают положение веток двухспиральной вихревой структуры, как и наблюдается в эксперименте. По мере нестационарного расчета двухспиральная вихревая структура постепенно вырождается в одиночный вихрь, причем это происходит постепенно по мере сближения и слияния веток двухспиральной структуры, происходящее снизу-вверх (рис. 1).



t = 0,13 с t = 0,39 с t = 0,65 с

Рис. 1. Режим S = 9.9, расчеты с воздухом (модель Euler, концентрация 5 %, дисперсность 2 мм), изоповерхность (f = 0.05) объемной доли газовой фазы в разные моменты времени

В результате проведения расчётов удалось воспроизвести эффект скачкообразного перехода от двухспиральной структуры к одиночному спиральному вихрю при добавлении воздуха в закрученный поток. Данное явление, полученное численно, полностью соотносится с таким же эффектом, ранее полученным на экспериментальном стенде в Институте теплофизики.

Исследование поддержано РНФ № 21-19-00769.

Список литературы

1. Alekseenko S. V., Kuibin P. A. and Okulov V. L. Theory of concentrated vortices. An introduction. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.

2. Dremov S. V., Shtork S. I., Skripkin S. G., and Kabardin I. K. An experimental investigation of the interaction between a pair of precessing vortices in a tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 754 (2016) 022003. doi:10.1088/1742-6596/754/2/022003.

3. Skripkin S. G., Dremov S. V., and Shtork S. I. Applying phase averaging technique to analysis of unsteady twin vortex structure observed in tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012042. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012042.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРЯМОТОЧНОГО КАВИТАЦИОННОГО ОПРЕСНИТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Ю. Радзюк*

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

Описан принцип действия и конструкция прямоточного кавитационного опреснительного аппарата. Приведены примеры получаемых результатов измерений и оценка производительности экспериментальной установки.

Экспериментальная установка, представляющая собой двухконтурный кавитационный аппарат, спроектирована на основе данных, полученных ранее [1, 2]. Анализ этих данных позволил определить конструктивные и режимные параметры, влияющие на количество пара, которое можно отобрать или сконденсировать в кавитационной суперкаверне.

В результате обтекания полого конуса, установленного на трубе в испарительном контуре установки, образуется паровая каверна. Пар из этой каверны по паропроводу передается к аналогичному второму конусу, находящемуся в конденсационном контуре, где конденсируется при более низкой температуре. Движение пара становится возможным благодаря разности давлений в кавернах, возникающей из-за разности температур потоков в испарительном и конденсационном контуре. В результате процесса парообразования испарительный контур теряет количество тепла, равное произведению величины скрытой теплоты парообразования на массовый расход пара, а конденсационный контур это же количество тепла получает. Для рекуперации этой энергии в установке используется тепловой насос, испаритель которого нагревается водой, циркулирующей в конденсационном контуре, а конденсатор охлаждается водой испарительного контура. Внешний вид созданной установки приведен на рис. 1.

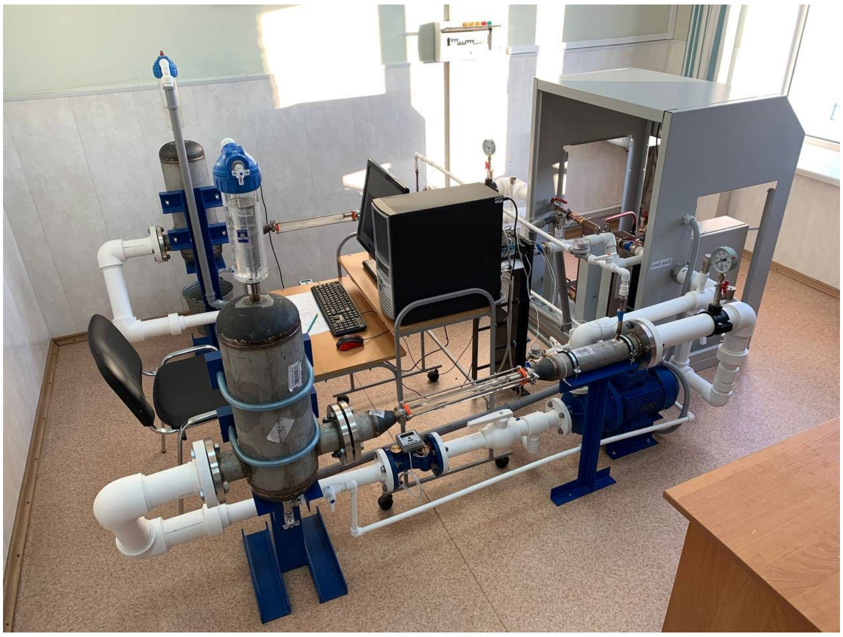
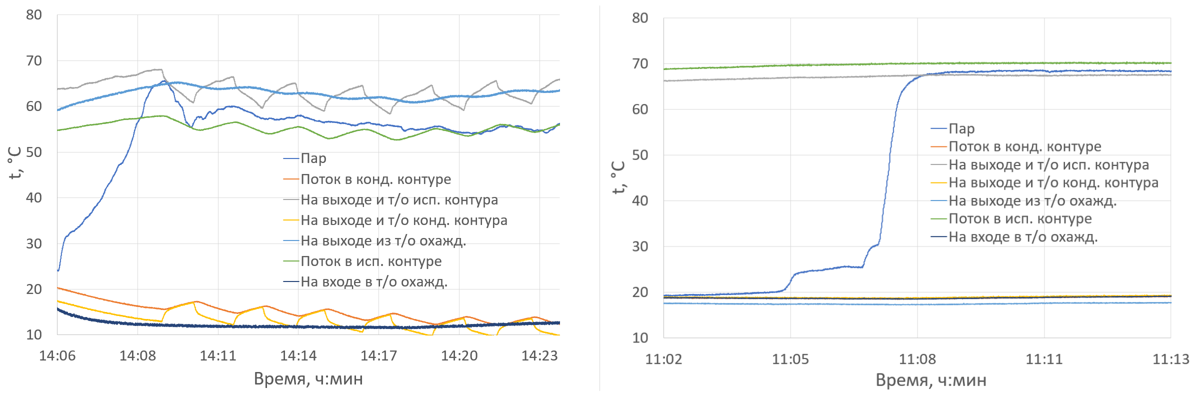


Рис. 1. Внешний вид кавитационной опреснительной установки

Помимо теплоты, связанной с процессом парообразования и конденсации, оба циркуляционных контура нагреваются вследствие работы насосов. В испарительном контуре эта теплота расходуется в процессе парообразования, а от конденсационного контура должна быть отведена. Для отвода этого тепла в описываемой установке используется дополнительный пластинчатый теплообменник, охлаждаемый водопроводной водой.

Циркуляция воды обеспечивается двумя насосными агрегатами КМ-50-32-154 с номинальной производительность 25 м^3/ч, рекуперация теплоты осуществляется тепловым насосом TH-ZH40-R134a тепловой мощностью 19,5 кВт, изготовленном компанией «Промышленные холодильные системы» (г. Железнодорожный Московской области). Расход воды в циркуляционных контурах определяется ультразвуковыми расходомерами «Пульсар». Для регистрации изменения температуры используется семь термопар типа К, подключенных через клеммный адаптер Advantech PCLD-8710 к многофункциональной плате сбора данных Advantech PCI-1710. Получаемые от термопар данные выводятся на графический монитор и передаются в Excel программой на LabView. Примеры получаемых результатов измерений приведены на рис. 2.



а б

Рис. 2. Графики изменения температуры: *а* – с включенным тепловым насосом; *б* – без запуска теплового насоса

Полученная в первых опытах производительность установки по количеству конденсата составила около 1,7 л/ч, что соответствует тепловой мощности 1,1 кВт. Скорость пара в паропроводе при этом составила около 30 м/с, хотя при данных температурах по предварительным оценкам должна быть примерно в пять раз больше. Это может быть связано в первую очередь с присосами воздуха в пар, находящийся при субатмосферном давлении.

Таким образом, описываемая экспериментальная установка наглядно продемонстрировала практическую возможность использования кавитационных явлений в процессе опреснения. Дальнейший план работ подразумевает процесс отладки оборудования и выход на заложенную при проектировании производительность.

Список литературы

1. Радзюк А. Ю., Кулагин В. А., Истягина Е. Б., Пьяных Т. А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 4. С. 468–475. DOI 10.17516/1999-494X-0155.

2. Radzyuk A. Yu., Istyagina E. B., Kulagin V. A., Pianykh T. A. Determination of modes of operation and productivity of the direct-flow cavitation desalination unit. URL:https://www.researchgate.net (дата обращения: 16.02.2022). DOI: 10.13140/RG.2.2. 20395.72486.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НА АГЛОМЕРАЦИЮ И РАЗДЕЛЕНИЕ КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИЙ ПРИ ИХ СОУДАРЕНИЯХ

П. П. Ткаченко*, А. Г. Исламова,
Н. Е. Шлегель, П. А. Стрижак*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
* *tkachenko_pavel_1996@mail.ru*

Экспериментально исследовано влияние концентрации, размеров частиц и исходных капель, содержащих твердые частицы, на характеристики процессов их соударения в газовой среде. Рассмотрены капли жидкости, содержащие частицы каменного угля размерами 60–120 мкм и микросферы стекла МС-ВП-А9 размерами 20–120 мкм. Концентрация частиц варьировалась от 0,01 до 1 %. Зарегистрированы важные закономерности столкновения капель низкоконцентрированных суспензий. Установлены четыре режима соударения капель: отскок, коагуляция, разлет и дробление. Определены характеристики вторичных жидкостных фрагментов: количество и размеры. Построены карты режимов взаимодействия капель, содержащих угольные частицы, при значениях числа Вебера от 0 до 100.

Проблема пылеулавливания при добыче полезных ископаемых открытым и шахтным способами остается довольно острой [1]. Традиционные циклонные фильтры и золоуловители имеют степень очистки проходящих газов около 0,85–0,9 [2, 3]. Использование трубы Вентури повышает степень очистки до 0,98–0,99 [4, 5]. Известные результаты исследований характеристик соударений капель с твердыми частицами не позволяют достоверно прогнозировать последствия столкновений капель, содержащих твердые частицы, между собой. Капли суспензий представляют неустойчивые структуры в процессе полета как до соударения между собой, так и после. Это стало мотивацией настоящего исследования.

В качестве базовых жидкостей при проведении экспериментов использовались суспензии стеклянных микросфер МС-ВП-А9 размерами частиц R_p = 20–160 мкм и каменного тощего угля (марка «Т») с фракционным составом R_p = 60–80 мкм. Концентрация твердых частиц в суспензии варьировалась в диапазоне от 0,01 до 1 %. Основной жидкостью, в которой размешивались угольные частицы, являлась дистиллированная вода. Так как концентрация твердых частиц в суспензии крайне мала, они не оказывали существенное влияние на свойства составов.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Жидкости подавались в сопла из шприцов объемом, установленных в шприцевом насосе. Процесс соударения капель регистрировался высокоскоростной видеокамерой Photron mini UX100 с объективами Nikon ED AF Micro Nikkor 100 mm и AF-S NIKKOR 200 mm f/5.6E ED VR.

Карта B(We) для суспензий с разными концентрациями и размерами частиц иллюстрирует достаточно существенные отклонения относительно опытов с водой (рис. 2). Этот результат демонстрирует один из способов существенного изменения условий реализации режимов соударений капель при варьировании концентраций и тонины помола твердых частиц. Чем выше концентрация последних в составе капель, тем заметнее их трансформация и смещение границ перехода к дроблению в область пониженных значений We.

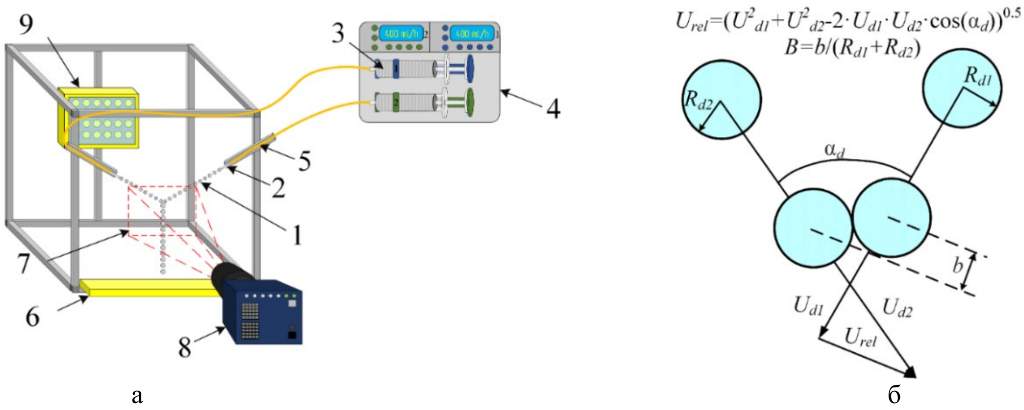


Рис. 1. Схемы стенда с основными элементами (*а*) и регистрации характеристик соударения капель (*б*): *1* – капли, содержащие твердые частицы; *2* – сменные сопла различного диаметра; *3* – шприц с жидкостью; *4* – шприцевой насос; *5* – силиконовые трубки; *6* – емкость для сбора жидкости; *7* – область регистрации; *8* – высокоскоростная видеокамера; *9* – диодный прожектор

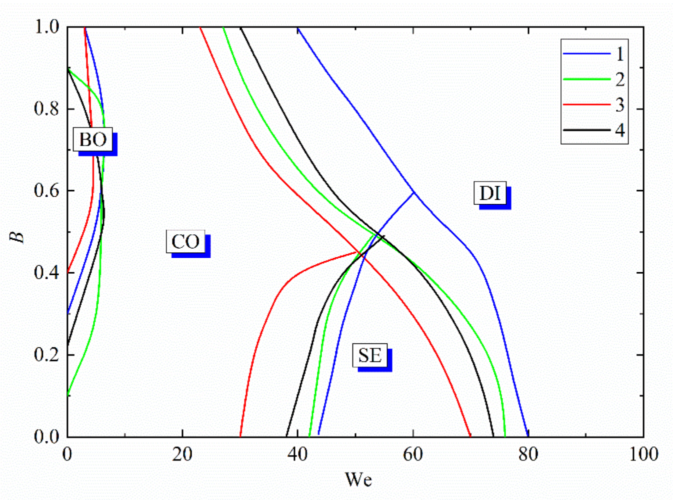


Рис. 2. Карта режимов взаимодействия капель, содержащих твердые частицы, между собой в системе B(We): *1* – вода R_d=0,4 мм; *2* – суспензия угля c_p = 0,1 мас%, размер частиц R_p = 60 мкм R_d=0,4 мм; *3* – суспензия угля c_p = 0,5 мас%, размер частиц R_p = 60 мкм R_d=0,4 мм; *4* – суспензия угля c_p = 0,5 мас%, размер частиц R_p = 120 мкм R_d=0,4 мм

Установлено, что при повышении концентрации твердых частиц в исследованных составах снижаются критические числа Вебера для всех режимов. Снижение $\mathrm{We_{cr}}$ составило от 12 до 18 % при изменении концентрации твердых частиц от 0,01 мас% до 1 мас%.

Исследование поддержано грантом РНФ №18-71-10002-П.

Список литературы

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. 2022. Vol. 399. P. 117135.

2. Vaziri Naeen Nejad J., Kheradmand S. The effect of arrangement in multi-cyclone filters on performance and the uniformity of fluid and particle flow distribution // Powder Technol. 2022. Vol. 399. P. 117191.

3. Graham E. M. и др. Vertically installed Venturi tubes for wet-gas flow measurement: Possible improvements to ISO/TR 11583 to extend its range of applicability // Flow Meas. Instrum. 2020. Vol. 74. P. 101757.

4. Xu S. et al. Experiment on flow dynamics and cavitation structure in an axisymmetric venturi tube based on x-t diagrams and proper orthogonal decomposition // Exp. Therm. Fluid Sci. 2022. Vol. 136. P. 110648.

5. Zhang Z. et al. Experimental and numerical study of a gas cyclone with a central filter // Particuology. 2022. Vol. 63. P. 47–59.

КИНЕТИКА ОБЪЕМНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО РАСПЛАВА: ЭФФЕКТ ИСКЛЮЧЕННОГО ОБЪЕМА

А. А. Чернов*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
chernov@itp.nsc.ru

Предложена модель объемной кристаллизации расплава, быстро приведенного в переохлажденное состояние, корректно учитывающая изменение степени метастабильности материнской фазы в процессе зарождения и роста центров кристаллизации. Отличительной особенностью модели является выделение в объеме кристаллизующегося расплава «исключенного объема» – прогретых областей вокруг растущих кристаллов, нуклеация новых зародышей в котором подавлена.

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 – 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, конечно же, 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 исследуются теплофизические аспекты роста кристалла в расплаве, быстро приведенном в переохлажденное состояние. Получено аналитическое решение для скорости роста кристалла, справедливое в широком диапазоне переохлаждений и на всех стадиях процесса. Показано, что на больших временах рост кристалла определяется исключительно теплоотдачей от межфазной поверхности, а решение задачи становится автомодельным.

Разработана модель, описывающая кинетику суммарного превращения – процесса нуклеации и роста ансамбля зародышей в переохлажденном расплаве. В общей форме вероятностное решение задачи о времени «изотермической» кристаллизации образца (в предположении о постоянстве частоты нуклеации и скорости роста кристаллов) впервые было получено Колмогоровым. Однако теория, построенная в предположении об изотермичности процесса, может быть использована только в качестве нулевого приближения. Для более точного описания кинетики фазового превращения необходимо учитывать изменение степени метастабильности материнской фазы при образовании и росте центров новой фазы. Это может быть сделано, например, следующим образом.

Выделяющееся в процессе фазового перехода тепло равномерно распределяется по всему объему расплава. Тем самым полагается, что температурное поле в расплаве однородно, но не стационарно. По мере роста кристаллической фазы переохлаждение расплава уменьшается, что приводит к быстрому уменьшению частоты нуклеации и, как следствие, к прекращению нуклеации новых зародышей. Такой подход хоть и является наглядным, но может привести к существенной ошибке.

Это связано с тем, что температурное поле в расплаве в реальных процессах кристаллизации существенно неоднородно. Чтобы учесть этот факт, в настоящей работе используется подход, предложенный в работах [2, 3]. Надо отметить, что он применяется и для других физических систем, где протекает интенсивный фазовый переход (например, см. [4, 5]).

Суть данного подхода заключается в следующем. Вследствие того, что вокруг кристаллов в процессе их роста формируется температурный пограничный слой (область прогретого расплава), вероятность зарождения новых центров кристаллизации вблизи уже существующих значительно меньше, чем вдали от них. Это связано с экспоненциально сильной зависимостью частоты нуклеации от переохлаждения, а вблизи кристаллов переохлаждение расплава значительно меньше, чем вдали от них. Этот факт можно учесть в кинетических уравнениях, описывающих процесс суммарного превращения, путем выделения в расплаве «исключенного» объема – суммарного объема формирующихся вокруг кристаллов в процессе их роста «запрещенных» областей, зарождения новых центров кристаллизации в которых не происходит. В отличии от предыдущих работ автора [2, 3], в настоящей работе учтен эффект перекрытия данных «запрещенных» областей, который существенен на стадии, когда доля кристаллической фазы в объеме образца уже достаточно велика. Кроме того, в модели учтен эффект усадки расплава при затвердевании.

Таким образом, предложена кинетическая модель объемной кристаллизации расплава, быстро приведенного в переохлажденное состояние (как при мгновенном, так и при постепенном создании переохлажденного состояния), которая позволяет найти как характерное время стадии нуклеации, что само по себе является нетривиальной задачей, и в классических работах никак не решается, так и конечное число образующихся центров кристаллизации, что дает возможность определить морфологию затвердевшего материала.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт с ИТ СО РАН).

Список литературы

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, vol. 102(8), pp. 526–529, 2015.

2. Chernov A. A. Theory of volumetric crystallization of the undercooled melt // International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52(13-14), pp. 3290–3296, 2009.

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, vol. 450, pp. 45-49, 2016.

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, vol. 11, pp. 116602, 2014.

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, vol. 468, pp. 228–237, 2017.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ПОДВЕШЕННОЙ КАПЛИ ВОДЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ СЛАБОТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАНАЛОМ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

И. А. Шорсткий*

Лаборатория передовых электрофизических технологий и новых материалов
Кубанский государственный технологический университет
660074, Российская Федерация, Краснодар, ул. Московская, 2
thegector@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процесса испарения подвешенной капли дистиллированной воды при обтекании слаботочным плазменным каналом искрового разряда. Капли испарялись от нагрева источником термоэлектронной эмиссии. Получены зависимости скорости испарения и потери массы капель воды от времени, а также кривая нагрева температуры с использованием ИК-термометрии. Установлено, что наличие искрового разряда способствует ускорению испарения на 35 %.

Изучение процессов испарения жидких капель имеет большое практическое значение при разработке и проектировании устройств и технологий многих отраслей промышленности. Кроме практического интереса, экспериментальные данные важны для решения задач моделирования процессов испарения, управления такими процессами и выявлением особенностей и эффектов.

Широкое распространение газовых разрядов в производстве способствовало развитию ряда электрических эффектов, возникающих при нахождении жидкой капли воды в межэлектродном пространстве. В данной работе исследуется случай, когда слаботочный плазменный канал искрового разряда обтекает каплю воды, интенсифицируя процесс испарения.

Экспериментальная часть работы была реализована с использованием опытной установки по генерации искровых разрядов атмосферного давления на базе высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20 (Matsusada Precision Inc, Japan). Контроль характеристик разряда проводили с использованием осциллографа через выход monitor высоковольтного усилителя.

Анализ процесса испарения капли воды проводили весовым методом с использованием электронных весов. Величину температуры капли воды регистрировали методами ИК-термометрии с использованием пирометра RGK pl-8.

Изображение подвешенной капли воды при обтекании плазменным каналом искрового разряда экспериментальной установки представлено на рис. 1. Экспериментально установлено, что для искрового разряда характерно одностороннее обтекание капли воды. Плазменный канал ярко-белого свечения поступает на каплю воды и далее движется в сторону катода.

Результаты испарения капли воды представлены на рис. 2. Зависимость потери массы воды от времени испарения протекает в двух стадиях: стадия прогрева в течение первых 100 секунд и стадия постоянной скорости сушки до полного высыхания капли воды.

Кривые среднеобъёмной температуры для опытов без искрового разряда и с обработкой представлены на рис. 2. На температурной кривой наблюдается участок переходного периода с последующим установлением равновесной температуры. Для капли воды, подвешенной на каркасе без воздействия искрового разряда, время испарения составило 755 секунд. Для капли воды с воздействием на нее искрового разряда процесс испарения прошёл на 35 % быстрее.

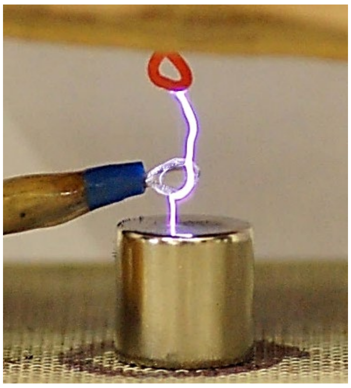


Рис. 1. Подвешенная капля воды при обтекании слаботочным плазменным каналом искрового разряда экспериментальной установки

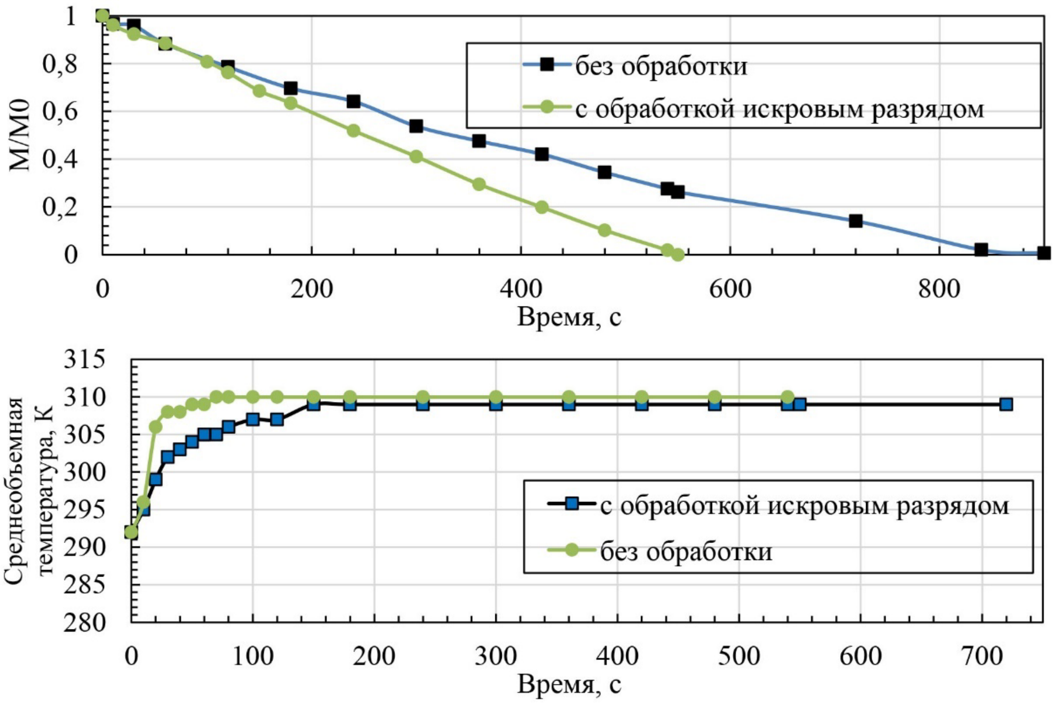


Рис. 2. Кривая изменения массы капли воды и среднеобъёмной температуры, подвешенной капли воды при обтекании слаботочным плазменным каналом искрового разряда и без

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/42.

Список литературы

1. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A. A Continuum Method for Modeling Surface Tension // J. Comput. Phys., vol. 100, pp. 335–354, 1992.

2. Berger M. J., Colella P. Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics // J. Comput. Phys., vol. 82(1), pp. 64–84, 1989.

3. Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots / ed. A. L. Rogach. NewYork: Springer WienNewYork, 372 p., 2008.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕВОМ КАВИТАТОРЕ

Е. А. Шувалов[1*], С. В. Веретенников[2],
С. А. Мешков[1], Ю. Н. Саблюков[2] *

[1]Рыбинский государственный авиационный технический университет
152934, Российская Федерация, Рыбинск, ул. Пушкина, 53
[2]ООО «КАВИДЖЕНИКА»
109559, Российская Федерация, Москва, б-р Тихорецкий, 1
[*] shuvalov180799@mail.ru

Статья посвящена исследованию структуры потока несжимаемой жидкости в вихревых устройствах. Показано, что не на всех исследуемых режимах возможно зарождение кавитации. Был выполнен анализ результатов визуализации и численного моделирования в вихревом кавитаторе. Автор делает вывод, что чем больше расход на периферийном выходе, тем меньше расстояние, на которое образовавшаяся паровая полость может выйти из области соплового ввода.

При эксплуатации технических устройств с применением воды как рабочего тела возникает проблема постепенного ее загрязнения механическими примесями, солями, металлами и микроорганизмами. Этот фактор заставляет многие предприятия разрабатывать сложные системы водоотведения сточных вод и закупать химические реагенты для их очистки, что существенно сказывается на повышении затрачиваемых средств и упущение потенциала отработанной воды.

Решение проблемы может быть реализовано за счет применения вихревого устройства как водоочистительной установки [1]. В закрученном потоке в вихревом устройстве образуются полости, наполненные газом. Такое явление возникает за счет локального понижения статического давления в приосевой области вихревой камеры. Эффект кавитации, образующийся в данном устройстве, позволит не только очищать отработанную воду без использования химических реагентов, но и применять уже очищенную несжимаемую жидкость в системах отопления.

Проводимые исследования могут не только способствовать более глубокому пониманию протекающих кавитационных процессов в вихревых устройствах, но и позволят в дальнейшем расчетным способом искать более эффективные конструктивные реализации вихревого кавитатора.

Цель настоящей работы заключается в определении режимов работы вихревого кавитатора, позволяющих организовать в приосевой области кавитационные процессы.

Эксперимент проводился на базе оборудования ООО «КАВИДЖЕНИКА». Объектом исследования применялся вихревой кавитатор, использующий воду в качестве рабочего тела. В экспериментальную установку включаются: корпус с закручивающим устройством, присоединенным к нему; вихревая камера с выходным патрубком с крестовиной и с выходным патрубком за диафрагмой; центробежный насос и подводящие трубопроводы из ПВХ. Поток воды поступает в закручивающее устройство, встроенное в корпус, через тангенциальный ввод. В каждом корпусе находятся выходные патрубки с установленными на них электромагнитными расходомерами, а также датчиками давления и температуры.

Для успешной визуализации процессов кавитации были выбраны зоны исследования с наиболее вероятным зарождением кавитационных полостей. Это часть верхнего выходного патрубка и вихревая камера с относительным диаметром диафрагмы 0,81 и длиной в 16 калибров.

Метод визуализации возможен при использовании высокоскоростной камеры EVERCAM 4000 – 8 – C с памятью 8 ГБ и с максимальным разрешением 1280 × 800 пикселей. Время видеоматериала варьируется в переделах 1 секунды при частоте съемки 18 700 к/с.

Определяющим параметром является число Рейнольдса, определяемое по средней расходной скорости на входе в тангенциальный подвод и диаметру вихревой камеры:

$$Re = \frac{w \cdot d}{v}.$$

Режимы проведения испытаний сведены в табл. 1. В ходе испытаний варьировалось давление на входе в вихревую трубу, а также регулировалось соотношение расходов воды μ, выходящей через диафрагму и через крестовину. Полученные результаты давления и объемной доли воды для различных режимов представлены на рис. 1–3.

Таблица 1

Расчетные режимы эксперимента

Режим	P_1, МПа	Число Рейнольдса Re	Относительная доля охлажденного потока μ
Режим 1	0,89	12938	0,019
Режим 2	1,18	10853	1
Режим 3	1,18	12478	0,964

Рис. 1. Структура потока в патрубке за диафрагмой вихревой камеры на режиме 1

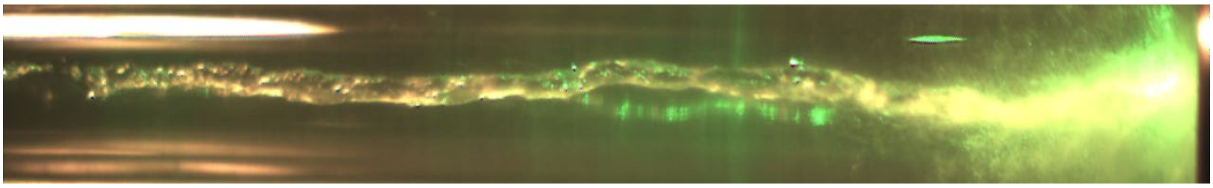


Рис. 2. Структура потока в патрубке за диафрагмой вихревой камеры на режиме 2

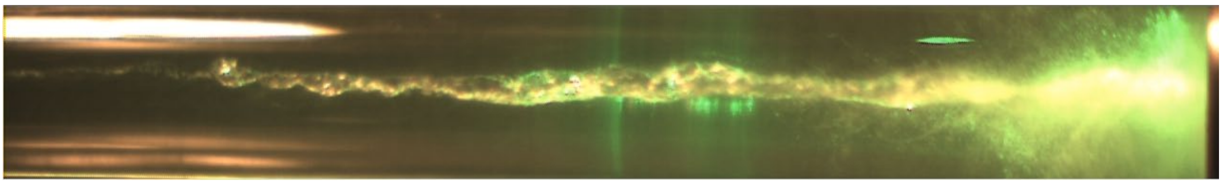


Рис. 3. Структура потока в патрубке за диафрагмой вихревой камеры на режиме 3

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что существует явная зависимость между длиной приосевой зоны в верхнем патрубке и соотношением расходов. Проанализировав результаты (рис. 1–3), можно заметить, что чем больше расход на периферийном выходе, тем меньше расстояние, на которое образовавшаяся паровая полость может выйти из области соплового ввода, вплоть до полного отсутствия зарождения кавитации.

Полученные результаты показали, что не на всех исследованных режимах возможно формирование кавитационной полости. Дальнейшие исследования требуют верификации полученных результатов с численными расчетами выполненные на тех же расчетных режимах, что позволит расчетным способом искать более эффективные конструктивные реализации вихревого кавитатора.

Список литературы

1. Caupin F., Herbert E. Cavitation in water: a review // C.R. Physique vol. 7, pp. 1000–1017, 2006.

Секция 7
«Гидродинамика и теплофизика в задачах нефтегазовой индустрии»

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ТЕСТА СО СТУПЕНЧАТЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ В НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ С САМОПРОИЗВОЛЬНЫМ РАЗВИТИЕМ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП

Э. М. Адельгужина[1,2‡], А. Я. Давлетбаев[1,2 *]

[1]ООО «РН-БашНИПИнефть»
450006, Российская Федерация, Уфа, ул. Ленина, 86/1
[2]Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, 32
[‡] em.adel99@mail.ru

Одним из способов определения продуктивности/приемистости скважин является проведение нагнетательных тестов со ступенчатым изменением давления/расхода в нескольких стадиях, которые интерпретируются методом построения индикаторной диаграммы. При проведении таких нагнетательных тестов давление закачки жидкости в скважину, как правило, превышает минимальные смыкающие напряжения в пласте, вследствие чего проявляется эффект самопроизвольного развития трещины (автоГРП). Для решения задачи по выбору наилучшего метода оценки минимального горизонтального напряжения проведено численное моделирование работы нагнетательной скважины со ступенчатым изменением давления закачки на режимах выше и ниже давления смыкания трещины автоГРП.

Эффект самопроизвольного развития трещины в нагнетательных скважинах удается диагностировать путем проведения ступенчатых нагнетательных тестов с давлениями закачки жидкости в скважину выше и ниже минимального смыкающего напряжения. В результате выполнения промысловых исследований, как правило, реализуются различные сценарии, которые могут повлиять на достоверность оценки давления смыкания трещины автоГРП. В рамках данной работы выполнено моделирование нелинейных зависимостей давления от расхода закачиваемой жидкости (т. е. индикаторной диаграммы) и для этих сценариев апробированы подходы по оценке давления смыкания трещины автоГРП.

При определении минимального горизонтального напряжения по индикаторным диаграммам апробированы три способа.

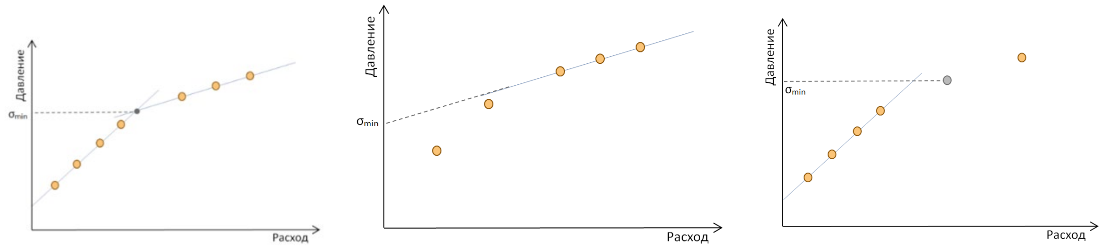
1. Давление смыкания определяется по точке пересечения линейных аппроксимаций (рис. 1, *а*). Способ предлагается использовать в том случае, если в каждой области выше и ниже давления смыкания трещины автоГРП имеется не менее трех режимов ИД.

2. Давление смыкания определяется через аппроксимацию на режимах установившегося развития динамической части трещины (не менее трех режимов). Его величина определяется по значению давления при нулевой величине расхода закачиваемой жидкости (рис. 1, *б*). В отличие от предыдущего способа, в области низких давлений (при давлениях ниже давления смыкания) менее трех режимов.

3. Давление смыкания определяется по первой точке, которая отклоняется от линейной зависимости области «низких» давлений (рис. 1, *в*). Способ применим в том случае, если при давлениях выше давления смыкания трещины имеется не менее трех режимов ИД. При этом на режимах выше давления смыкания трещины имеется менее трех режимов ИД.

В данной работе выполнено численное моделирование ступенчатого теста в нагнетательной скважине с самопроизвольным развитием трещины (автоГРП), которая возникает при превышении давления закачки над минимальными горизонтальными напряжениями (давлением смыкания трещины) [1].

Моделирование выполнено для ступенчатого теста с одинаковыми длительностями закачки (1 сутки на каждом режиме) и при различных проницаемостях пласта (0,01; 0,1 и 1 мД).



а б в

Рис. 1. Способы определения давления смыкания трещины автоГРП

В результате моделирования установлено, что точка пересечения (давление смыкания трещины автоГРП) прямолинейных участков по режимам выше и ниже давления смыкания трещины достовернее определяется для коллектора проницаемостью пласта 0.1 мД (рис. 2). Также установлено, что чем больше проницаемость коллектора, тем больше отличие между коэффициентами приемистости до и после смыкания трещины.

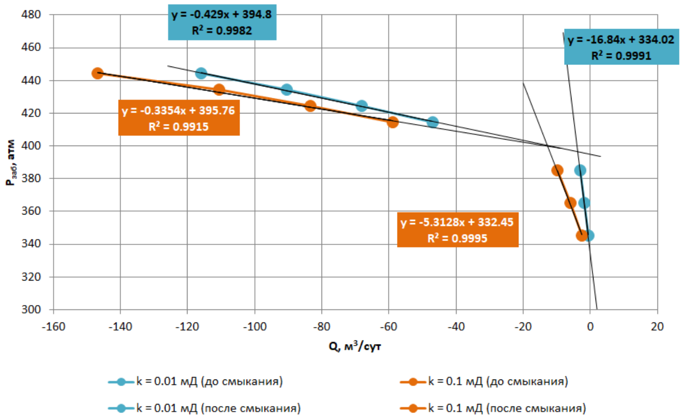


Рис. 2. Зависимости расхода закачиваемой жидкости от давления закачки в скважине при различных проницаемостях пласта $0.01 \cdot 10^{-15}$ и $0.1 \cdot 10^{-15}$ м^2

Список литературы

1. Давлетбаев А. Я., Мухаметова З. С. Моделирование закачки жидкости в скважину с развитием трещины гидравлического разрыва пласта // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 4. С. 1074–1082.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ЭМУЛЬСИОННОЙ СИСТЕМЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

В. И. Валиуллина*, Р. Р. Аюпов,
Р. Р. Галеев, А. А. Мусин, Л. А. Ковалева *

Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, 32
* *valiullina.vilena@mail.ru*

Проведено экспериментальное исследование влияния перепада давления на динамику расслоения эмульсии типа «вода в масле» с целью повышения эффективности разделения дисперсных систем в потоке.

Исследование режима переноса в зависимости от физико-химических параметров является важной задачей при описании конкретных явлений, среди которых особое место занимает вынужденная конвекция. В частности, вынужденная конвекция имеет место в нефтяной промышленности, а именно при транспортировке и перекачке нефти. При эксплуатации центробежных насосов в зависимости от поверхностных скоростей потоков происходит перемешивание фаз, что приводит к образованию водонефтяных эмульсий. Вязкость дисперсной системы может быть выше, чем у чистых веществ, составляющих эмульсию, и её стабильность зависит от свойств жидкости и количества энергии, рассеиваемой в потоке. Необходимо иметь детальное представление о динамике фаз, поскольку наблюдаемое поведение реальных потоков полностью отличается от однофазных [1].

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния перепада давления на динамику расслоения эмульсии типа «вода в масле». Для проведения экспериментов по изучению вынужденной конвекции эмульсионных систем была модифицирована созданная ранее экспериментальная установка [2]. Была спроектирована и изготовлена прямоугольная экспериментальная ячейка с одним отверстием для притока жидкости и двумя – для оттока (рис. 1). Процесс движения дисперсной системы фиксировался на фотокамеру.

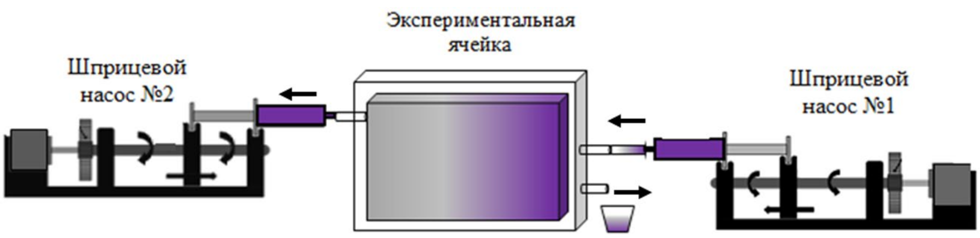


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

В качестве объекта исследования была использована модельная эмульсия типа «вода в масле». Испытания включали в себя четыре серии экспериментов с различными значениями расходов эмульсии – 5, 10, 15 и 20 мл/мин. Характеристика средней скорости жидкости возрастала пропорционально увеличению расхода жидкости. Также были проанализированы образцы эмульсии, отобранные из нижнего и верхнего отверстий ячейки. Была замечена тенденция к увеличению размера капель воды при выходе эмульсии из нижнего отверстия при максимальном расходе жидкости. Этого не видно при более низких расходах, так как к моменту окончания эксперимента с низкими расходами капли воды в эмульсии успевают осесть.

Отобранная эмульсия отстаивалась для того, чтобы определить количество отслоившейся воды. На рис. 2 представлены образцы эмульсии через сутки после отбора.

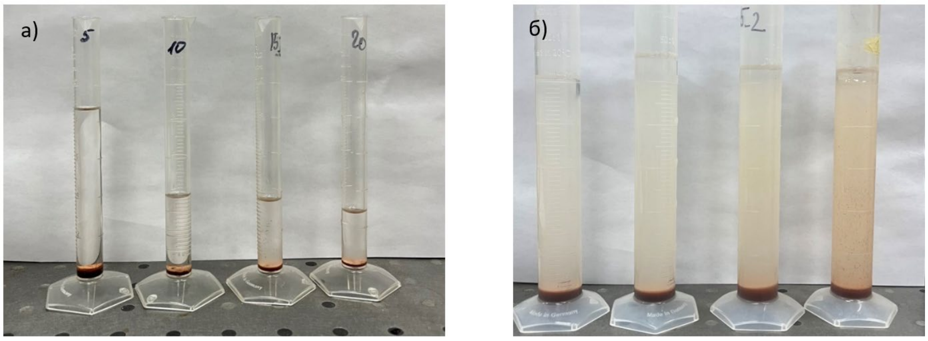


Рис. 2. Высота отслоившейся воды из нижнего (*а*) и верхнего (*б*) отверстия ячейки

Графики зависимости высоты отслоившейся воды образцов эмульсии из нижнего и верхнего отверстий ячейки от расхода жидкости представлены на рис. 3.

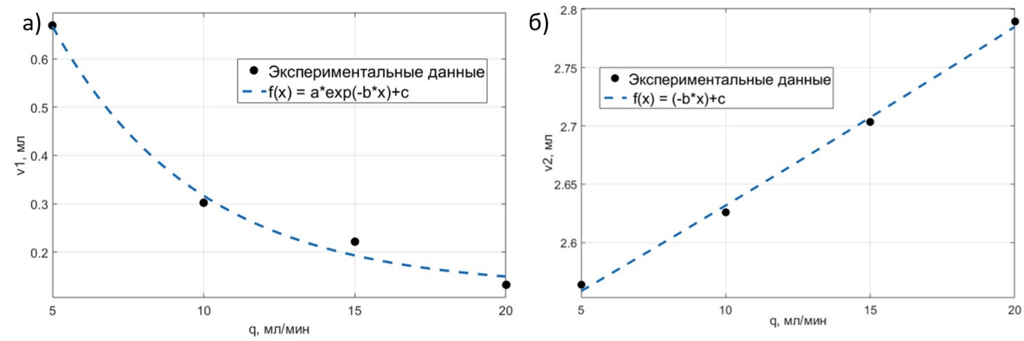


Рис. 3. Зависимость количества отслоившейся воды от расхода жидкости:
а – образцы из нижнего отверстия; *б* – образцы из верхнего отверстия

Видно, что с ростом расхода жидкости при отборе из нижнего отверстия ячейки объем отслоившейся воды значительно снимается, в то время как количество отслоившейся воды в образце из верхнего отверстия растет. Это связано с перераспределением капель воды в ячейке под действием гравитационных сил при изменении скорости подачи жидкости.

После аппроксимации экспериментальных данных были получены масштабные коэффициенты, характерные для используемой ячейки. Экспериментальные точки, полученные для образцов эмульсии из нижнего отверстия, аппроксимируются уравнением (1), а данные, полученные для образцов эмульсии из нижнего отверстия, – уравнением (2).

$$v1(q) = 1.534 \cdot \exp(-0.2083 \cdot q) + 0.1254 \tag{1}$$

$$v2(q) = 0.0151 \cdot q + 2.482 \tag{2}$$

В работе было исследовано влияние соотношения расходов жидкости на результирующую динамику расслоения эмульсий в отобранных пробах с целью повышения эффективности разделения дисперсных систем в потоке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00298.

Список литературы

1. Perissinotto R. M., Verde W. M., de Castro M. S., Biazussi J. L., Estevam V., Bannwart A. C. Experimental investigation of oil drops behavior in dispersed oil-water two-phase flow within a centrifugal pump impeller // Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 105, pp. 11–26, 2019.

2. Valiullina V. I., Zamula Yu. S., Mullayanov A. I., Iulmukhametova R. R., Musin A. A., Kovaleva L. A. Experimental and Numerical Study of the Water-in-Oil Emulsion Thermal Motion in Rectangular Cavity with a Heated Bottom // International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”. Springer, Cham, pp. 117–125, 2022.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТОЙ СРЕДЫ ПОЛИМЕРНЫМИ РАСТВОРАМИ

Д. В. Гузей[1,2⁑], С. В. Иванова[1], А. В. Минаков[1,2] [*]

[1]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[⁑] *DGuzey@sfu-kras.ru*

Проведено расчетное исследование вытеснения нефти из модели трещиноватой среды растворами полиакриламидных полимеров. Было проведено исследование влияния концентрации растворенного полимера, молекулярной массы используемых полимерных растворов и вязкости нефти на коэффициент вытеснения нефти. В численной модели использовались экспериментально определенные свойства полимерных растворов (вязкость, контактный угол на границе полимер-нефть-порода и коэффициент поверхностного натяжения).

Одним из методов увеличения нефтеотдачи низкопроницаемых пластов является полимерное заводнение. Также полимерное заводнение применяется на поздних стадиях разработки месторождений. Несмотря на то, что технологии полимерного заводнения используются в процессе нефтедобычи, некоторые вопросы, связанные с выбором полимерного раствора и концентрации, остаются не изученными. Например, выбор полимерного раствора под определенный коллектор, а также подбор вязкости полимерного растовора, чтобы избежать закупорки пор. Поэтому целью данной работы было численное исследование вытеснения нефти из модели трещиноватой среды растворами полиакриламидных полимеров. Численное исследование вытеснения нефти проводилось из двумерной модели трещиноватой среды. Численная методика основана на решении системы уравнений Навье – Стокса. Для описания течения двухфазного потока использовался метод VOF [1]. Данная модель позволяет описать несмешивающийся многокомпонентный поток жидкость-жидкость, решаются уравнения переноса импульса с учетом объемной доли каждой фазы. В качестве граничных условий на входе в расчетную область использовалось постоянное значение скорости. На выходе из расчетной области – условия Неймана. На стенках канала задавалось условие прилипания. Были использованы экспериментально измеренные значения вязкости, плотности, межфазного натяжения и краевого угла смачивания для всех исследуемых полимерных растворов.

Было проведено численное моделирование процесса вытеснения нефти из модели трещиноватой среды с помощью растворов полиакриламидного полимера с молекулярной массой 20 млн у.е. для двух массовых концентраций (0,05 и 0,1 %). Показано, что использование полимерных растворов повышает значение коэффициента вытеснения нефти из пористой среды с 0,45 (для воды) до 0,74 при вытеснении полимерным раствором с массовой концентрацией 0,05 %. Дальнейшее увеличение концентрации до 0,1 % приводит к увеличению коэффициента вытеснения нефти до 0,85. Такой существенный рост коэффициента вытеснения нефти связан с тем, что для полимерных растворов существенно возрастает значение вязкости по сравнению с водой, а также они являются неньютоновскими жидкостями (коэффициент вязкости зависит от скорости сдвига).

Проведено численное моделирование процесса вытеснения нефти из пористой среды для полимеров с различной молекулярной массой. Были рассмотрены три полиакриламидных полимерных раствора с массовой концентрацией 0,1 %. В расчетном исследовании рассмотрены растворы полимеров 2515, 2540 и 2020 с относительными молекулярными массами: 10; 14; 20 млн у.е. Для полимерных растворов с различной молекулярной массой 2515, 2020 и 2540 коэффициент вытеснения нефти, полученный в ходе расчетов, был довольно близким по значениям. Максимальное значение коэффициента извлечения нефти, полученное для полимера 2540, было равно 0,88. Что соответствовало максимальным значениям эффективной вязкости среди рассмотренных полимерных растворов. Получены зависимости перепада давления для полимеров с различной молекулярной массой. Использование полимерных растворов приводит к увеличению перепада давления в 10 и более раз. Наибольший рост перепада давления по сравнению с водой был получен для полимерного раствора 2540, значение перепада давления выше в 14 раз. Для полимерных растворов 2515 и 2020 величина перепада давления в 11,4 и 10,8 раза соответственно больше, чем для воды.

Проведено исследование влияния вязкости нефти на коэффициент вытеснения и перепад давления при вытеснении с помощью растворов полиакриламидных полимеров. Расчеты проведены для раствора полиакриламидного полимера с молекулярной массой 10 млн у.е. с массовой концентрацией 0,1 %. Наибольшее приращение коэффициента вытеснения нефти полимерным раствором наблюдается для нефти с большей вязкостью. В ходе расчетов были получены зависимости перепада давления при вытеснении нефти с различной вязкостью водой и полимерным раствором. При использовании полимерного раствора перепад давления повышается для всех рассмотренных значений коэффициента вязкости нефти.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-30022.

Список литературы

1. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys., vol.39, pp. 201–226, 1981.

СИНТЕЗ ГИДРАТА МЕТАНА
НА ТОНКИХ ВОДЯНЫХ ПЛЕНКАХ

Д. С. Елистратов *

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1

Среди возможных газогидратных технологий в настоящее время чаще всего рассматриваются хранение и транспортировка природного газа в форме газового гидрата, разделение газовых смесей, утилизация парниковых газов с одновременной добычей природного газа, опреснение воды, хранение холода и даже производство и хранение пищевых продуктов. Для многих из представленных выше гидратных технологий быстрое получение большого объема гидрата при относительно небольших энергетических затратах является критически важным. Из-за этого проблемы промышленного получения гидратов и интенсификации самого процесса гидратообразования являются предметом постоянного внимания исследователей.

Эксперименты по получению газового гидрата на водной пене проводились в реакционном сосуде. Реактор представляет собой оптическую ячейку высокого (до 20 МПа) давления с термостатирующей рубашкой. Объем реактора составлял 36,2 см^3. В работе использовался многокомпонентный раствор, образующий пену, не полностью разрушающуюся после цикла образования – разложения гидрата. Состав раствора был подобран методом «проб и ошибок». Компоненты подбирались таким образом, чтобы минимизировать их ингибирующее действие на гидратообразование. В состав раствора входили два типа ПАВ: 1 масс.% лаурилсульфата натрия (96,33 %, Galaxy, Индия) и 1 масс.% of nonionic surfactant OP-10 (LLC “Sintez OKA”, Россия). Для стабилизации пены в раствор добавлялись 0,13 масс.% карбомера Acrylates/C10-30 Alkylacrylate Crosspolymer SW-703ER (Sumitomo Seika Chemicals Co., Ltd., Япония) и 0,85 масс.% глицерина.

Для активации карбомера в раствор добавлялось 20 мкл насыщенного раствора KOH. Раствор готовился при постоянном перемешивании при 80 °C. Полученный раствор представлял собой слегка мутную вязкую (3,56 мм^2/с при 30 °C) жидкость. При интенсивном встряхивании этой жидкости образовывалась пена, объем которой заметно не изменялся в течение как минимум 1 часа. Этого времени было достаточно для проведения эксперимента.

Проведена серия экспериментов по исследованию процесса образования гидрата метана в системе водный раствор ПАВ – полученная из этого раствора пена – газ и процесса его диссоциации.

Каждый эксперимент состоял из трех этапов. На первом этапе исследовался процесс образования гидрата при условиях, описанных выше. На втором этапе в рабочем объеме осуществлялось плавное повышение температуры (со скоростью, не превышающей 0,2 K/мин), что приводило к диссоциации газогидрата. На третьем этапе исследовался повторный цикл образования и диссоциации газогидрата на вторичной (полученной после разложения, образованного в первом цикле газогидрата) пене, с целью выявления так называемого эффекта памяти. Все эксперименты проводились при одинаковых режимных параметрах процесса.

Представлены экспериментальные исследования процесса образования гидрата метана на водной пене, стабилизированной ПАВ. Показано, что при переводе системы в метастабильное состояние в объеме пены в результате флуктуации образуется одиночный зародыш гидрата, инициирующий лавинообразное затвердевание всего объема пены. Скорость волны гидратообразования, распространяющейся от зародыша в радиальном направлении, составляет ≈ 1 мм/с, что соответствует скорости роста гидратной пленки по поверхности воды при схожих термобарических условиях.

Сделано заключение, что пена является хорошей гидратообразующей системой. Это обусловлено как наличием в ней развитой межфазной поверхности, что является одним из главных факторов, способствующих процессу гидратообразования, так и достаточным, при соответствующем выборе режимных параметров процесса, запасенным холодом, что позволяет фазовому превращению, пусть даже и частичному, пройти без дополнительного теплоотвода.

Отдельно описаны некоторые явления, сопровождающие затвердевание пены. Первое – разрушение структуры пены за фронтом волны гидратообразования, объяснение которому авторы нашли в понижении давления в газовой фазе, приводящем к нарушению механического равновесия. Второе – проседание пены, обусловленное изменением уровня жидкости, связанным с ее капиллярным подсосом по образованному гидратному каркасу.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт с ИТ СО РАН).

Список литературы

1. Chernov A. A., Pil'nik A. A., Elistratov D. S., Mezentsev I. V., Meleshkin A. V., Bartashevich M. V., Vlasenko M. G. New hydrate formation methods in a liquid-gas medium // Scientific Reports vol. 7, 40809, 2017.

2. Stoporev A. S., Adamova T. P., Manakov A. Y. Insight into Hydrate Film Growth: Unusual Growth of Methane Hydrate Film at the Interface of Methane and the Aqueous Solution of Malonic Acid // Cryst. Growth. Des. vol. 20, pp. 1927–1934, 2020.

3. 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 vol. 102, pp. 526–529, 2015.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДОВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ МОДЕЛЬНОГО КЕРНА ПРИ ПОМОЩИ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ И НАНОСУСПЕНЗИЙ

В. А. Жигарев[1‡], А. В. Минаков[1,2], Д. В. Гузей[1], А. Д. Скоробогатова[1] [*]

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[‡] VZhigarev@sfu-kras.ru

Приведены результаты фильтрационных экспериментов на образцах керна по определению эффективности довытеснения нефти растворами полимера и наносуспензии после заводнения базовым агентом вытеснения. В экспериментах использовалась маловязкая нефть.

Актуальной проблемой разработки нефтяных месторождений с применением заводнения является обводнение месторождений. Одной из основных целей в методах увеличения нефтеотдачи пластов является изменение смачиваемости породы, способствующее извлечению как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти. В традиционных технологиях модификация характера смачиваемости обеспечивается в результате введения в пластовые флюиды синтетических поверхностно-активных веществ, зачастую обладающих высокой токсичностью. Возникающие при этом экологические проблемы могут быть решены путем замены подобных ПАВ суспензиями наночастиц.

В работах [1, 2] было показано, что добавки наночастиц позволяют значительно увеличить коэффициент вытеснения нефти. Так, в работе [1] для этой цели использовали наночастицы SiO_2 с размерами 20–70 нм. В результате было показано, что применение наножидкости позволяет повысить коэффициент извлечения нефти с 47 до 76 % по сравнению с пластовой водой. Данный эффект авторы объяснили тем, что в результате адсорбции наночастиц материал породы приобретает свойства водосмачивания, что способствует вымыванию как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти.

В результате проведённого анализа было принято решение провести исследование по изучению зависимости коэффициента вытеснения при довытеснении нефти из образцов керна растворами полимеров и наносуспензиями для определения эффективности использования тех или иных агентов вытеснения.

Целью данного исследования является экспериментальное исследование довытеснения нефти из горной породы с использованием растворов полимеров и наносуспен- зий. Для решения данной цели были приготовлены и исследованы свойства растворов полимеров полиакриламида и наносуспензий оксида кремния. В качестве горной породы коллектора использовался песчаник Clear Amherst Gray – это осадочная порода, зерна которой преимущественно состоят из кварца, удерживаемого вместе кремнезёмом. Относительно высокая пористость и проницаемость делает его хорошей породой-коллектором и общепризнанным тестовым материалом. Проведено исследование процессов фильтрации растворов полимеров и наносуспензий через образцы горной породы насыщенной нефти, через которые проведено первичное вытеснение нефти базовым агентом вытеснения (дистиллированной водой). В работе в качестве образца горной породы использовался модельный керн с известными характеристиками пористости и проницаемости. Образцы керна насыщались нефтью и выдерживались в течение определённого времени, необходимого для заполнения порового пространства.

Эксперимент на образцах керна по определению эффективности довытеснения нефти наносуспензией/раствором полимера после заводнения базовым агентом вытеснения проходил следующим образом: через составной образец прокачивается нефть в количестве не менее трех поровых объёмов, после прокачки нефти происходит фиксация объёма вытесненной воды и выдержка образцов при пластовых условиях в течение длительного времени, определяется их нефтенасыщенность. После определения нефтенасыщенности, через составной образец происходит фильтрация базового вытесняющего агента (воды). Вода прокачивается в количестве не менее трех поровых объёмов до прекращения вытеснения нефти. Вытесненная жидкость собирается в мерные пробирки. Далее производится довытеснение наносуспензией/раствором полимера оставшейся нефти из образца. Вытесняющий агент прокачивается в количестве не менее трех поровых объёмов до прекращения вытеснения нефти, которая собирается в мерные пробирки. Определяется объём вытесненной нефти в зависимости от прокачанного порового объёма. Рассчитывается коэффициент вытеснения нефти после довытеснения. После процесса довытеснения происходит фильтрация через образец базового агента вытеснения (воды). Вода прокачивается в количестве не менее трех поровых объёмов до прекращения вытеснения нефти. Вытесненная жидкость собирается в мерные пробирки. Определяется объём вытесненной нефти в зависимости от прокачанного порового объёма. Рассчитывается итоговый коэффициент вытеснения нефти после поэтапного (вода – исследуемая суспензия/полимер-вода) вытеснения. Результаты экспериментов показали, что использование наносуспензий позволяет увеличить коэффициент извлечения нефти. В работе проведено исследование зависимости коэффициента вытеснения от концентрации полимера и наносуспензий. Исследована зависимость коэффициента вытеснения для разных полимеров.

С увеличением массовой концентрации полимера и наночастиц в вытесняющей жидкости коэффициент вытеснения нефти возрастает. Максимальный коэффициент довытеснения получен при использовании раствора полимера с концентрацией 0,1 масс. % и при использовании наночастиц с концентрацией 0,25 масс. %. В результате экспериментов отмечалось, что при схожих условиях фильтрации при фильтрации полимерных растворов перепад давления в несколько раз больше, чем при фильтрации наносуспензий такой же концентрации.

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод, что применение наносуспензий с целью повышения коэффициента нефтеотдачи является актуальной и перспективной задачей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRZ-2020-0012).

Список литературы

1. Roustaei A., Bagherzadeh H. Experimental investigation of SiO_2 nanoparticles on enhanced oil recovery of carbonate reservoirs // J. Pet. Explor. Prod. Tech. vol. 5, pp. 27–33, 2014.

2. Bera A., Belhaj H. Application of nanotechnology by means of nanoparticles and nano-dispersions in oil. //J. Nat. Gas Sci. Eng. vol. 34, pp.1284–1309, 2016.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД ЛЕНО-ВИЛЮЙСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

А. Р. Кириллин*, В. П. Семенов*

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
677010, Российская Федерация, Якутск, ул. Мерзлотная, 36
* *mouks@ya.ru*

Представлены и проанализированы результаты исследований теплопроводности основных типов осадочных горных пород Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции. Лабораторные исследования выполнены по 283 образцам керна, отобранным из 12 глубоких скважин, расположенных в различных областях провинции. Дана оценка теплопроводности горных пород в условиях их естественного залегания (полного влагонасыщения) и эффективной теплопроводности пород отдельных геологических свит.

Лено-Вилюйская нефтегазоносная провинция по высокой концентрации углеводородных природных ресурсов и их экономической значимости принадлежит к числу важнейших регионов России. При освоении территории и разработке месторождений полезных ископаемых теплофизические свойства пород требуются для характеристики геотемпературного поля и расчетов по тепловому взаимодействию инженерных объектов с горными породами.

Теплофизические исследования проведены на образцах из ведомственного кернохранилища Государственного унитарного горно-геологического предприятия «Якутскгеология». Всего было отобрано и проанализировано 283 образца по 12 скважинам, расположенным на 10 геологоразведочных площадях. Образцы керна, отобранные с различных глубин залегания (от первых десятков до 3500 м), характеризуют основные разновидности и структурно-вещественные комплексы разреза горных пород. В геологическом возрастном отношении керн был представлен меловыми, юрскими, триасовыми, пермскими и кембрийскими толщами горных пород.

Теплопроводность горных пород определялась в воздушно-сухом и талом состояниях на приборе оптического сканирования по методу Ю. А. Попова – Thermal Conductivity Scanning (TCS) [1]. Теплопроводность пород в водонасыщенном состоянии была рассчитана на основе гидрогеологических данных регионов [2–4] и исследований зависимости теплопроводности сухих и водонасыщенных осадочных отложений по Западно-Сибирской плите [5, 6]. Теплопроводность в мерзлом состоянии находилась расчетным методом по формуле Р. И. Гаврильева для осадочных пород [7].

При литологическом описании исследуемых образцов и в результате анализа теплопроводности выявлена неоднородность свойств однотипных горных пород различного геологического возраста. Они разделены на три группы: 1) породы мелового возраста; 2) породы юрского возраста; 3) породы триасового, пермского и кембрийского возраста.

Теплопроводность меловых песчаников в воздушно-сухом состоянии изменяется от 0,84 до 4,05 Вт/(м·К), в среднем составляя 1,54 Вт/(м·К). Теплопроводность алевролитов варьирует от 0,62 до 1,89 Вт/(м·К) при среднем значении 1,17 Вт/(м·К) и средней плотности 2048 кг/м^3; аргиллитов – от 1,09 до 1,52 Вт/(м·К) при среднем 1,22 Вт/(м·К). Теплопроводность песков имеет наименьшие значения и изменяется от 0,60 до 0.92 Вт/(м·К), в среднем составляя 0,73 Вт/(м·К). Плотность их варьирует от 1799 до 1970 кг/м^3.

Песчаники юрского возраста (наряду с алевролитами и аргиллитами) имеют большие средние значения теплопроводности в воздушно-сухом состоянии, чем породы мелового возраста, соответственно 1,67, 1,63 и 1,60 Вт/(м·К). Как теплопроводность, так и плотность горных пород этой толщи выше, чем у толщи меловых отложений. В целом диапазон изменения теплопроводности пород этой группы составляет от 0,95 Вт/(м·К) в углях до 4,29 Вт/(м·К) в песчаниках. Средние значения теплопроводности известняков 1,83 Вт/(м·К), доломитов 1,78 Вт/(м·К), встречающихся здесь глин 1,25 Вт/(м·К).

Отложения третьей группы (объединенного триасового, пермского и кембрийского возраста) представлены песчаниками, известняками, доломитами с прослоями глинистых пород. Редко встречаются долериты и конгломераты. Песчаники в основном серицит- или кварц-полевошпатового состава, реже глинистого, мелкозернистые, плотные. Теплопроводность их выше, чем у песчаников юрского возраста, и варьирует от 1,47 до 2,35 Вт/(м·К), в среднем составляя 1,91 Вт/(м·К). Теплопроводность известняков изменяется от 1,39 до 2,61 Вт/(м·К) при среднем значении 2,03 Вт/(м·К). Аргиллиты и доломиты, как и песчаники, отличаются более высокими по отношению к породам второй группы величинами теплопроводности и плотности, средние значения равны 1,79 и 1,97 Вт/(м·К) и 2595, 2476 кг/м^3 соответственно. Долериты и конгломераты имеют среднюю теплопроводность 1,34 и 1,64 Вт/(м·К) при плотности 2631 и 2438 кг/м^3 соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ АААА-А20 120111690010-2 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности»).

Список литературы

1. Popov Yu. A., Semenov V. G., Korostylev V. M., et al., 1983.Remo te assessment of thermal conductivity of mountain rocks by using a mobile heat source. Izv. AN SSSR, physics series 7, 86–93.

2. Antsiferov A. G. The Hydrogeological Features of the Ancient Oil-and Gas-bearing Formations of the Siberian Platform. Nedra, Moscow, 176 p., 1989.

3. Hydrogeology of the USSR, vol. 20. Yakutsk Autonomous Republic. Nedra, Moscow, 384 p., 1970.

4. Grubov L. A., Slavin V. I. Comparative assessment of hydrogeological conditions of diff erent regions of the Yakutsk artesian basin related to its oil and gas-bearing properties, in: Hydrogeological Studies in Oil and Gas-bearing Provinces. VNIIGRI, Leningrad, pp. 184–203., 1971.

5. Duchkov A. D., Lysak S. V., Balobayev V. T., et al. The Thermal Field of the Earth's Entrails in Siberia. Nauka, Novosibirsk, 193 p., 1987.

6. Duchkov A. D., Sokolova L. S., Ayunov D. E., Zlobina O. N. Thermal conductivity of sedimentary rocks of the Arctic part of Western Siberia. Geologiya i Geofi zika 54 (12), 1952–1960, 2013.

7. Gavrilyev R. I. A Catalogue of thermal Physical Properties of Mountain Rocks of the North-East of Russia. Ed. By M.N. Zheleznyak and V.I. Zhizhin. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 172 p., 2013.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ

Р. Н. Крылышкин*, Р. В. Гурина *

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
* *krylyshkin.roma@gmail.com*

Рассмотрены варианты повышения безопасности термической утилизации нефтесодержащих отходов для минимизации энергетических потерь. Проанализированы результаты исследований, полученные при коксовании тяжелых нефтяных остатков с подбором оптимальных температурных условий. Описывается уточненная технология рекуперации теплоты дымовых газов в процессе термического обезвреживания отходов. Расчетным методом доказана возможность использования теплоты уходящих газов. В результате проведённого анализа представлены рекомендации для повышения эксергетической составляющей топлива.

Использование максимального количество энергии, накопленной в топливе в процессе его формирования в толще литосферы, является важной задачей [1] как с точки зрения энергосбережения, так и с точки зрения охраны окружающей среды.

Современные технологические процессы для получения продуктов нефтепереработки или использующие их, характеризуются существенными энергетическими потерями и образованием большого количества отходов производства, имеющих высокие энергетические показатели [2].

В конечном счете, как правило, тяжелые нефтесодержащие остатки подвергают термическому уничтожению в местах образования с целью снижения затрат на обезвреживание на специальных мобильных установках, например, таких как УЗГ-1М, в которой можно утилизировать в том числе замазученные грунты [3]. Если поступающий нефтешлам является «свежим», то его можно разделить методами гравитационного уплотнения, фильтропрессования, центрифугирования на нефтепродукты и механические примеси.

Эксперимент, решающий две задачи для повышения безопасности при утилизации нефтесодержащих отходов, проводился на территории базовой кафедры техносферной безопасности СФУ. Вначале была доказана возможность коксования нефтяных остатков на оригинальной установке при подборе оптимальных температурных условий разделения фракций нефтяного остатка и получения продукта коксования (рис. 1). Наилучший эффект достигался в интервале температур 450–500 °С, что подтвердил выполненный термогравиметрический анализ с дифференциально сканирующей калориметрией [4]. Кроме того, при помощи высокотемпературной газовой хроматографии был установлен объем выхода летучей фракции углеводородов.

При помощи высокотемпературной газовой хроматографии был установлен объем выхода летучей фракции. Для сравнения представлено содержание указанных веществ в исходном нефтешламе и продукте коксования (табл. 1).

Исходя из полученных результатов, можно констатировать, что в экспериментально полученном продукте зафиксировано изменение объемов и выхода летучих соединений, в частности – уменьшение значений по хлоридам более чем в четыре раза, по сульфатам в три раза

После чего оставшийся замазученный грунт сжигали в УЗГ-1М, изменив конструкцию загрузочного бункера с целью использования тепла уходящих дымовых газов на основании результатов расчета теплопередачи через однослойную плоскую стенку

[5]. Возврат части теплоты дымовых газов в печь осуществляется путем предварительного подогрева за счет передачи части теплоты дымовых газов топлива утилизируемому грунту перед его подачей в печь, что позволяет повысить коэффициент использования теплоты печного агрегата, температуру и качество горения топлива, а также снизить расход топлива и сопутствующие негативные экологические воздействия.

Рис. 1. Полученный продукт коксования

Таблица 1

Значения компонентов в образцах, мг/кг

Определяемый компонент	Исходный нефтешлам	Продукт коксования
хлорид-ион	19,4	4,6
сульфат-ион	29,1	9,4
нитрат-ион	< 0,1	< 0,1
фосфат-ион	< 0,1	< 0,1

Особенности протекания процесса теплопередачи заключаются в том, что на границах стенки при теплопередаче характеризуется граничными условиями третьего рода, которые задаются температурами газа с одной стороны и внутренней поверхности стенки, а также соответствующими значениями коэффициентов теплоотдачи.

Полученные результаты позволяют дать рекомендации для повышения эксергетической составляющей при использовании природного жидкого топлива за счет выделения из образующихся отходов высококалорийной газовой фракции в количестве около 5 %, получения нефтяного полукокса примерно 19 %, снижения температуры уходящих газов на стадии окончательной термической утилизации на 20 °С.

Список литературы

1. Гутенев В. В., Кулагина Т. А., Кулагина Л. В. и др. Экология техносферы. М.: Маджента, 2008. 468 с.

2. Матюшенко А. И., Кулагина Т. А., Горбунова Л. Н. Энциклопедия обращения с отходами. М.: Маджента, 2027. 472 с.

3. Крапивский Е. И. Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация: монография. М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 432 с.

4. Кулагина Т. А., Гурина Р. В. Высокотемпературное коксование как эффективная переработка нефтяных остатков // Экология-2022. 2022. Т. 1. С. 131–134 с.

5. Кулагина Т. А. Разработка режимов сжигания обводненных топочных мазутов и водотопливных эмульсий: дис. … канд. техн. наук: 01.04.14. Красноярск, 2000.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Е. И. Лысакова[1‡], А. В. Минаков[1,2], В. А. Жигарев[1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
‡ EMikhienkova@sfu-kras.ru

Добавки наночастиц могут влиять практически на все свойства современных промывочных жидкостей, используемых при бурении нефтегазовых скважин [1]. Наночастицы стали применять в качестве реагентов в буровых растворах для регулирования их реологических параметров, контроля фильтрационных потерь, улучшения антифрикционных свойств и уменьшения трения между стенками скважины и бурильной колонны с целью предотвращения прихватов и др. [2]. Благодаря уникальным характерным особенностям наноразмерных материалов по сравнению со стандартными добавками и их легкой адаптации для выполнения определенных функциональных задач, наночастицы считаются одними из лучших кандидатов для создания интеллектуальной промывочной жидкости [3]. Таким образом, несмотря на то, что в последнее время наножидкости довольно подробно исследуются во многих приложениях, в технологиях строительства нефтегазовых скважин они фактически являются новым объектом исследований. В данной области их влияние на свойства промывочных жидкостей изучены еще весьма фрагментарно. Результаты имеющихся исследований являются разрозненными и еще во многом противоречивыми. Кроме того, по мере изучения подобных коллоидных систем открываются новые интересные эффекты, требующие дальнейшего исследования. Установленные уже сегодня нетрадиционные свойства наножидкостей пока плохо укладываются в существующие теории.

Кроме того, перспективным направлением развития данной научной проблематики представляется использование углеродных нанотрубок для совершенствования свойств буровых растворов на водной и углеводородной основах. Углеродные трубки благодаря своему непревзойденному аспектному соотношению являются уникальным наноматериалом. Влияние добавок углеродных нанотрубок на реологию наносуспензий является значительно более существенным по сравнению со сферическими наночастицами, изученными в данной работе. Это делает их применение для совершенствования буровых растворов очень привлекательным. Поэтому изучение применения наножидкостей в нефтегазовых технологиях (особенно в приложениях к технологическим процессам бурения нефтегазовых скважин) чрезвычайно актуально с практической точки зрения. Возможность регулировать свойства буровых растворов с помощью небольших добавок наночастиц (что практически не скажется на плотности промывочной жидкости) позволит значительно снизить общие затраты на бурение скважины и сократить процесс ее строительства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-30022.

Список литературы

1. Евдокимов И. Н. Наножидкости и умные жидкости в технологиях разработки нефтегазовых месторождений: учебное пособие для вузов. М.: Недра, 2016. 47 с.

2. Минаков А. В., Михиенкова Е. И., Жигарев В. А., Неверов А. Л., Рудяк В. Я. Исследование влияния добавки наночастиц на свойства буровых растворов // Коллоидный журнал. 2018. Т. 80, № 4. С. 418–426.

3. Kong X., Ohadi M. M. Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry – an overview of the recent progress // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, SPE–138241–MS, 2010.

МИКРО- И НАНОФЛЮИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИИ

А. В. Минаков[1,2], Д. В. Гузей[1,2], В. А. Жигарев[1], С. В. Иванова[1], М. И. Пряжников[1], А. И. Пряжников[1], Е. И. Лысакова[1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
** AMinakov@sfu-kras.ru*

В статье приведены результаты исследований свойств наножидкостей. Показаны результаты влияния добавки наночастиц на свойства буровых растворов. Показана возможность применения наножидкостей для увеличения нефтеотдачи. Представлены результаты применения микрофлюидных технологий в задачах нефтегазовой промышленности.

Активный интерес к суспензиям с наночастицами (наножидкостям) появился четверть века тому назад и с тех пор непрерывно растет. Число публикаций, посвященных исследованию свойств и применений наножидкостей, увеличивается экспоненциально. Наночастицы в силу своих малых размеров имеют ряд необычных свойств, которые отсутствуют у макроскопических дисперсных частиц. Необычные свойства наночастиц делают нестандартными и свойства наножидкостей, в которых они являются составной частью. Это обусловило широчайший спектр применения наножидкостей.

В технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений наносуспензии стали применяться существенно позднее. Однако в настоящее время применение наносуспензий в данной области активно исследуется.

В рамках данной работы изучены свойства наносуспензий. Проведено исследование контроля размера частиц методом РЭМ, а также контроля коллоидной устойчивости наносуспензий. Измерена вязкость и реологические характеристики растворов.

Проведено исследование возможности управления свойствами буровых растворов с помощью добавки наночастиц. В рамках данного исследования изучено влияние добавки наночастиц на вязкость и реологические характеристики растворов. Исследованы влияние наночастиц на фильтрационные свойства буровых растворов и смазывающая способность бурового раствора с добавками наночастиц.

Проанализирована возможность применения наносуспензий для увеличения нефтеотдачи. Проведено исследование влияния добавки наночастиц на изменение краевого угла смачиваемости и межфазного натяжения Исследована возможность применения наносуспензий для капиллярного вытеснения нефти из кернового материала.

Также в рамках данной работы проведено исследование применения микрофлюидных технологий в задачах нефтегазовой промышленности. Представлена возможность создания и применения чипов для исследования гидродинамики в микрофлюидных чипах. Представлены возможности создания различных микрофлюидных аппаратов. Ведётся разработка микрофлюидного тензиометра, микрофлюидной PVT-установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-30022.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОКОНДЕНСАТНОЙ СМЕСИ МЕТАН–Н-ПЕНТАН

Д. А. Молчанов[⁑], Л. Б. Директор [*]

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
[⁑] *dmitriy.molchanov13@gmail.com*

Представлены результаты расчетных исследований особенностей процесса изотермической фильтрации смеси углеводородов метан–н-пентан в пористой среде. Проведено сравнение расчетов с результатами экспериментальных исследований. Показано, что в случае фильтрации модельной смеси через линейную насыпную модель пласта при закритическом давлении на входе в модель пласта и вариациях давления на выходе при различных составах смеси существует область параметров, в которой течение может носить автоколебательный характер, в т. ч. с периодической блокировкой расхода флюида. Обсуждаются условия возникновения неустойчивых режимов течения.

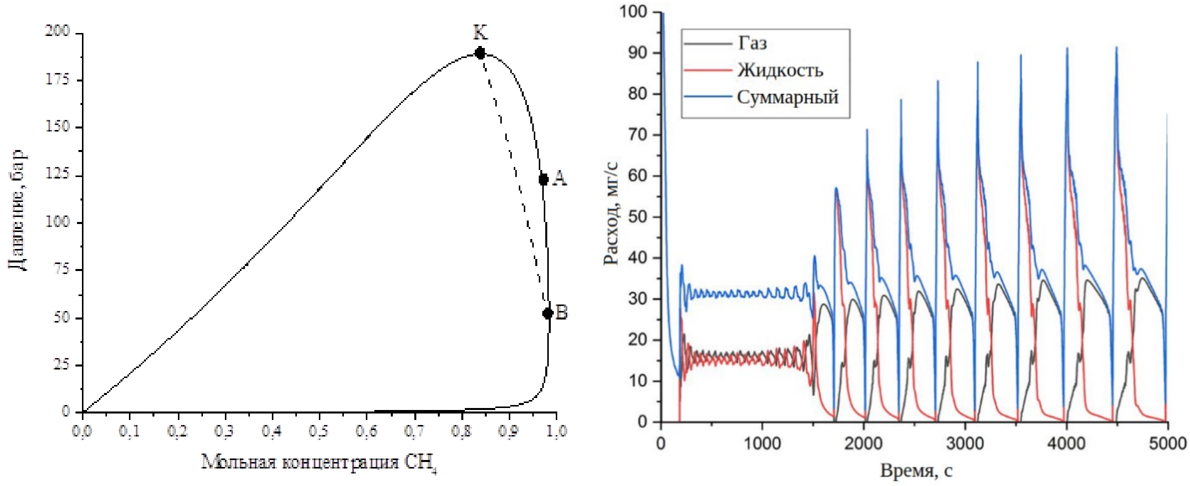
Интерес к исследованиям процессов течения многокомпонентных двухфазных флюидов с фазовыми переходами в пористой среде вызван как развитием фундаментальной теории фильтрации, так и целым рядом прикладных задач, связанных с добычей углеводородов (нефти, газа, газоконденсата) [1]. Одним из важных направлений исследований является изучение особенностей фильтрации газоконденсатных углеводородных смесей при термобарических условиях, характерных для реальных пластовых систем газоконденсатных месторождений. В природных газоконденсатных системах высокомолекулярные углеводородные компоненты смеси после снижения давления в залежи ниже давления точки росы переходят в жидкую фазу, которая в силу низкой фазовой насыщенности меньше порога гидродинамической подвижности. При достаточно низких градиентах давления жидкая фаза может перекрывать поровые каналы, блокируя поток газовой фазы [2]. Снижение давления в процессе добычи газоконденсата ниже точки росы приводит к образованию ретроградной жидкости в пористой среде, что резко снижает относительную проницаемость по газу и приводит к значительной потере ценных компонентов конденсата.

В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований динамических процессов изотермической фильтрации модельной бинарной углеводородной смеси метан–н-пентан в линейной насыпной модели пласта. Определены условия возникновения неустойчивых режимов течения.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений нестационарной фильтрации использовался неявный метод Адамса, реализованный в программном модуле DIFSUB [3].

Численные эксперименты проводились при трех значениях мольных концентраций метана, две из которых (0,9; 0,85) соответствовали ретроградной области фазовой диаграммы (рис. 1, *а*), а одна (0,75) – области прямого испарения, и при постоянном давлении на выходе из модели пласта.

Рассмотрим физические процессы, приводящие к возникновению пульсационных режимов течения. Смесь при давлении выше точки росы и концентрации метана, обеспечивающей при снижении давления прохождение флюида через ретроградную область фазовой диаграммы, поступает в модель пласта, и при дальнейшем снижении давления ниже давления точки росы начинается процесс обратной конденсации. В силу относительно небольшого количества выпавшей жидкости при малой влагонасыщенности пористой среды подвижность жидкой фазы практически нулевая, и на выходе из участка течет только газ с концентрацией метана, превышающей его концентрацию в исходной смеси. По мере накопления жидкости, не достигшей порога подвижности, локальная концентрация метана снижается вплоть до значений, меньших значений концентрации на линии давления максимальной конденсации при данном давлении, и начинается процесс прямого испарения. После того, как на каком-то участке экспериментальной модели влагонасыщенность превысит порог подвижности, жидкая фаза начинает движение и достигает зоны прямого испарения. Такие циклы (накопление конденсата, начало подвижности жидкой фазы, испарение) повторяются.



а б

Рис. 1. Результаты численного моделирования: *а* – фазовая диаграмма «давление – мольный состав» бинарной смеси метан–н-пентан при температуре 290 К (пунктиром дана кривая максимальной конденсации, KABK – область ретроградной конденсации;
б – характер изменения массового расхода при пределе текучести жидкой фазы 0,6

Показано, что на характер течения двухфазной смеси влияет несколько параметров: перепад давления в модели, состав углеводородной смеси, вид функций фазовой проницаемости, которые, в свою очередь, зависят от характеристик пористой среды (пористости, размера и конфигурации пор, смачиваемости), теплофизических свойств флюида (плотности, вязкости, поверхностного натяжения). При этом необходимым условием возникновения неустойчивостей, в т. ч. автоколебательных режимов, является нахождение смеси в ретроградной области фазовой диаграммы. Наибольший интерес представляют режимы с периодической блокировкой расхода (рис. 1, *б*). Результаты численных экспериментов качественно совпадают с результатами физического моделирования [4] как по основным параметрам, определяющим режимы фильтрации, так и по характеру поведения измеряемых в физическом эксперименте характеристик (давления, расхода флюида, состава смеси).

Список литературы

1. Mohamadi-Baghmolaei Mohamad, Azin Reza, Osfouri Shahriar, Zendehboudi Sohrab Experimental and modeling investigation of non-equilibrium condensate vaporization in porous systems: Effective determination of mass transfer coefficient // Fuel, Volume 262, 2020, 116011.

2. Rahimzadeh Alireza, Bazargan Mohammad, Darvishi Rouhollah, Mohammadi Amir H. Condensate blockage study in gas condensate reservoir // Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 33, 2016, P. 634 – 643.

3. Gear C. W. Algorithm 407 DIFSUB for Solution of DIFSUB for Solution of Ordinary Differential Equations [D2] // Communications of the ACM. 1971. V. 14. N 3. P. 185 – 190.

4. Molchanov D. A. Simulation of the filtration process of hydrocarbon binary fluid with retrograde properties // Journal of Physics: Conference Series 1556 (2020) 012058.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

З. С. Мухаметова*, А. Я. Давлетбаев, Л. А. Ковалева *

Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, 32
* *MuchametovaZ@mail.ru*

В данной работе обсуждаются результаты численного моделирования притока жидкости в скважину при высокочастотном электромагнитном воздействии. Постановка задачи учитывает эффект нелинейной фильтрации при притоке высоковязкой жидкости к скважине, а также эффект от термического расширения жидкости при тепловом воздействии в продуктивном пласте.

Высокая вязкость нефти приводит к затруднению фильтрации в пласте и соответственно к низким дебитам скважины. При фильтрации высоковязкого флюида и добыче углеводородов из низкопроницаемых коллекторов возможно нарушение линейного закона фильтрации [1]. Нелинейная фильтрация жидкости описана в работах А. Х. Мирзаджанзаде, В. В. Девликамова, В. А. Байкова и других авторов [2]. Для повышения подвижности пластовой жидкости при ее добыче могут использоваться различные тепловые методы, в т. ч. высокочастотное воздействие электромагнитным полем. Особенность высокочастотного электромагнитного (ВЧ ЭМ) воздействия в сравнении с другими термическими способами заключается в возникновении в продуктивном пласте объемных тепловых источников.

Рассматривается нестационарная работа скважины при одновременном тепловом воздействии на околоскважинную зону, которая описывается уравнениями пьезопроводности (1) и конвективной теплопроводности (2) с выражением для плотности источников тепла в пласте:

$$\varphi_m \beta_{mt}\left(\frac{\partial P_m}{\partial t}-\frac{\delta_o}{\beta_o}\frac{\partial T_m}{\partial t}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k_m}{\mu_o}a(G)\frac{\partial P_m}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k_m}{\mu_o}a(G)\frac{\partial P_m}{\partial y}\right), \tag{1}$$

$$\alpha_{mt}\frac{\partial T_m}{\partial t}-\varphi_m \eta_o \rho_o c_o \frac{\partial P_m}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{xt}\frac{\partial T_m}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{yt}\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)-$$
$$-\rho_o c_o\left(\upsilon_{m_x}\frac{\partial T_m}{\partial x}+\upsilon_{m_y}\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)+q^{(E)}, \tag{2}$$

где $a(G)$ – приближенная аппроксимация нелинейного закона фильтрации; φ_m, k_m – пористость и проницаемость пласта; β_{mt} – общая сжимаемость системы в пласте; ρ_o – плотность нефти; c_o – удельная теплоемкость нефти; α_{mt}, λ_{mt} – объемная теплоемкость и теплопроводность в пласте, δ_o – коэффициент термического расширения нефти, $q^{(E)}$ – плотность источников тепла, P_m, T_m – давление и температура в пласте соответственно.

При моделировании нелинейной фильтрации высоковязкой жидкости при ВЧ ЭМ воздействии установлено, что темпы падения притока жидкости в скважине с учетом предельного градиента давления кратно отличаются. В процессе воздействия ВЧ ЭМ полем величина притока жидкости к скважине значительно возрастает тем больше, чем меньше предельный градиент давления. После отключения воздействия величина притока жидкости к скважине снижается, но количественно значение дебита жидкости остается гораздо выше, чем без воздействия электромагнитным полем.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-11-20042).

Список литературы

1. Xu J. et al. Non-Darcy flow numerical simulation for low-permeability reservoirs // SPE 154890.

2. Байков В. А., Колонских А. В., Макатров А. К., Политов М. Е., Телин А. Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторные фильтрационные исследования керна Приобского месторождения // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». 2013. № 2, вып. 31. С. 4–7.

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИИ ЖИДКОСТИ НА ДИНАМИКУ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ

Е. В. Орлик*, О. Б. Бочаров *

Бейкер Хьюз
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а
* *orlik.evgeniy@gmail.com*

В работе рассмотрено влияние соединительной муфты на течение ньютоновской и неньютоновской жидкости в кольцевом горизонтальном канале при наличии частиц шлама в потоке. Рассмотрено влияние реологии жидкости на динамику седиментационного слоя в окрестности муфты. Показано, что вниз по потоку за муфтой может наблюдаться эрозия седиментационного слоя и неньютоновские свойства жидкости увеличивают область эрозии седиментационного слоя.

При наклонно-направленном бурении (ННП) остро стоит проблема выноса шлама из скважины. Недостаточная очистка ствола скважины может привести к образованию шламовых пробок при бурении. В процессе бурения циркуляция раствора в скважине осуществляется в кольцевом пространстве переменного сечения между бурильной колонной и внешней стенкой. Изменение поперечной площади обусловлено тем, что трубы соединяются муфтами, имеющими больший диаметр.

Буровые растворы представляют собой сложные по реологии жидкости, имеющие неньютоновские свойства, когда вязкость зависит от скорости сдвига течения. Модели турбулентного течения таких жидкостей были разработаны сравнительно недавно, и гидродинамика турбулентного течения неньютоновской жидкости в кольцевых каналах с муфтами мало изучена.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования режимов течения и седиментации шлама в наклонных кольцевых каналах постоянного сечения, однако влиянию соединительных муфт на перенос шлама не уделяется должного внимания из-за сложности проблемы, хотя известно, что муфты оказывают существенное влияние на гидродинамику и перепад давления для случая однофазного потока.

В данной работе методом численного моделирования рассматривалось формирование седиментационного осадка в окрестности соединительной муфты в кольцевом горизонтальном канале при течении жидкости с ньютоновскими и неньютоновскими свойствами, которые хорошо описываются степенным индексом n и предельным напряжением сдвига τ_0 (рис. 1).

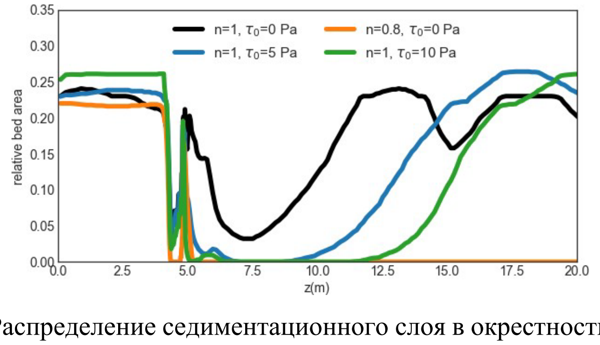


Рис. 1. Распределение седиментационного слоя в окрестности муфты

Условия моделирования и геометрия канала выбраны, соответствующими реальным условиям бурения: диаметр соединительной муфты 6,625 дюйма, длина муфты 22 дюйма и эксцентриситет на муфте 0,8. Рассматривалось влияние степенного индекса n в диапазоне 0,6–1 и влияние величины предельного сдвига τ_0 0–10 Па при фиксированном расходе несущей фазы 2653 л/мин и при отсутствии вращения бурильной колоны.

При течении неньютоновской жидкости глубина и область размытия осадочного слоя за муфтой увеличивается, т. е. область восстановления осадочного слоя до своего невозмущенного состояния муфтой сдвигается вниз по потоку и даже может наблюдаться полная эрозия седиментационного слоя за муфтой при $n = 0{,}8$ (рис. 1).

ИССЛЕДОВАНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ИЗ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ, ИМИТИРУЮЩИХ ГОРНУЮ ПОРОДУ, С ПОМОЩЬЮ ТРАДИЦИОННЫХ ВЫТЕСНЯЮЩИХ АГЕНТОВ И НАНОФЛЮИДОВ

А. И. Пряжников[1⁑], М. И. Пряжников[1,2], А. Д. Скоробогатова[1], А. В. Минаков[1,2*]

[1]Сибирский федеральный университет
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
⁑ andron2793@yandex.ru

Проведено систематическое исследование процесса вытеснения нефти из микрофлюидного чипа, имитирующего пористую структуру горной породы, с помощью полимерных растворов и наносуспензий. Использовались полимерные растворы полиакриламида, а также суспензии наночастиц оксидов металла. Впервые выполнен сравнительный анализ эффективности вытеснения нефти полимерными растворами и наносуспензиями с разным размером наночастиц в широком диапазоне концентрацией добавок. В результате было показано, что, при прочих равных условиях, приращение коэффициента вытеснения нефти дает сопоставимые результаты при добавке наночастиц, а в ряде случаев превосходит растворы полимеров. При этом было показано, что с уменьшением размера наночастиц эффективность вытеснения с помощью наносуспензий может быть дополнительно повышена.

Микрофлюидные исследования на микромоделях горной породы становятся альтернативой традиционному заводнению керна [1]. Развитие микрофлюидики связано со значительным уменьшением размеров устройств и улучшением их технических характеристик. Современные микрофлюидные модели пористой среды активно используются в исследованиях по увеличению нефтеотдачи [2]. Актуальность исследования связана с созданием и подбором состава вытесняющих жидкостей для увеличения нефтеотдачи при заводнении.

В работе проведена серия экспериментов по заводнению микрофлюидных чипов, имитирующих сложную пористую структуру, различными вытесняющими жидкостями. В качестве вытесняющих жидкостей использовались вода, полимерные растворы, а также суспензии наночастиц. Были приготовлены около десяти полимерных растворов. В качестве полимера использовались полиакриламиды, отличающиеся молекулярной массой и плотностью заряда (производство ЗАО «Москва-Штокхаузен» и ОАО «Полифлок»). Рассмотрено три массовых концентрации полиакриламида в растворе: 0,01, 0,05 и 0,1%. Также было приготовлено около десяти нанофлюидов. Часть из них была получена путем разбавления высококонцентрированных силиказолей, а другая стандартным двухшаговым методом из порошка и дистиллированной воды. Массовая концентрация составляла в основном 0,1 %. Размер варьировался от 10 до 47 нм. Использовались наночастицы оксида кремния, оксида алюминия и оксида титана. Проведена характеризация размеров наночастиц с помощью электронной микроскопии и методом акустической спектроскопии. Коллоидная устойчивость рассматриваемых суспензий контролировалась при помощи оптического анализатора устойчивости.

В работе использовался микрофлюидный чип (Dolomite: 3200284), моделирующий сложную структуру пористой горной породы, с исследовательскими приложениями в области нефтедобычи. Микрофлюидный чип изготовлен травлением натриево-известкового стекла фтористым водородом с последующим термосклеиванием. Размер пористой области микрофлюидного чипа составляет 10 мм × 60 мм, а сам чип размером 92,5 мм × 15,0 мм и толщиной 4 мм. Чип имеет один вход и один выход. Чип вначале заполнялся полностью нефтью, а затем происходил процесс заводнения вытесняющей жидкостью при фиксированном расходе. Прокачивалось несколько поровых объёмов. Картина процесса заводнения фиксировалась высокоскоростной камерой, которая сохраняла видеозапись для дальнейшего анализа. После каждого эксперимента микрофлюидный чип последовательно тщательно промывался. Детальная постановка эксперимента по изучению процесса вытеснения нефти из микрофлюидного чипа, имитирующего горную породу, представлена в [3].

Проведена серия экспериментов по заводнению микрофлюидных чипов, имитирующих однородную пористую структуру, различными вытесняющими агентами. В микрофлюидный чип, полностью заполненный нефтью, подавалась жидкость с постоянным расходом. Использовался образец нефти с динамической вязкостью 15,7 мПа с и плотностью 861 кг/м^3. Как известно, характер двухфазного течения при вытеснении через пористую среду определяется капиллярным числом (отношением вязких и капиллярных сил). Расход варьировался в широком диапазоне, что позволяло моделировать различные режимы вытеснения (от капиллярного до напорного режима вытеснения).

Анализ результатов микрофлюидного исследования полимерного заводнения показал, что с увеличением концентрации полимера коэффициент вытеснения значительно возрастает. Так, при массовой концентрации полимера марки 2540 равной 0,1 масс.% получено приращение коэффициента вытеснения нефти по сравнению с водой на уровне 23 %. Исследование влияния различных полимеров на эффективность вытеснения нефти показало, что максимальной эффективности нефтевытеснения при прочих равных условиях удается достичь с использованием полиакриламида марки 2540 (плотность заряда 30 % и молекулярная масса 12–14 млн ед.)

Впервые выполнен сравнительный анализ эффективности вытеснения нефти полимерными растворами и наносуспензиями с разным размером наночастиц в широком диапазоне концентрацией добавок. В результате было показано, что при прочих равных условиях приращение коэффициента вытеснения нефти дает сопоставимые результаты при добавке наночастиц, а в ряде случаев превосходит растворы полимеров. При этом было показано, что с уменьшением размера наночастиц эффективность вытеснения с помощью наносуспензий может быть дополнительно повышена. Помимо этого, выполнен сравнительный анализ потерь давления при закачке растворов полимеров и наносуспензий в микрофлюидный чип на различных стадиях нефтевытеснения. Показано, что при вытеснении нефти растворами полимеров потери давления на прокачку более чем в шесть раз выше, чем при вытеснении наносуспензиями, что, как сказано выше, обусловлено существенными различиями в вязкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRZ-2020-0012).

Список литературы

1. Минаков А. В., Пряжников М. И., Пряжников А. И., Якимов А. С., Денисов И. А., Лобасов А. С., Немцев И. В., Рудяк В. Я. Применение микро- и нанофлюидных технологий в задачах увеличения нефтеотдачи // Нефть. Газ. Новации. 2022. № 2. С. 68–72.

2. Filimonov S. A., Pryazhnikov M. I., Pryazhnikov A. I., Minakov A. V. Development and Testing of a Mathematical Model for Dynamic Network Simulation of the Oil Displacement Process // Fluids vol. 7(9), pp. 311, 2022.
3. Pryazhnikov M. I., Minakov A. V., Pryazhnikov A. I., Denisov I. A., Yakimov A. S. Microfluidic Study of the Effect of Nanosuspensions on Enhanced Oil Recovery // Nanomaterials vol. 12(3), pp. 520, 2022.

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ ГАЗА В ГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ

И. И. Рожин[1⁑], Г. И. Иванов[1,2] *

[1]Институт проблем нефти и газа СО РАН, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН
677980, Российская Федерация, Якутск, ул. Петровского, 2
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
677000, Российская Федерация, Якутск, ул. Белинского, 58
⁑ i_rozhin@mail.ru

Численно исследовано влияние компонентного состава газовой смеси на основные параметры процесса её закачки в подмерзлотные водоносные горизонты с целью хранения в гидратном состоянии: динамику распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, давления и температуры в коллекторе. Вычислительный эксперимент проведен в рамках математической модели нагнетания газа через одиночную скважину в горизонтальный пласт, в которой учтены все основные физические и термодинамические особенности процесса гидратообразования, в том числе сжимаемость газа, эффект Джоуля – Томсона, адиабатическое расширение, неизотермическая фильтрация воды и газа, массообмен между газом, водой и гидратом.

Актуальность исследований возможности подземного хранения природного газа определяется необходимостью повышения надежности и эффективности систем энергоснабжения в северных регионах. Эти регионы имеют термодинамические предпосылки для хранения газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Также одним из важных направлений подземного хранения газа является утилизация попутного нефтяного газа и диоксида углерода в пористых коллекторах в гидратном состоянии.

Ранее в работе [1] была оценена концептуальная возможность подземного хранения природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах. Она основана на использовании математической модели многофазной неизотермической фильтрации реального газа и воды. В этой модели наиболее полно учтены основные физические особенности этого процесса: реальные свойства газа, эффект Джоуля – Томсона, совместное движение воды и газа в однородной пористой среде, массообмен между газом и водой с гидратом. При этом используются модифицированные уравнения теории неизотермической многофазной фильтрации, которые выводятся на основе фундаментальных законов сохранения массы и энергии. В качестве уравнений движения используется обобщенный закон фильтрации Дарси для движущихся фаз, коэффициенты проницаемости в котором являются функциями насыщенности соответствующей фазой. Математическую модель замыкают: уравнение состояния реального газа; зависимости фазовых проницаемостей от соответствующих насыщенностей; зависимость температуры гидратообразования T_{h} от давления p газа, коэффициенты которой определяются по компонентному составу газовой смеси. Граничные условия соответствовали постоянству температуры и расхода нагнетаемого газа, внешний контур водоносного пласта допускает течение воды за её пределы [1].

При вычислительном эксперименте пористость коллектора принята равной 0,15; его коэффициент проницаемости – $8 \cdot 10^{-13}$ м^2, начальная водонасыщенность – 0,8; начальная гидратонасыщенность – 0 (остальные параметры такие же, как в работе [1]).

Варьировались расход нагнетаемого газа (1 м^3/сут и 5 м^3/сут) и его компонентный состав, который соответствовал:

а) природному газу (ПГ): CH_4 – 93,90; C_2H_6 – 4,44; C_3H_8 – 1,10; i-C_4H_{10} – 0,087; n-C_4H_{10} – 0,108; CO_2 – 0,035; N_2 – 0,33 (об. доли, %); газовая постоянная смеси $R = 486{,}036$ Дж/(кг·К); критические давление и температура – p_c = 4,605·10^6 Па; $T_c = 197{,}892$ К; коэффициенты равновесной температуры гидратообразования $T_h = \alpha_1 \ln p + \alpha_2$ имеют значения $\alpha_1 = 7{,}743$ К, $\alpha_2 = 166{,}581$ К;

б) попутному нефтяному газу (ПНГ): CH_4 – 66,87; C_2H_6 – 6,42; C_3H_8 – 12,06; i-C_4H_{10} – 2,65; n-C_4H_{10} – 5,37; n-C_5H_{12} – 1,77; n-C_6H_{14} – 0,24; CO_2 – 2,62; N_2 – 2,00 (об. доли, %); $R = 321{,}808$ Дж/(кг·К); $p_c = 4{,}53 \cdot 10^6$ Па; $T_c = 245{,}297$ К; $\alpha_1 = 6{,}926$ К; $\alpha_2 = 184.505$ К.

Результаты показали, что при закачке ПНГ пласт нагревается больше. В случае малого расхода давление газов в хранилище со временем растет. Давление ПНГ немного больше, чем давление ПГ, и эта разница с течением времени увеличивается. А в случае нагнетания газов с большей интенсивностью начиная с 61 суток для ПНГ (с 67 суток для ПГ) давление монотонно падает почти до начального пластового значения.

Вблизи забоя нагнетательной скважины часть воды переходит в гидрат, остальная часть вместе с нагнетаемым газом движется по пласту. Для обоих газов поля водонасыщенности практически совпадают. В конце процесса нагнетания на контуре хранилища водонасыщенность увеличивается до 0,85 при малом расходе, тогда как при большом расходе она уменьшается до 0,45 (так как вода вытесняется газом за пределы хранилища).

Забой нагнетательной скважины будет насыщен гидратами (рис. 1): гидратонасыщенность ν в конце закачки ПНГ при меньшем расходе достигает значения 0,42; в случае ПГ – 0,58; при большом расходе в случае ПНГ – 0,67; в случае ПГ – 0,70 (на рис. 1 эти значения урезаны). При меньшей интенсивности нагнетания газов гидратонасыщенность монотонно возрастает по площади хранилища и в конце процесса закачки ПНГ на контуре хранилища она равна 0,06; в случае природного газа – 0,05. При большей интенсивности нагнетания газов для полей температуры, давления и гидратонасыщенности заметен «вал», начиная с вышеуказанных времен эти величины монотонно уменьшаются из-за вытеснения воды из хранилища. Профили поверхностей давления и гидратонасыщенности идентичны, что указывает – для образования гидратов основной движущей силой является давление.

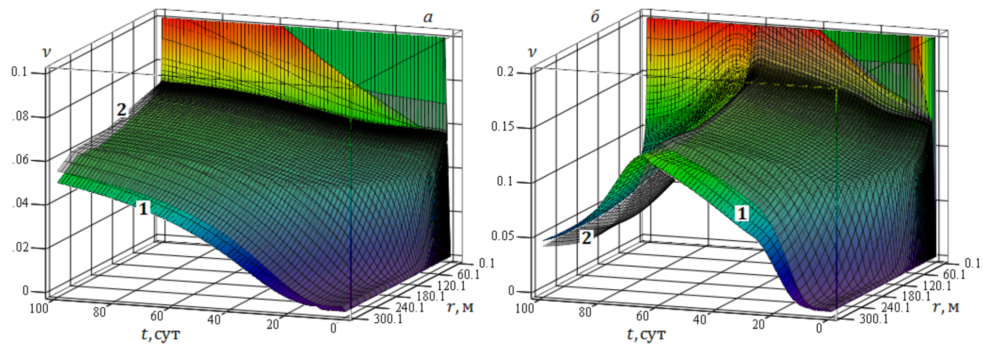


Рис. 1. Поле гидратонасыщенности: для ПГ (поверхность 1) и ПНГ (поверхность 2);
а – при расходе газа 1 м^3/с; *б* – 5 м^3/с

Анализ динамики изменения основных показателей создания подземного хранилища показал, что в случае ПНГ водонасыщенность немного ниже, соответственно гидратонасыщенность выше, чем в случае ПГ. Следовательно, немаловажную роль играет компонентный состав закачиваемого газа, который влияет на равновесные условия образования газогидратов. PT-условия гидратообразования для ПНГ смещаются относительно PT-условий для ПГ в область более высоких температур и низких давлений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (Рег. № 122011100157-5).

Список литературы

1. Underground storage of natural gas in hydrate state: primary injection stage / E. A. Bondarev, I. I. Rozhin, V. V. Popov, K. K. Argunova // Journal of Engineering Thermophysics. 2018. Vol. 27, No. 2. Pp. 221–231. DOI: 10.1134/S181023281802008X.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК КОРЫ ЛИСТВЕННИЦЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

А. Д. Скоробогатова*, Е. И. Лысакова, А. В. Минаков *

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
* *taisvivat@mail.ru*

Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния добавок коры лиственницы на функциональные характеристики глинополимерных буровых растворов на водной основе. Исследовано влияние добавок коры на следующие физико-химические параметры глинополимерного бурового раствора: плотность, pH, реологические, фильтрационные, ингибирующие свойства и коллоидная устойчивость.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния добавок коры лиственницы различной модификации на функциональные характеристики глинополимерных буровых растворов на водной основе. Данная работа является продолжением исследования влияния на параметры глинополимерных буровых растворов добавок лигнина и его модификаций [1].

Проведено исследование реологических параметров буровых растворов с добавками коры. Было показано, что добавка коры приводит к увеличению вязкости буровых растворов. Было установлено, что с увеличением концентрации добавки коры мера консистенции и пластическая вязкость бурового раствора в целом возрастают, а предельное напряжение сдвига незначительно снижается.

Проведено исследование фильтрационных потерь буровых растворов с добавками коры различной модификации. Установлено, что добавки коры позволяют примерно на 20 % уменьшить фильтрационные потери глинополимерных буровых растворов на водной основе при концентрации добавки 2 масс.%.

Показано, что добавка коры приводит к значительному снижению плотности бурового раствора из-за существенного пенообразования. Было обнаружено, что добавки коры лиственницы могут приводить к образованию достаточно устойчивых пен при приготовлении буровых растворов. В ряде случаев это явление носит негативный характер, необходимо использовать пеногасители, но высокая пенообразующая способность может быть использована при разработке рецептур аэрированных буровых растворов с высоким содержанием воздуха.

Установлено, что добавка коры приводит к уменьшению pH буровых растворов с увеличением концентрации коры. Этот факт должен способствовать повышению устойчивости стенок скважины. Исследование ингибирующей способности буровых растворов показало, что все исследованные добавки коры различной модификации приводят к существенному замедлению скорости набухания глины. Так, было показано, что добавка 2 масс.% уменьшает скорость набухания глины практически в два раза.

Исследование коллоидной устойчивости глинополимерных буровых растворов с добавками коры различной модификации показало, что добавки коры слабо влияют на кинетику дестабилизации буровых растворов. При этом добавка коры приводит к незначительному увеличению коллоидной устойчивости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов, выполняемых в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRZ-2020-0012).

Список литературы

1. Михиенкова Е. И., Скоробогатова А. Д., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Минаков А. В., Калякина О. П., Кузьмин А. П., Судакова И. Г., Кузнецов Б. Н. Применение модифицированных гидролизных лигнинов в качестве компонентов буровых растворов на водной основе // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 10. С. 15–19.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ ПОРОДЫ ПРИ СВЧ-НАГРЕВЕ

Б. А. Усманов[‡]**, Р. Р. Зиннатуллин, А. А. Мусин** [*]

Уфимский университет науки и технологий
450076, Российская Федерация, Уфа, ул. Заки Валиди, 32
[‡] *bulatusman@mail.ru*

Приведены результаты физического и математического моделирования распределения температуры в образце нефтематеринской породы при одностороннем микроволновом облучении. Разработан и протестирован метод косвенного определения температурной зависимости коэффициента поглощения электромагнитной волны по экспериментальным данным температурной динамики. Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования, учитывающего зависимость диэлектрических параметров от температуры при СВЧ-нагреве, показало их качественную и количественную сходимость в достигнутом в эксперименте температурном диапазоне.

В качестве объекта исследования был выбран образец горной породы баженовской свиты. Нагрев производился установленным с одной из сторон магнетроном с волноводом (ω = 2,45 ГГц, P = 800 Вт). Образец был теплоизолирован. Замер температуры по длине проводился при помощи системы термопар, помещённых на поверхность образца, и регистратора температуры.

При построении математической модели насыщенная пористая среда рассматривается как сплошная среда с осредненными значениями физических величин. Рассматривается однотемпературная постановка задачи.

Распределение температуры определяется из решения уравнения теплопроводности с распределенными источниками тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\Delta T + \frac{q}{c\rho}$$

где $c\rho$ – объемная теплоемкость; λ– коэффициент теплопроводности; q – плотность распределенных источников тепла.

Считается, что в начальный момент времени распределение температуры однородно, а все грани образца теплоизолированы:

$$T(t=0) = T_0\,; \qquad \nabla T_{|\Gamma} = 0,$$

где Г – граница расчётной области.

В соответствии с условиями проведения эксперимента плотность распределенных источников тепла записывается с учетом затухания электромагнитной волны:

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r}$$

где α – коэффициент поглощения электромагнитной волны; P_0 – плотность потока энергии, излучаемой магнетроном; r – длина проникновения электромагнитной волны в образец, отсчитываемая от точки вхождения.

Температурная зависимость коэффициента поглощения волны α определяется путём решения обратной задачи. Формула распределённых источников тепла разделяется и делится на r, и производится замена $\gamma = 2\alpha r$:

$$q = 2\alpha P_0 e^{-2\alpha r} = \frac{P_0 \gamma e^{-\gamma}}{r}$$

Затем из уравнения теплопроводности выражается q. Слагаемое $\lambda \Delta T$ много меньше $c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$, поэтому им пренебрегается:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}\Delta T + \frac{q}{c\rho} \Rightarrow q = c\rho\frac{\partial T}{\partial t} - \lambda\Delta T \simeq c\rho\frac{\partial T}{\partial t}$$

Два выражения q приравниваются, и из этого уравнения выражается $\gamma e^{-\gamma}$:

$$\gamma e^{-\gamma} = \frac{rc\rho\frac{\partial T}{\partial t}}{P_0}$$

Производная температуры по времени дискретизируется, и рассчитывается по экспериментальным данным. Правая часть этого уравнения обозначается как Φ. Получается следующее уравнение:

$$\gamma e^{-\gamma} = \Phi \Rightarrow \gamma = -W(-\Phi)$$

где W обозначает функцию Ламберта. Наконец, рассчитываются значения коэффициента поглощения α:

$$\alpha = \frac{\gamma}{2r}$$

Полученные значения α сопоставляются соответствующим средним арифметическим температур, по которым они были рассчитаны. В итоге получается набор точек, который в первом приближении был аппроксимирован линейной зависимостью (рис. 1).

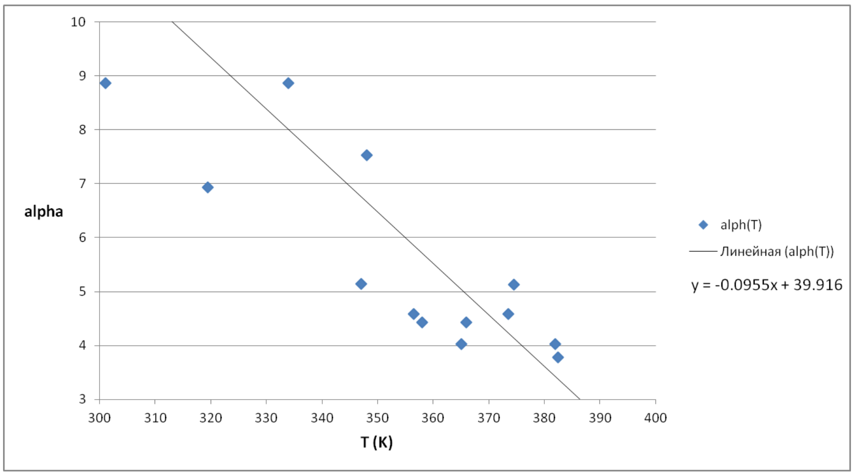


Рис. 1. Аппроксимация значений коэффициента поглощения α при определённых температурах, рассчитанных по данным первой и второй термопар

Полученная температурная зависимость вводится в численную модель (рис. 2).

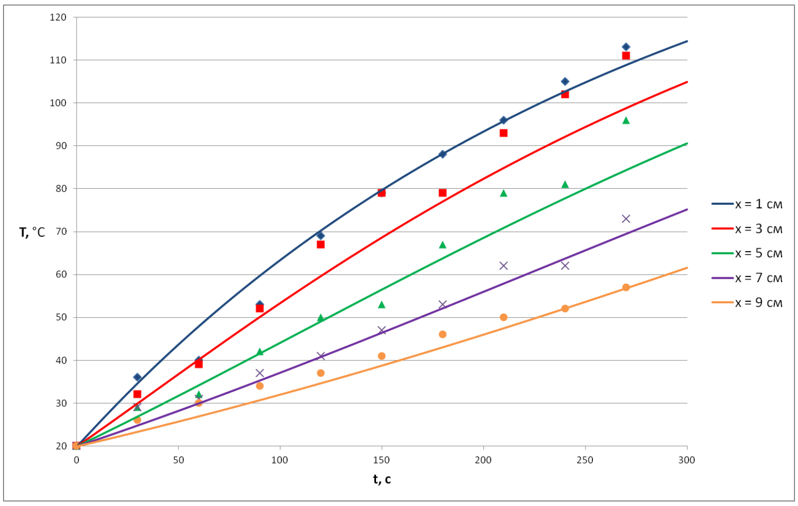


Рис. 2. Динамика температуры на 1, 3, 5, 7 и 9 см; маркеры – эксперимент, линии – расчёт

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСА ШЛАМА С ПОМОЩЬЮ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ

А. В. Шебелев*, В. А. Жигарев, Д. В. Гузей, Е. И. Лысакова *

Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
* *aleksandr-shebelev@mail.ru*

Было проведено численное исследование выноса шлама из кольцевого канала с помощью различных буровых растворов, модифицированных наночастицами. Получены картины течения в кольцевом канале, а также интегральные характеристики.

Актуальной проблемой для нефтегазовой промышленности являются буровые растворы с нужными характеристиками. Для решения этой проблемы были подготовлены буровые растворы: на основе минерального масла и на основе глины. Первые получались путем смешивания базового масла и воды, для стабилизации получившейся эмульсии использовался эмульгатор, далее в получившуюся смесь вводили наночастицы SiO_2. Вторые получались путем добавления монтмориллонитовой глины в дистиллированную воду и интенсивным перемешиванием. После приготовления глинистая суспензия для стабилизации свойств выдерживалась в течение двух суток для окончательного набухания глины. Далее в глинистую суспензию вводилась наносуспензия. Были приготовлены растворы с разным содержанием наночастиц (от 0 до 2 %). Неньютоновские свойства полученных растворов описываются с помощью модели Гершеля – Балкли (табл. 1).

$$\mu = \left(\tau_0 + k_v \gamma^n\right) \gamma^{-1}$$

где τ_0 – предел текучести, Па; k_v – показатель консистенции, Па с; n – индекс течения, γ – скорость сдвига.

Таблица 1

Параметры бурового раствора на основе минерального масла

w, % наночастиц	τ_0, Па	k_v, Па·с	n	ρ, *кг/м^3*
0	4,57	0,69	0,57	993
0.25	5	0,75	0,57	993
0.5	4,96	0,73	0,58	993
1	4,98	0,72	0,58	993
2	5,13	0,77	0,6	993

Для моделирования дисперсного течения применяется подход Эйлера, при котором каждая фаза моделируется сплошной средой.

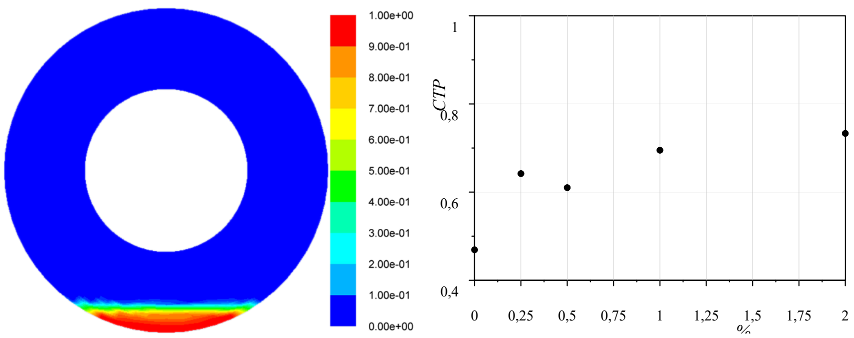
Для решения данной задачи был построен кольцевой канал с внешним диаметром *D1 = 0,02 м,* внутренним *D2 = 0,01 м*, диаметр частиц шлама $d = 0{,}0015$ м, плотность шлама $\rho = 2900$ кг/м^3. Объемная концентрация шлака на входе составляла 30 %. Длина тестовой секции составляла 100D, вследствие чего достигался полностью развитый профиль течения.

На стенках задавались условия прилипания для всех фаз, на входе – ударный профиль скорости, на выходе – условие постоянного давления.

Для аппроксимации уравнений на скорость, дисперсную фазу и время использовалась противопоточная центрально-разностная схема второго порядка точности.

Для определения эффективности переноса шлама несущей жидкостью был введен параметр CTP (cutting transport performance), который определяется как отношение осредненной по объему скорости частиц к осредненной по объему скорости жидкости. Если CTP=1, то все частицы вымываются из канала, если CTP = 0, то все частицы остаются в канале.

На рис. 1 показано распределение второй фазы в поперечном сечении канала вблизи выхода и зависимость CTP от содержания наночастиц в базовом растворе для бурового раствора на основе минерального масла.



а б

Рис. 1. Распределение второй фазы в поперечном сечении канала вблизи выхода (*а*) и график зависимости CTP от содержания наночастиц в базовом растворе (*б*)

При добавлении наночастиц в базовый раствор перенос шлама увеличивается с 0,46 до 0,77, при этом перепад давления увеличивается только на 30 %. В целом предложенные буровые растворы показывают хорошую эффективность по выносу шлама.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-30022.

Список литературы

1. Gillies R. G., Shook C. A., Xu J. Modelling heterogeneous slurry flow at high velocities // Can. J. Chem. Eng., vol. 82, № 5, pp. 1060–1065, 2004.

2. Cheng Z., Hsu T.-J., Calantoni J. SedFoam: a multi-dimensional Eulerian two-phase model for sediment transport and its application to momentary bed failure // Coastal Eng., vol. 119, pp. 32–50, 2017.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ НЕФТЬ-ВОДА В ПРЯМОМ Y-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ

А. А. Шебелева[1‡], А. В. Минаков[1,2], А. К. Округина[1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
‡ ashebeleva@sfu-kras.ru

Проведено экспериментальное исследование режимов течения воды и нефти в прямом Y-образном микроканале. Эксперимент проводился при фиксированном значении расхода нефти и варьируемом расходе воды. В ходе эксперимента были установлены следующие режимы течения: снарядный, параллельный, капельный. Было выявлено, что между режимами существует переходная область, в границах которой режим не являлся установившимся, а происходит циклическая смена одного режима на другой. На основе полученных результатов построена карта режимов течения.

Проведено экспериментальное исследование режимов течения воды и нефти в прямом Y-образном микроканале. Предварительно были измерены свойства исследуемых жидкостей (табл. 1). Экспериментальное исследование проведено на чипе с Y-образным микроканалом, изготовленным из полимера (ПДМС) [1]. Специальной обработки поверхности канала для придания поверхности гидрофильности или гидрофобности не производилось. Поперечные размеры входных каналов составляли 40 × 40 мкм, выходных каналов 40 × 80 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру 53,3 мкм. Длина входного канала равнялась 3000 мкм, выходного 10000 мкм.

Таблица 1

Физические свойства жидкостей, исследуемых в эксперименте

Параметр	Вода	Нефть
Плотность, ρ, кг/м^3	997	826
Вязкость, μ, кг/м·с	0,000894	0,008471
Коэф. поверхн. натяжения, σ, кг·м^2/с^2	0,0224	0,0224

Эксперимент проводился при фиксированном значении расхода нефти (подавалась снизу) и варьируемом расходе воды (подавалась сверху). В ходе эксперимента были получены следующие режимы течения: снарядный, параллельный, капельный.

Снарядный режим течения наблюдается при малых расходах воды и нефти. На рис. 1 представлена картина течения снарядов при постоянном расходе нефти $Q_o = 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ м^3/с и расход воды варьировался в диапазоне $3{,}3 \cdot 10^{-11} \le Q_w \le 8{,}3 \cdot 10^{-12}$ м^3/с. Как видно из рисунка, с увеличением расхода воды наблюдается рост длины снаряда. Снарядный режим течения при постоянном расходе нефти $Q_o = 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ м^3/с в микроканале Y-типа реализуется в следующих диапазонах критериев подобия: $Re_w < 0{,}62$, $We_w < 2{,}58 \cdot 10^{-4}$, $Ca_w < 4{,}16 \cdot 10^{-4}$. Дальнейшее увеличение расхода воды приводило к переходу в параллельный режим течения.

Параллельный режим течения наблюдается при более высоких расходах воды в диапазоне чисел Вебера по нефти $1{,}33 \cdot 10^{-5} \le We_o \le 3{,}41 \cdot 10^{-3}$ м^3/с. В этом режиме жидкости в канале смешения движутся слоями параллельно друг другу. При таких скоростях течения силы инерции значительно превышают силы межфазного натяжения, и граница раздела между жидкостями практически плоская. Было установлено, что параллельный режим течения при постоянном расходе нефти $Q_o = 6{,}7 \cdot 10^{-11}$ м^3/с в микроканале Y-типа реализуется в следующих диапазонах критериев подобия: $6{,}2 \le Re_w \le 15{,}5$; $2{,}58 \cdot 10^{-2} \le We_w \le 0{,}161$; $4{,}16 \cdot 10^{-4} \le Ca_w \le 1{,}04 \cdot 10^{-2}$.

Увеличение расхода нефти приводит к формированию капельного режима течения. В этом режиме поток нефти отрывает отдельные капли от струи воды. Минимальный размер капель, как правило, меньше ширины микроканала, в отличие от снарядов, длина которых сопоставима с шириной канала. Капельный режим течения, который фиксируется при постоянном расходе нефти $Q_o = 1{,}3 \cdot 10^{-10}$ м^3/с и расход воды варьировался в диапазоне $8{,}3 \cdot 10^{-12} \le Q_w \le 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ м^3/с. С увеличением расхода воды размер капли увеличивается, а расстояние между каплями уменьшается.

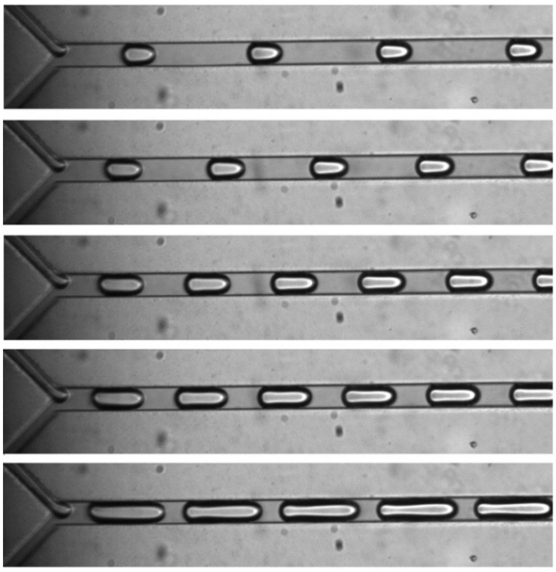


Рис. 1. Снарядный режим течения при фиксированном расходе нефти $Q_o = 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ м^3/с и варьируемом расходе воды (сверху вниз) $Q_w = 8{,}3 \cdot 10^{-12}$ м^3/с; $Q_w = 1 \cdot 10^{-11}$ м^3/с; $Q_w = 1{,}3 \cdot 10^{-11}$ м^3/с; $Q_w = 1{,}7 \cdot 10^{-11}$ м^3/с; $Q_w = 3{,}3 \cdot 10^{-11}$ м^3/с.

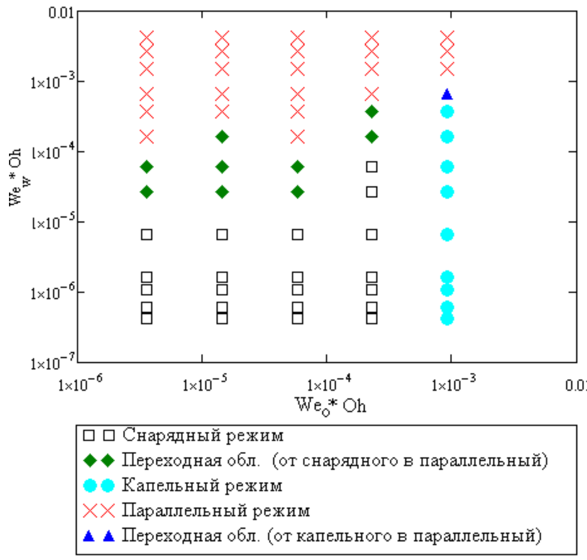


Рис. 2. Карта режимов течения вода-нефть в координатах чисел Вебера и комплекс WeOh

На основе экспериментальных данных построена карта режимов течения в координатах произведения чисел Вебера на Онезорге We×Oh (рис. 2). Данный безразмерный параметр учитывает вязкость жидкостей. Чем меньше число Онезорге, тем слабее потери на трение из-за сил вязкости, т. е. большая часть энергии переходит в энергию создания новой поверхности за счет сил поверхностного натяжения, формируется капля. При высоких значениях числа Онезорге вся энергия системы диссипирует за счет вязкостных сил, а капли не формируются. Проведено экспериментальное исследование режимов течения в прямом Y-образном микроканале. В ходе эксперимента установлены следующие режимы течения: снарядный, параллельный, капельный. Было выявлено, что между режимами существует переходная область, в границах которой режим не являлся установившимся, а происходит циклическая смена одного режима на другой.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRZ-2020-0012).

Список литературы

1. 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., vol. 8(2), pp. 655–670, 2022.

CUTTINGS TRANSPORT SIMULATION AT CRITICAL TRANSPORT FLUID VELOCITY

A. Gavrilov[1], Ya. Ignatenko[2⁎], R. Aragall[3], O. Bocharov[2] *

[1]Krasnoyarsk Division of Kutateladze Institute of Thermophysics of SB RAS
660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, buiding 44
[2]Novosibirsk Technology Center of Baker Hughes
630090, Russia, Novosibirsk, Kutateladze 4a
⁎E-mail: yaroslav.ignatenko@bakerhughes.com
[3]Celle Technology Center of Baker Hughes
29221, Germany, Celle, Baker-Hughes-Straße, 1

In the present study, the Eulerian-Eulerian approach and non-equilibrium mixture model were used to simulate Larsen experiments [1]. A three-dimensional unsteady flow simulations and two-dimensional steady-state simulations were carried out to describe the movement of drilling fluid and cuttings in an unsteady turbulent flow modeled by URANS k-ω SST turbulence model.

Simulation of cuttings-fluid flow in a D_o=0.127 *m* diameter well with a D_i=0.060325 *m* diameter drill pipe is carried out. The drilling string rotates at 50 revolutions per minute and is offset downward at 62% eccentricity. The particle flow rate corresponds to a drilling rate of penetration of drilling bit (ROP) of 10 *m/h*. The borehole inclination varies from 20° to 90°. The drilling fluid velocity corresponds to the critical velocity found in Larsen's [1] experiments for cuttings transport without a dense sediment (cuttings bed). In the experiments drill pipe eccentricity was fixed without lateral motion. Cuttings particles are considered spherical with a diameter d_p = 7 *mm* and density ρ_p=2570 *kg/m³*. Herschel-Bulkley drilling fluid parameters: consistency index k_v= 0.18 $Pa \cdot s^n$, power-law index n=0.59, yield stress τ_y=0.4 *Pa* and density ρ_f =1027 *kg/m³*. Reynolds number for Herschel-Bulkley fluid is taken from study [2]. Parameters of the considered modes are given in Table 1.

Table 1

Flow parameters

incl,deg	U_f, *m/s*	Re
20	0.566	1086
40	1.029	2635
50	1.145	3083
60	1.241	3469
70	1.325	3819
80	1.248	3498
90	1.196	3286

The model utilizes the Euler representation of a two-phase disperse flow. The model for Newtonian carrier fluid is described in detail in the paper [3] and for non-Newtonian in [4]. The simulations were performed with a finite volume in-house CFD code. The highlights of the algorithm are detailed description can be found in works [5, 3].

In 2D steady-state simulation in cross-section means that flow is fully developed and uniform along the channel. In such simulation was used short channel with D_o length and two cells in axial direction. Periodic inlet-outlet boundary condition was used for velocity and concentration. Velocity and concentration was corrected while solution to achieve the required mud flow rate and required delivered particles concentration ROP.

In the 3D transient simulations, the channel length was chosen as $20D_h$. Periodic inlet-outlet boundary condition was used for velocity and concentration. Simulations were performed to correspond given ROP =10 *m/h*.

On the one hand, the 3D simulations show formation of small separated moving dunes at high inclination from vertical that transform into S-shape continuous moving dunes for experiments with low inclination (fig. 1). Moreover, behavior of the average cuttings velocity closely matches the experimental values (fig. 2). On the other hand, 2D steady-state simulations show disagreement against experiments, by overestimating cutting volume concentration. Likewise, average cuttings velocity is significantly underestimated, while trends are in agreement with the experiments (fig. 2). In the considered case, large-scale non-stationary mechanisms of cuttings transport play a significant role. The 2D steady-state approach is unable to capture those effects.

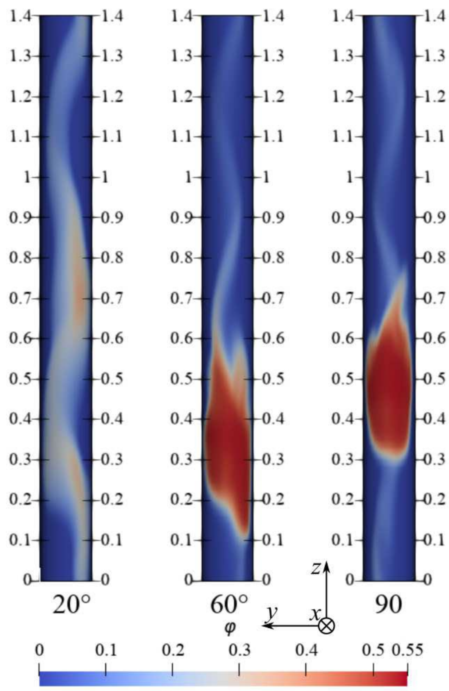


Fig. 1. Distribution of volume concentration at channel bottom surface. Inclination angle a = 20º,60º,90º

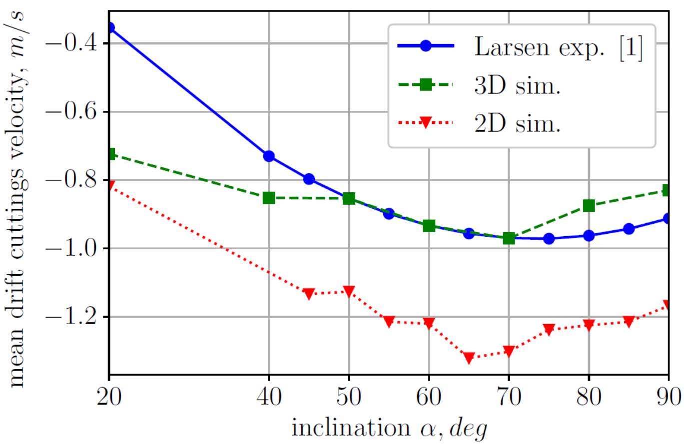


Fig. 2. Mean cuttings drift velocity. Comparison of simulation with T. Larsen [1] experiment.

While the 3D transient simulations can predict the complex behavior of these multiphase flows, the 2D approach requires implementation of additional effective forces responsible for the unsteadiness of the cuttings transport mechanisms.

The authors thank Baker Hughes for the permission to publish this paper.

References

1. Larsen Th. I. F. A Study of the Critical Fluid Velocity in Cuttings Transport for Inclined Wellbores. / Master thesis, The University of Tulsa, 1990.

2. Madlener K., Frey B., Ciezki H. K. Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids. // In Progress in Propulsion Physics, EDP Sciences, pp. 237-250, 2009.

3. Gavrilov A. A., Shebelev A. V. Rheology model for turbulent suspension flow through a horizontal channel. // Thermophysics and Aeromechanics, 27(3), May, pp. 381–397, 2020.

4. Ignatenko Ya. S., Gavrilov A. A., Bocharov O. B., May R. Cuttings transport simulation in large- diameter inclined borehole. // Polar and Arctic Sciences and Technology Petroleum Technology, American Society of Mechanical Engineers, vol 8, 2019.

5. Gavrilov A. A., Shebelev A. V. Single-fluid model of a mixture for laminar flows of highly concentrated suspensions. // Fluid Dynamics, 53(2), Mar., pp. 255–269, 2018.

Секция 8
«Теплофизика новых материалов»

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАРОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ФТОРИДОВ $(NH_4)_3MF_7$

Е. В. Богданов[1,2‡], М. В. Горев[1,3], И. Н. Флёров[1,3] *

[1]*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН*
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38
[2] *Красноярский государственный аграрный университет*
660049, Российская Федерация, Красноярск, пр. Мира, 90
[3]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[‡] *evbogdabov@iph.krasn.ru*

Выполнен анализ интенсивных и экстенсивных барокалорических свойств комплексных фторидов $(NH_4)_3M^{4+}F_7$ (M^{4+}: Ge, Si), испытывающих последовательные фазовые переходы типа порядок-беспорядок. Из-за высокой чувствительности к гидростатическому давлению и сильного разупорядочения шестикоординированных анионных и катионных полиэдров кристаллы $(NH_4)_3M^{4+}F_7$ демонстрируют значительные изменения энтропии и температуры при низком давлении, $p < 0.3$ ГПа.

В течение последнего десятилетия заметно вырос и продолжает расти интерес к баро- (БКЭ) и пьезокалорическим эффектам в связи с их исключительным преимуществом перед другими видами калорических эффектов [1]. Оба эффекта универсальны, так как фазовые переходы различной физической природы очень часто сопровождаются значительными изменениями линейной или объемной деформаций, которые в соответствии с соотношениями Максвелла $(\partial S/\partial\sigma)_T = (\partial L/\partial T)_\sigma$ и $(\partial S/\partial p)_T = (\partial V/\partial T)_p$ определяют степень баро- и пьезокалорической эффективности [2].

Комплексные фториды, содержащие квазиоктаэдрические анионные группы и имеющие обычно в исходной фазе сильно разупорядоченную кубическую структуру, при охлаждении претерпевают одиночные или последовательные фазовые переходы типа порядок-беспорядок [3, 4], близкие к трикритической точке и сопровождающиеся большим изменением энтропии [5, 6]. Уступая в ряде случаев другим материалам по абсолютным величинам БКЭ, фториды удовлетворяют широкому кругу других не менее важных требований, предъявляемых к перспективным твердотельным хладагентам [7].

В работе показано, что кристаллы $(NH_4)_3M^{4+}F_7$ (M^{4+}: Ge, Si) испытывают последовательные фазовые переходы с барическими коэффициентами разного знака, что является причиной реализации в них как обычных ($\Delta S_{BCE} < 0$), так и обратных ($\Delta S_{BCE} > 0$) БКЭ (рис. 1). Наибольшие значения изменения энтропии и температуры наблюдаются для обратного БКЭ при фазовых переходах между искаженными низкотемпературными фазами.

Изменение теплового расширения кристаллической решетки под давлением может приводить к дополнительному вкладу ΔS_{BCE}^{Lat} в полную энтропию твердых тел и в ряде случаев играть существенную роль в формировании БКЭ. Как видно из рис. 2, для $(NH_4)_3GeF_7$ увеличение БКЭ с ростом давления постепенно замедляется из-за вклада противоположного знака ΔS_{BCE}^{Lat}. Максимально возможное значение экстенсивного БКЭ, связанного с фазовым переходом первого рода ΔS_{BCE}^{P}, наблюдается уже при достаточно низком давления ~ 0.3 ГПа. При температурах выше комнатной большие величины экстенсивного (ΔS_{BCE} ~ 20 Дж/кгК) и интенсивного (ΔT_{AD} ~ 10 К) БКЭ в

$(NH_4)_3GeF_7$ и $(NH_4)_3SiF_7$ реализуются, главным образом, за счет значительного теплового расширения кристаллической решетки (рис. 1).

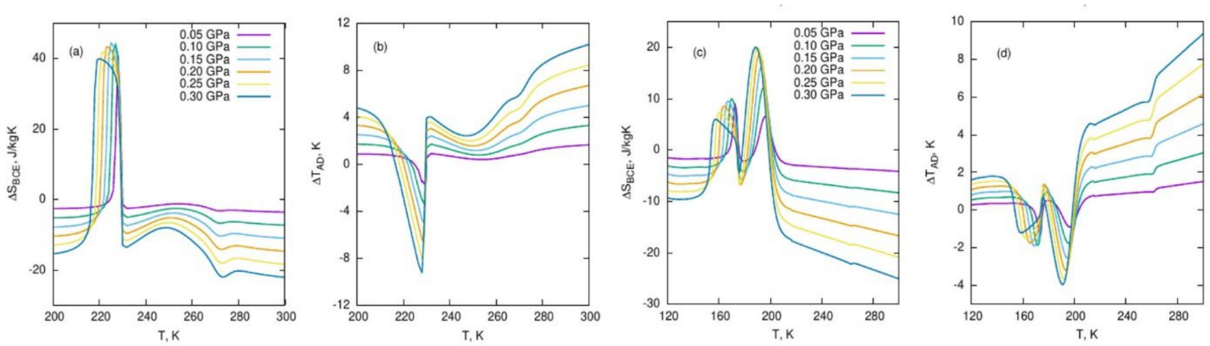


Рис. 1. Температурные зависимости экстенсивного (a, c) и интенсивного (b, d) БКЭ в $(NH_4)_3GeF_7$ (a, b) и $(NH_4)_3SiF_7$ (c, d)

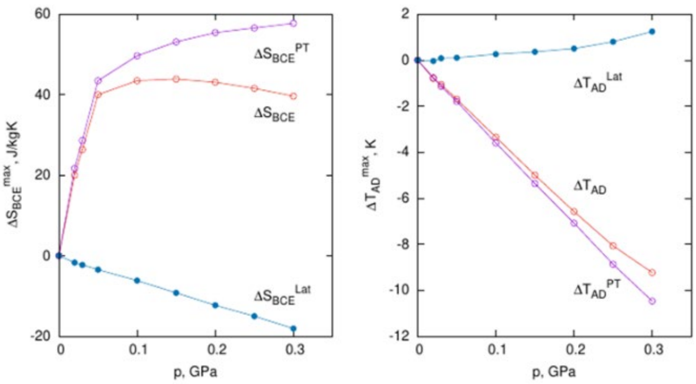


Рис. 2. Зависимости от давления максимальных значений экстенсивного (*a*) и интенсивного (*b*) БКЭ в $(NH_4)_3GeF_7$ вблизи фазового перехода первого рода при T_4

Замещение центрального атома, Si^{4+}(R_{Si} = 400 Å) → Ge^{4+}(R_{Ge} = 530 Å), вызывает изменение химического давления в структуре комплексных фторидов, которое оказалось действенным инструментом для варьирования характеристик фазовых переходов (температура, гистерезис, энтропия, деформация, чувствительность к внешнему давлению и др.) и, как следствие, параметров барокалорической эффективности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00115, https://rscf.ru/project/23-22-00115.

Список литературы

1. Greco A., Aprea C., Maiorino A., Masselli C. The environmental impact of a caloric heat pump working with solid-state materials based on TEWI analysis, AIP Conference Proceedings 2191 (1) (2019) 020091.

2. Gorev M., Bogdanov E., Flerov I. T-p phase diagrams and the barocaloric effect in materials with successive phase transitions, J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (38) (2017) 384002.

3. Flerov I., Molokeev M., Laptash N., Udovenko A., Pogoreltsev E., Mel'nikova S., Misyul S. Structural transformation between two cubic phases of $(NH_4)_3SnF_7$, Journal of Fluorine Chemistry 178 (2015) 86–92.

4. Mel'nikova S. V., Molokeev M. S., Laptash N. M., Misyul S. V. A non-typical sequence of phase transitions in $(NH_4)_3GeF_7$: optical and structural characterization, Dalton Trans. 45 (2016) 5321–5327.

5. Kartashev A., Gorev M., Bogdanov E., Flerov I., Laptash N. Thermal properties and phase transition in the fluoride, $(NH_4)_3SnF_7$, Journal of Solid State Chemistry 237 (2016) 269–

6. Bogdanov E. V., Kartashev A. V., Pogoreltsev E. I., Gorev M. V., Laptash N. M., Flerov I. N. Anomalous behaviour of thermodynamic properties at successive phase transitions in $(NH_4)_3GeF_7$ Journal of Solid State Chemistry 256 (2017) 162–167.

7. Lloveras P., Tamarit J.-L. Advances and obstacles in pressure-driven solid-state cooling: A review of barocaloric materials, MRS Energy and Sustainability 8 (2021) 3–15.

О ВОЗНИКНОВЕНИИ ИОННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОТОННОГО ОБМЕНА

В. А. Демин[*], М. И. Петухов, Р. С. Пономарев [*]

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Российская Федерация, Пермь, ул. Букирева, 15
[*] *demin@psu.ru*

Работа представляет собой теоретическое исследование динамики ионного пограничного слоя, формирующегося на межфазной границе «кристалл ниобата лития – расплав бензойной кислоты» в условиях, способствующих реакции протонного обмена, а именно замещения ионов лития в подложке ионами водорода в результате диссоциации молекул кислоты. Как следствие, вблизи поверхности кристалла присутствуют ионы лития и бензоат-ионы, которые рекомбинируют в процессе диффузии. В работе численно получены временны́е зависимости профилей концентрации и электрического потенциала. Производится оценка времени перехода рассматриваемой системы в стационарное состояние.

Протонный обмен активно применяется в технологии обработки кристаллических поверхностей с целью изменения их электрооптических свойств. Одним из наиболее частых вариантов реализации данного процесса является использование расплава бензойной кислоты, взаимодействующей с подложкой, выполненной из ниобата лития [1, 2]. Протонирование проводится при характерных температурах ~ 500 К. Области ниобата лития, обогащенные водородом, изначально содержащимся в бензойной кислоте, значительно изменяют локально показатель преломления, что может быть использовано при создании канальных волноводов.

Замещение лития, изначально принадлежащего подложке, водородом из кислоты должно сопровождаться появлением продуктов реакции, а именно ионов лития и бензоат-ионов, вдоль межфазной границы «кристалл – кислота». В данной работе рассматривается диффузия и последующая рекомбинация указанных ионов в кислоте и, как следствие, формирование ионного пограничного слоя вблизи кристалла.

Для решения поставленной задачи использовалась математическая модель, основанная на приближении сплошной среды. Результаты численного моделирования показывают, что с течением времени в расчетной области формируются стационарные экспоненциальные профили концентрации ионов обоих знаков. Профили являются однородными вдоль поверхности подложки. Большая разница в кинетике ионов лития и бензоат-ионов приводит к тому, что первые сравнительно быстро занимают всю рассматриваемую область, т. е. их концентрация не сильно меняется при удалении от подложки. В свою очередь, концентрация бензоат-ионов изменяется более ощутимо. Можно сказать, что они образуют пограничный слой с характерной толщиной ~ $5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 1).

Ненулевая разница концентраций положительно и отрицательно заряженных ионов при удалении от кристалла приводит к появлению неоднородного электрического поля с разностью потенциалов ~ 0,07 В (рис. 2). Расчеты показывают, что рассматриваемой системе требуется примерно 0,25 мс для выхода на стационарный режим.

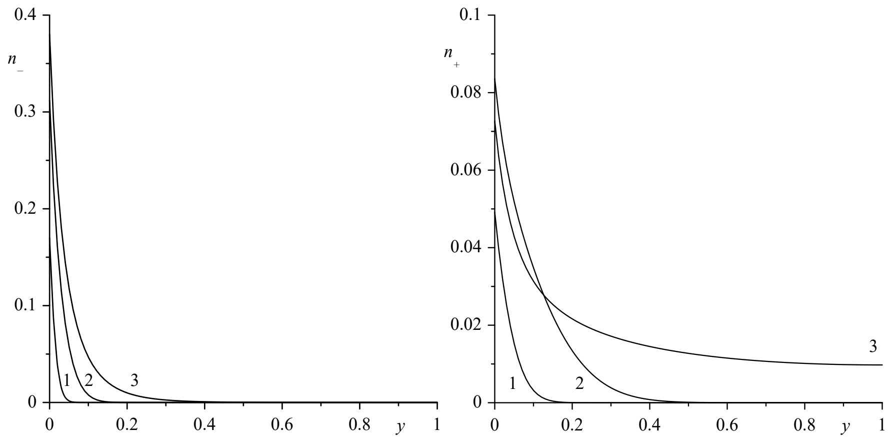


Рис. 1. Безразмерные профили концентрации отрицательных (слева) и положительных (справа) ионов в разные моменты времени: *1* – t = 0,2; *2* – t = 0,7; *3* – t = 50

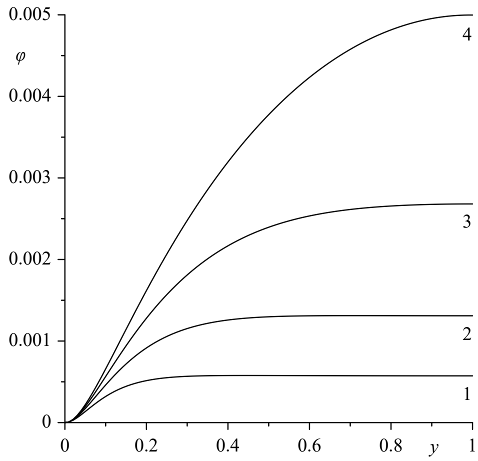


Рис. 2. Безразмерные профили электрического потенциала в разные моменты времени: *1* – t = 0,7; *2* – t = 1,6; *3* – t = 4; *4* – t = 50

Также в работе проводится изучение динамики образования нейтральных молекул бензоата лития, которые получаются вследствие рекомбинации ионов. Процесс их накопления демонстрируют профили на рис. 3.

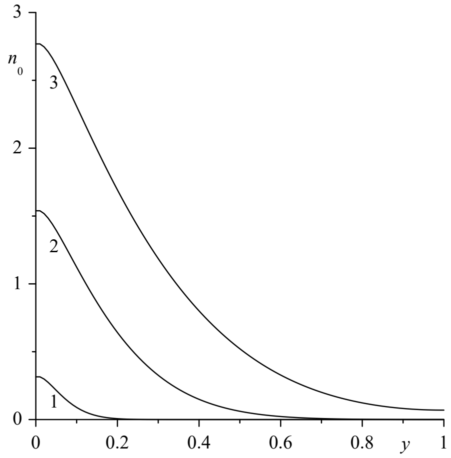


Рис. 3. Безразмерные профили бензоата лития в разные моменты времени: *1* – t = 2; *2* – t = 15; 3 – t = 50

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 121101300016-2)

Список литературы

1. Kuneva M. Optical waveguides obtained via proton exchange technology in $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ – a short review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology, vol. 2, 6, pp. 40–50, 2016.

2. Jackel J. L., Rice C. E., Veselka J. J. Proton exchange for high-index waveguides in $LiNbO_3$, Appl. Phys. Lett. vol. 41, 7, pp. 607–608, 1982.

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

С. А. Дрожжин[1], Л. Н. Кашапов[1‡],
Р. Н. Кашапов[1,2], Н. Ф. Кашапов[1,3] *

[1]Казанский федеральный университет
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, 18
[2]Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
420029, Российская Федерация, Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7
[3]Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
‡ kashlenar@gmail.com

Нанесение хромовых покрытий является широко распространенной технологией для получения защитного износостойкого антикоррозионного слоя. Перспективным направлением в современной гальванотехнике является разработка менее токсичных, эффективных и устойчивых электролитов на основе соединений Cr(III). Одним из современных методов осаждения хромовых покрытий является плазменно-электролитный метод, заключающийся в совмещении электрохимических и плазменных процессов. В работе преследуется цель определения степени влияния плазменных процессов на свойства формируемого хромового покрытия. В результате исследований было установлено, что с увеличением мощности одиночных микроразрядов происходит увеличение шероховатости покрытия и уменьшение микротвердости.

Применение износостойких покрытий является наиболее экономически целесообразным, так как позволяет повышать ресурс уже существующих изделий и узлов без крупных капиталовложений и глубокой модернизации производства. Однако использование шестивалентного хрома является опасным для человека. Поэтому начали применять растворы на основе трехвалентного хрома, он намного безопаснее и при этом также прост в использовании. При данной технологии получаются аморфные пленки, которые требуют дополнительной процедуры отжига для их кристаллизации и существуют проблемы, связанные с увеличением толщины покрытия и образованием трещин [1].

Суть плазменно-электролитного процесса заключается в горении газового разряда с жидким электродом. В случае с формированием хромового покрытия изделие должно быть катодом, поэтому необходимо исследовать горение газового разряда с жидким анодом. Важной характеристикой, кардинально влияющей на плазменно-электролитный процесс [2], является форма прикладываемого напряжения. При использовании пульсирующей формы наблюдается горение ансамбля одиночных микроразрядов на поверхности изделия [3]. В работе преследуется цель определения степени влияния плазменных процессов на свойства формируемого хромового покрытия. Необходимо определить, как изменяется процесс формирования хромовых покрытий с увеличением прикладываемого напряжения, так как это будет приводить к увеличению мощности одиночных микроразрядов.

В качестве раствора использовался следующий состав: $Cr_2(SO_4)_3 \cdot 6H_2O$ – источник ионов хрома, H_2SO_4 – подкислитель, NH_4COOH – комплексообразователь, NH_4Br – ингибитор, KCl – увеличивает проводимость, H_3BO_4 – буффер, Na_2SO_4 увеличивает проводимость, NH_4Cl увеличивает проводимость. В экспериментах pH изменялся от 1 до 1,5. Измерение микротвердости проводили на приборе «ПМТ-3М».

За основу исследования положено предположение о том, что при увеличении величины прикладываемого напряжения плазменно-электролитного хромирования процессы плазменного воздействия должны быть более интенсивными. При этом электрохимическое осаждение приводит к формированию хромового покрытия, а плазменные явления оказывают термическое воздействие и тем самым приводят к плавлению и кристаллизации покрытия. В свою очередь, меняя мощность одиночных микроразрядов, можно контролировать величину теплового воздействия и скорости охлаждения, и косвенно получать разные микроструктуры при разных напряжениях.

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика плазменно-электролитного процесса для пульсирующей формы напряжения, которую можно условно разбить на три участка. Первый участок от 0 до 65 В, в которой рост тока происходит по зависимости I ~ 0.41*U, соответствует протеканию электрохимических реакций. Вторая область от 65 В до 135 В, в которой ток растет по закону I ~ 0,26*U, наблюдается горение отдельных микроразрядов. Третья область – выше 140 В, соответствует уменьшение тока I ~ (–0.14)*U, наблюдается свечение парогазового слоя вокруг электрода без возникновения отдельных микроразрядов.

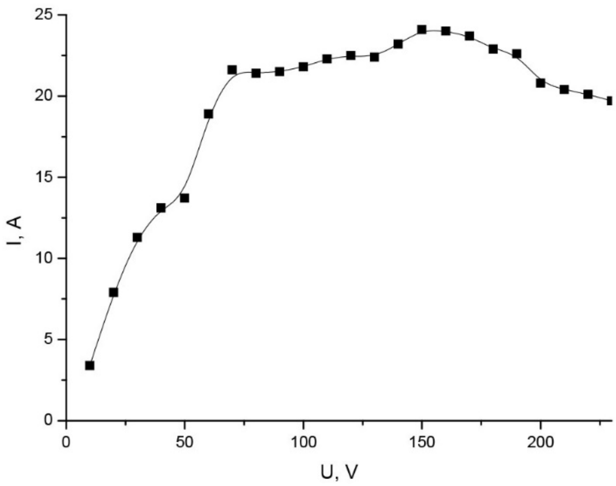


Рис. 1. ВАХ плазменно-электролитного хромирования

Процесс горения разряда происходит прерывисто, при каждом новом импульсе, возникая снова и снова. Формирование хромового покрытия происходило в диапазоне напряжений 60–200 В, плотности тока 1,5–8 А/см^2. Время формирования составило 20 минут. В диапазоне напряжений 60–110 В протекания плазменно-электролитного формирования были получены покрытия толщиной 35–42 мкм. Микротвердость покрытий составила 800–930 HV.

Увеличение напряжения выше 110 В приводит к горению микроразрядов большей мощности, которые уменьшают скорость роста покрытия и его микротвердость. Толщина составила 25–30 мкм, микротвердость 700–800 HV. При напряжениях выше 180 В формирование хромового покрытия затруднено в связи с интенсивным тепловыделением. Длительное горение разрядов приводит к расплавлению электрода.

Процесс формирования покрытий является эффективным и простым с точки зрения внедрения в промышленность. Симбиоз электрохимического осаждения и плазменного воздействия реализует простую технологию получения износостойких хромовых покрытий. В отличие от классической технологии, требующей дополнительной термической обработки, данный метод объединяет данные два этапа в один.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

Список литературы

1. Liangliang Li, Greg M. Swain. Formation and Structure of Trivalent Chromium Process Coatings on Aluminum Alloys 6061 and 7075 // CORROSION., vol. 69, Issue 12, pp. 1205–1216, 2013.

2. Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. Research of the impact acidity of electrolytic cathode on the course of the plasma-electrolytic process // Journal of Physics: Conference Series. Volume 479, Issue 1, Article number 012011, 2013.

3. Denisov D., Kashapo N., Kashapov R. The appearance of shock waves in the plasma electrolytic processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 86, Issue 1, Article number 012005, 2015.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭКСТРАЦИИ ЦИНКА

Л. Н. Кашапов, Н. Ф. Кашапов,
В. Ю. Чебакова‡, Е. В. Чебакова*

Казанский федеральный университет
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, 18
‡ *vchebakova@mail.ru*

В мире ежегодно образуется большое количество промышленных отходов, содержащих тяжелые металлы, особенно в черной и цветной металлургии, металлообработке. Одним из способов утилизации является электроэкстракция металлического порошка из щелочных электролитов. В данной работе методом прямого поиска численной оптимизации решается задача обратной кинетики, описывающая электрохимические процессы получения порошка цинка при электролизе раствора гидроксида натрия, содержащего тетрагидроксоцинкат натрия. Данная математическая модель учитывает параллельные ветви стадийных реакций: выделение водорода и осаждение цинка. Цинковый осадок моделировался в приближении пористой пленки. Алгоритм расчетов верифицирован на экспериментальных данных по массе осажденного цинка и показал хорошее согласие с экспериментальными данными.

Граница раздела «твердое тело – жидкость» представляет собой сложную для описания и моделирования задачу. Это связано с различным протеканием процессов в зависимости от различных факторов, определяющих гетерогенные системы. К таким факторам относятся: состав и шероховатость поверхности электрода, коэффициент переноса заряженных частиц в электролите и концентрации электролита, приложенного напряжения и поданного тока. Непосредственное влияние состав и концентрация электролита, а также характер выделяемого вещества, выделяется он в газовой фазе или в виде твердого осадка, также влияет характер выделившегося осадка, будет ли осаждаемое покрытие электрода в виде пористой или сплошной пленки. В работе [1] обсуждается математическая модель, описывающая гетерогенные процессы выхода вещества в газовой фазе в предположении постоянства площади поверхности за счет отлипания и всплытия пузырьков. В [1] рассматриваются катодные и анодные электрохимические процессы на примере получения водорода и кислорода, приводятся данные расчетов для верификации модели. В [2] подробное внимание уделено непосредственно численному алгоритму расчетов, в котором описывается как модификация прямого метода численной оптимизации с наложенной проверкой условий положительности, так и применяемая схема метода Рунге – Кутта 4-го порядка.

В работе численно решается обратная задача по нахождению скоростей реакций гетерогенных процессов при электроэкстрации порошков металла с учетом параллельного выделения водорода, на примере цинка. Для ее решения предложен численный алгоритм ее решений, базирующийся на методе прямого поиска Хука – Дживса и методе Рунге – Кутта для решения систем состоящих из задач Коши. Прикладным результатом расчетов также является возможность прогнозирования выхода осаждаемого металлического порошка.

Моделирование осаждения цинка было проведено в приближение пористой пленки, когда процесс контролируется диффузией и скорость процесса можно считать пропорциональной диффузии и обратно пропорциональной толщине слоя осажденного цинка. Толщину слоя продукта в приближении решения уравнения Яндера можно считать пропорциональной времени, т. е. масса осажденного цинкового осадка рассчитывается исходя из концентрации цинка и объема пленки $M_{Zn} = C_{Zn}S\sqrt{2KT} \cdot 65{,}38$.

При моделировании выделения цинка учитываются не только стадийные процессы осаждения цинка, но и процессы выделения водорода. Так как в этом случае выделение водорода носит негативный характер, стараются подобрать режимы работы таким образом, чтобы уменьшить его выход. Таким образом, в работе рассматриваются следующие электрохимические реакции:

$$H_2O \xrightarrow{R_1} H^+ + OH^-;\ H^+ + OH^- \xrightarrow{R_2} H_2O;\ H^+ + e \xrightarrow{R_3} H;\ H + H \xrightarrow{R_4} H_2;$$
$$[Zn(OH)_4]^{2-} \xrightarrow{R_5} Zn^{2+} + 4OH^-;\ Zn^{2+} + 2e \xrightarrow{R_6} Zn.$$

На основании этих катодных процессов записывается система кинетических уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -k_3 C_{H_2O} \\ \dfrac{\partial C_{H^+}}{\partial t} = k_3 C_{H_2O} - k_5\, C_{Zn}\mathrm{C}_H/(C_{Zn^{2+}}C_{H^+})C_{H^+} \\ \dfrac{\partial C_H}{\partial t} = k_5 C_{H^+}\, C_{Zn}\mathrm{C}_H/(C_{Zn^{2+}}C_{H^+}) - k_6 C_{H^+}C_{H^+} \\ \dfrac{\partial C_{H_2}}{\partial t} = k_6 C_{H^+}C_{H^+} \\ \dfrac{\partial C_{Zn(OH)^{2-}}}{\partial t} = \dfrac{D_{Zn(OH)^{2-}}}{2Kt}\left(C_{Zn(OH)^{2-}} - C_0\right)k_7 - k_1\, C_{Zn}\mathrm{C}_H/(C_{Zn^{2+}}C_{H^+})C_{Zn(OH)^{2-}} \\ \dfrac{\partial C_{Zn^{2+}}}{\partial t} = k_1\, C_{Zn}\mathrm{C}_H/(C_{Zn^{2+}}C_{H^+})C_{Zn(OH)^{2-}} - k_2 C_{Zn^{2+}} \\ \dfrac{\partial C_{Zn}}{\partial t} = k_2 C_{Zn^{2+}} \\ * \end{cases}$$

Связь реакций учитывается через перенапряжение на электроде, которое экспоненциально зависит от концентрации частиц, участвующих в электродных реакциях на катоде $E_{\text{перенапряжения}} = \frac{RT}{nF}\ln\,(C_{Zn^{2+}}C_{H^+}/(C_H\, C_{Zn}))$.

Таким образом, математическая модель процессов, происходящих на электроде, описывается системой задач Коши, содержит соотношения связи и условия неотрицательности концентрации участвующих в реакции ионов, молекул, а также скоростей электрохимических процессов. Минимизируемый функционал представляет собой сумму квадратов отклонений расчетного веса осажденного цинка от экспериментального на определенные моменты времени. Начальные условия для задач Коши рассчитываются на основе состояния системы до начала электролиза. Численный алгоритм решения данной задачи базируется на прямом детерминированном методе оптимизации (метод Хука – Дживса), дополненного проверкой ограничений, и на методе Рунге – Кутты, применяемого для решения кинетической системы уравнений, описывающей стадийные электрохимические реакции. Алгоритм расчетов верифицирован на экспериментальных данных по массе осажденного цинка и показал хорошее согласие с экспериментальными данными работы [3]. Расчеты показали, что на начальной стадии большое влияние имеет стадия разрастания зародышей и, соответственно, различие в скорости образования водорода на поверхности стали, из которой сделан электрод, и поверхности кристалла цинка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00099).

Список литературы

1. 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.

2. Кашапов Л. Н., Кашапов Н. Ф., Чебакова В. Ю. Математическое моделирование катодных процессов при получении водорода // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26, № 1. С. 99–105.

3. Yucheng Zhang, Jinxia Deng, Jun Chen, Pando Yu, Xianran Xing. The Electrowinning of Zinc from Sodium Hydroxide Solutions// Hydromettallurgy, vol. 146, pp. 59–63, 2014.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО TiO_2 НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗА И ПОЛИКОДЕНСАЦИИ АЛКООКСИДОВ ТИТАНА

П. С. Леонтьев*

Северо-Кавказский федеральный университет
355017, Российская Федерация, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
arb.acc@mail.ru

Наночастицы диоксида титана (TiO_2) обладают особыми свойствами, благодаря которым они находят применение в разных областях. Из-за своих оптических свойств TiO_2 широко распространился в лакокрасочной промышленности и в пигментном производстве. После исследования сенсорных, оптических, адсорбционных и фотокаталитических свойств TiO_2 было найдено решение некоторых экологических проблем: TiO_2 повысил активность технологической очистки воды и воздуха от токсичных органических соединений и нефтепродуктов [1]. Поскольку наночастицы диоксида титана (TiO_2) обладают высокой химической инертностью, отсутствием токсичности и малой стоимостью, их все больше применяют в качестве фотокатализатора. Активные фотокаталитические свойства наноразмерного TiO_2 позволили применять его в процессах фотолиза воды с выделением водорода и восстановления CO_2 до метановых углеводородов, которые направлены на решение масштабных проблем энергосбережения.

В последние годы также актуальны исследования, показывающие развитие теоретических и практических представлений и перспектив взаимодействия частиц наноразмерного TiO_2 с различными биологическими объектами для дальнейшего применения в медицине, микробиологии, биотехнологии, пищевой промышленности. TiO_2 используется в качестве материала для фотокаталитической стерилизации в медицинской, пищевой и микробиологической промышленности [2, 3]. В микробиологической промышленности с помощью наноразмерного TiO_2, взаимодействующего с клеточными стенками, подавляют активность ферментов, уничтожают генетические супрамолекулы и некоторые виды бактерий и вирусов. Например, обработка наноразмерным диоксидом титана *Escherichia coli* приводит к инактивации клетки и разрушает эндотоксин, пагубно влияющий на человека даже в очень низких концентрациях [4]. Однако применение в данной области характеризуется низкой эффективностью защиты. Причиной во многом являются недостаточные знания о взаимодействии материалов с биодеструкторами [5]. Для получения бактерицидных пленок на основе TiO_2 используют радиочастотный процесс плазмостимулированного химического осаждения из паровой фазы [6]. Противомикробная активность наноразмерного TiO_2 проверена на штаммах стафилококка, кишечной палочки и др. Доказано, что благодаря этонию и декаметоксину, скапливающимся на поверхности титановой пленки, она приобретает пролонгированную противомикробную активность. Следует отметить, что TiO_2 также используется в совокупности с другими наноматериалами для приобретения новых необходимых свойств или усиления имеющихся. Так, наноразмерный TiO_2 в сочетании с нанотрубками, синтезированными из атомов углерода и катионов аммония, проявляют антимикробный эффект. Наноструктурированная пленка с частицами ZnO_2 и TiO_2 способствует лучшей адгезии и функциональной активности остеобластов, а также дезактивируют адгезию патогенных бактерий [7].

В медицине биоматериалы играют важную роль: восполняют утраченные ткани органов, способствуют ускорению регенерации тканей и многое другое. Использование наноразмерных структур в качестве активных компонентов лекарственных препаратов существенно повышает их активность, сокращает дозировку и побочные действия [8]. Также наноразмерные препараты используются в диагностических исследованиях.

Список литературы

1. Ollis D. F., Al-Ekabi H. (eds.). Photocatalytic purification and treatment of water and air: proceedings of the 1st International Conference on TiO_2 Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air, London, Ontario, Canada, 8-13 November, 1992. Elsevier Science Limited, 1993. V. 3.

2. Блинов А. В. и др. Исследование фазового состава образцов поликомпонентной системы SiO_2-TiO_2 //современные проблемы химии, технологии и фармации. – 2020. – С. 135-137.Bekbölet, M. Inactivation of Escherichia coli by photocatalytic oxidation / M. Bekbölet, C. V. Araz // Chemosphere. 1996. V. 32. N. 5. P. 959–965.

3. Блинов А. В. и др. Синтез и квантово-химическое моделирование строения поликомпонентной системы на основе наночастиц TiO_2, SiO_2, ZrO_2 // XVI Ежегодная молодежная научная конференция «Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы». 2020. С. 120.

4. Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Заиков Г. Е. // Биомедицина. 2009. № 4. С. 73–79.

5. Szymanowski H., Sobczyk A., Gazicki-Lipman M. Plasma enhanced CVD deposition of titanium oxide for biomedical applications // Surface and coatings technology. 2005. V. 200, N 1–4. P. 1036–1040.

6. Шляхто Е. В. Нанотехнологии в биологии и медицине. Коллективная монография. М., 2009.

7. Савич В. В. Дисперсные и нанодисперсные материалы в медицине // Конструкции из композиционных материалов. 2006. № 4. С. 114–119.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОНИТЕЙ С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ УПРУГИХ ВОЛН

Ш. Лю, А. А. Баринов[*] [*]

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
105005, Российская Федерация, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
[*] *barinov@bmstu.ru*

Нанонити активно исследуются и рассматриваются в качестве перспективного материала в наноэлектронике. На таких масштабах физические свойства нитей существенно отличаются от свойств массивного материала, в частности необходимо учитывать квантово-размерный эффект. В данной работе для учета квантования привлекаются дисперсионные соотношения для поверхностных акустических волн нитей (стержней) с учетом модификации для переносчиков тепла – фононов. Рассмотренный подход позволил оценить такие свойства, как удельная теплоемкость и баллистическая теплопроводность нанонитей.

Теплофизические свойства массивных кристаллических материалов не зависят от размера кристалла даже при низких температурах, когда длина волны переносчиков теплоты велика. Однако, когда размер структуры сопоставим с длиной волны, такие свойства, как теплоемкость и теплопроводность, будут существенно зависеть от геометрии рассматриваемого образца. Изучение механизма переноса тепла низкоразмерных структур особенно важно при разработке эффективных методов терморегулирования, в том числе нового поколения термоэлектрических материалов, требующих низкой теплопроводности и высокой электропроводности.

Теплопроводность, индуцированная фононами в нити, может быть разделена на несколько видов. Один из них – когда средний свободный пробег фонона больше диаметра нити, тогда теплопроводность является баллистической, т. е. фононы почти не взаимодействуют друг с другом, а рассеяние тепла происходит на границе структуры. Более того, если длина волны фонона равна или больше диаметра нити, то возникает эффект квантового ограничения. Влияние квантовых ограничений на теплопроводность вызывает огромный интерес в научном сообществе (в частности, эксперименты Шваба) [1].

Для учета квантования фононов в данной работе применяется модификация дисперсионных соотношений поверхностных упругих волн, распространяющихся в нитях (стержнях). Так, из теории упругости поле смещений цилиндрической структуры может быть описано с помощью скалярного φ и векторного $\vec{\Psi}$ потенциалов:

$$\vec{u} = \nabla\varphi + \nabla \times \vec{\Psi}. \quad (1)$$

Потенциалы φ и $\vec{\Psi}$ удовлетворяют скалярному и векторному волновым уравнениям:

$$\nabla^2\varphi = \frac{1}{c_T^2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}, \quad \nabla^2\vec{\Psi} = \frac{1}{c_L^2}\frac{\partial^2\vec{\Psi}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где c_T – скорость продольной (сжимающей) волны, а c_L – скорость поперечной (сдвиговой) волны, обе зависят от упругих свойств материала;

$$c_T = \sqrt{\mu/\rho}\,, c_T = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}\,, \quad (3)$$

где ρ – плотность массы твердого тела, λ и μ – упругие константы Ламе.

Численное решение волновых уравнений (1)–(3) при свободных граничных условиях (напряжение равно нулю) приводит к семейству дисперсионных соотношений для трех типов волн: крутильных, продольных и изгибных. Для перехода к соответствующим дисперсионным соотношениям фононов необходимо учесть дискретную природу решетки материала путем умножения на аппроксимирующий множитель [2]:

$$\sin(ka/2)\,/(ka/2). \tag{4}$$

Для решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений используется программный код собственной разработки, реализующий в автоматическом режиме процедуру отделения корней и их нахождения. С его помощью проведены расчеты дисперсионных соотношений для квантовых нитей с диаметрами 2,7 нм и 5,4 нм, представленные на рис. 1. Цвета соответствуют разным типам волн.

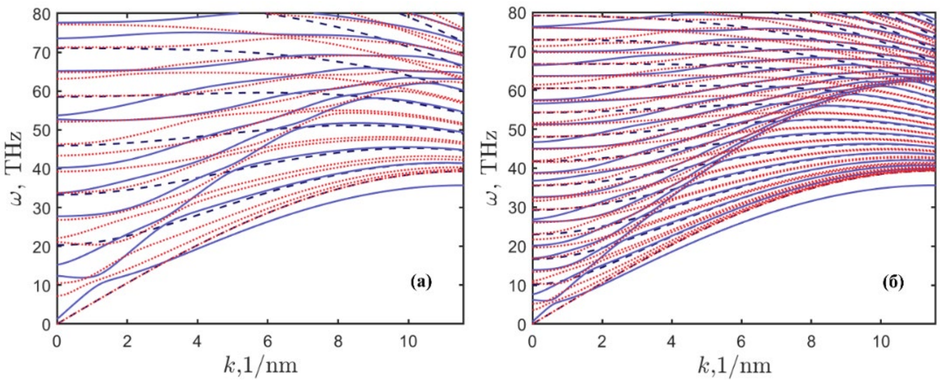


Рис. 1. Дисперсионные соотношения для квантовых нитей диаметром 2,7 нм (а) и 5,4 нм (б).
Типы волн: черная пунктирная – крутильные; синяя сплошная – продольные;
красная точечная – изгибные.

Для нахождения теплоемкости проводится интегрирование по всем модам и типам волн в соответствии с квантово-статистическим подходом к описанию фононов [3]:

$$C_v(T) = \frac{k_B}{\pi A}\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\pi/a} dk\,\frac{x_i^2 e^{x_i}}{(e^{x_i}-1)^2}\,, \tag{5}$$

где $x_i(k) = \hbar\omega_i(k)/k_B T$; A – площадь поперечного сечения квантовой нити.

Аналогично записывается соотношение для баллистической теплопроводности:

$$g(T) = C_v(T)v_g A/2 = \frac{k_B}{2\pi}\sum_{i=1}^{n}\int_0^{\pi/a} dk\,\frac{x_i^2 e^{x_i}}{(e^{x_i}-1)^2}\,v_{g,i}\,, \tag{6}$$

где v_g – групповая скорость. Результаты расчета теплоемкости и баллистической теплопроводности квантовой нити показаны на рис. 2, где $g_0 = \pi k_B^2 T/6\hbar$ [1].

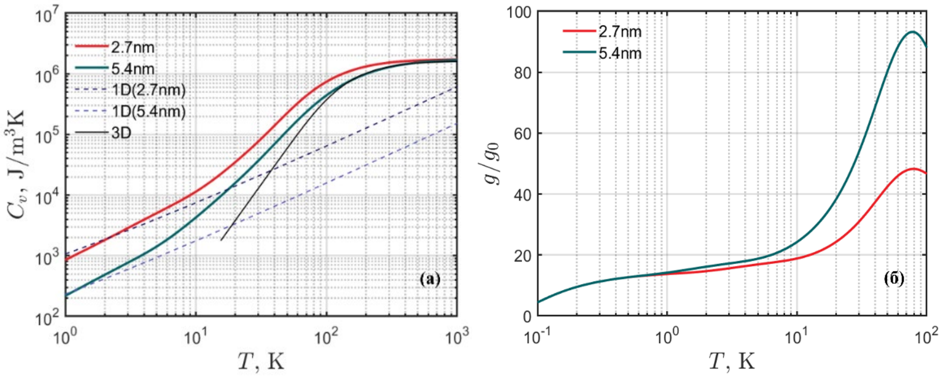


Рис. 2. Теплоемкость (*а*) и баллистическая теплопроводность (*б*) нанонитей.
Линии – результаты расчета авторов для диаметров 2,7 и 5,4 нм; 1D, 3D – модель Дебая [3].

Результаты расчета теплоемкости для нитей диаметром 2,7 и 5,4 нм показывают, что эффекты квантования важны при низких температурах, менее 100 К, при этом значение теплоемкости стремится к значению для одномерной структуры (1D). При увеличении температуры теплоемкость растет до значения для макроскопического образца (3D).

Список литературы

1. Schwab K. et al. Measurement of the quantum of thermal conductance // Nature. 2000. Vol. 404. Pp. 974–977.

2. Prasher R., Tong T., Majumdar A. Approximate Analytical Models for Phonon Specific Heat and Ballistic Thermal Conductance of Nanowires // Nano Lett. 2008. Vol. 8. Pp. 99–103.

3. Introduction to solid state physics / ed. C. Kittel. 8-th ed. New York: John Wiley, 680 p., 2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОУНТ В S-ДИАПАЗОНЕ СВЧ-ВОЛН

З. Н. Нуриахметов[1,2,3*], Д. В. Смовж[2], Ю. Д. Черноусов[1] *

[1]Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН
630090, Российская федерация, Новосибирск, ул. Институтская, 3
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[3]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[*] zaur.nuriakhmetov@gmail.com

Исследованы коэффициенты прохождения и пропускания в S-диапазоне СВЧ-волн покрытий на подложке из ПЭТ: на основе ОУНТ, нанесённых методом аэрозольного распыления; однослойного графена, синтезированного методом ХОГФ; наночастиц железа в аморфной углеродной матрице. Также было исследовано влияние таких покрытий на электродинамические характеристики цилиндрического резонатора на моде E_{010} при помещении композита в максимум электрического поля.

Графен и одностенные углеродные нанотрубки являются уникальными материалами для создания композитов. Такие композиты являются лёгкими, экологически чистыми и электропроводящими, создание СВЧ-устройств на их основе является перспективным направлением современной науки. Сфера применения таких композитов достаточно обширна и включает в том числе создание эффективных поглощающих материалов и материалов с ярко выраженными металлическими свойствами, т. е. с высоким коэффициентом отражения электромагнитного излучения.

В данной работе исследованы несколько покрытий на подложке из полиэтилентерефталата (ПЭТ), толщиной 75 мкм. Использовались одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) в суспензиях H_2O, C_2H_5OH, H_2O+ПАВ, с массовой концентрацией ОУНТ 0,1; 0,1 и 0,4 % соответственно. Покрытия наносились на подложку методом аэрозольного распыления, включающим в себя диспергацию суспензии ультразвуком и аэрографическое распыление на полимер с последующим выпариванием жидкого компонента. Так как в ОУНТ присутствует некоторое количество наночастиц железа – катализатора синтеза ОУНТ, для сравнения был исследован образец с наночастицами железа, инкапсулированными в аморфной углеродной матрице. Также был исследован однослойный графен, синтезированный методом ХОГФ. В качестве образца для качественного сравнения была использована медь.

Коэффициенты пропускания и отражения измерялись с помощью анализатора цепей Agilent N5239A, методика эксперимента заключалась в следующем: образец помещался в поперечной плоскости волновода с геометрическими размерами 72×34 мм. Затем измерялись S-характеристика данной конфигурации. В результате показано, что покрытия на основе ОУНТ имеют сравнимый с медью коэффициент отражения, но также обладают достаточным (–45 dB, для меди –90 dB) коэффициентом пропускания.

Также было исследовано влияние таких композитов на электродинамические характеристики медного цилиндрического резонатора на моде E_{010} при установке образца в максимум электрического поля. Так, резонансная частота и добротность пустого резонатора составляла 2868 MHz и 14880 соответственно. Геометрические размеры образцов в этом эксперименте составляли 11×5 мм. На основании анализа сдвига резонансной частоты и изменения добротности показано, что композиты на основе ОУНТ обладают металлическими и диэлектрическими свойствами. Образец с наночастицами железа обладает только диэлектрическими свойствами. Графен обладает высокой поглощающей способностью, значительно (до 99 %) уменьшая добротность резонатора.

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. А. Попов[1⁑], О. Л. Хамидуллин[1], Д. Ю. Константинов[1], И. А. Попов[2] *

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
420111, Российская Федерация, Казань, ул. К. Маркса, 10
[2]Казанский государственный аграрный университет
420015, Российская Федерация, Казань, ул. К. Маркса, 65
⁑ popov-igor-alex@yandex.ru

Проведено исследование коэффициентов теплопроводности углепластика с различным армированием методами стационарного теплового потока. Установлены значения коэффициентов теплопроводности и их зависимости от температуры в диапазоне температур от –20 до 80 °C. Диапазон изменения коэффициентов теплопроводности составил от 0,400 до 0,515 Вт/(м·К). Полученные результаты могут быть использованы для расчета и проектирования систем и установок с использованием ПКМ как конструкционного материала, а также для расчета параметров технологического процесса производства данных ПКМ.

Теплопроводность полимерных композиционных материалов играет решающую роль при оптимизации технологических режимов их получения и проектировании инженерных систем, где важны температура и тепловое напряжение. На теплопроводность композиционных материалов большое влияние оказывают температура, химический состав, количество и размеры армирующего наполнителя, пористость и направление теплового потока.

В качестве объекта исследования выбирались ПКМ на основе различных связующих и различным тканей. Исследованы ПКМ на основе армирующих элементов в виде семипрегов из углеродной ткани УТ-1000-200 саржевого переплетения из волокна UMT40-3K-EP (образец 1) и из углеродной ленты УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex UMT49-12K-EP (образец 2) с эпоксидным связующим отвержденного ароматическим аминным отвердителем; ПКМ-термопласты на основе армирующих элементов в виде препрегов из углеродной ткани из углеродного волокна UMT-49 со связующим из полиэфирэфиркетона PEEK (образец 3) и из углеродной ткани TENAX-E TPCL PEEK-4-40-HTA40 E13 3K DT-5HS-285/04AB саржевого плетения из углеродного волокна Tenax®-E HTA40 3K со связующим PEEK-4-40-HTA40 (образец 4); ПКМ-реактопласты на основе армирующих элементов в виде препрегов из арамидной ткани из волокна РУСАР-С600 саржевого плетения со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (образец 5) и из углеродной ткани из углеродного волокна UMT-49 саржевого плетения также со связующим на основе эпоксидной смолы Т-26 (образец 6). Структура ПКМ оценивалась на оптическом микроскопах Leica M80 (рис. 1).

Так как углепластик представляет ПКМ, состоящий из основы (тканевой), связующего (полипропилена, эпоксидной смолы или других материалов) и пор, то определяемый коэффициент теплопроводности является эффективным, учитывающим коэффициенты теплопроводности твердых фаз – углеволокна и полистирола, воздуха в порах, радиационный перенос в порах.

Для определения коэффициентов теплопроводности использовался измеритель теплового потока, например, HFM 446 Lambda Small (Netzsch, Германия). Коэффициенты теплопроводности определялись в диапазоне – 20…80 °C. Размеры образцов для измерения составляют 300×300 мм при толщине от 1,5 до 5,5 мм.

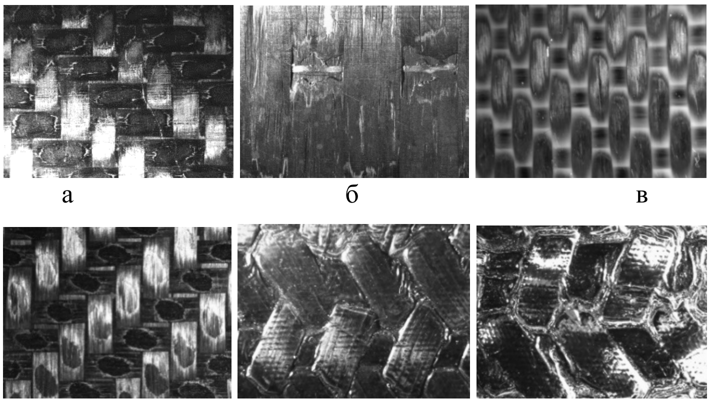


Рис. 1. Структуры ПКМ с различным армированием:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3;г – образец 4; д – образец 5; е – образец 6

Образец ПКМ располагается между пластинами с двунаправленными системами нагрев/охлаждение Пельтье, обеспечивается различие температур. Для калибровки сенсора теплового потока использовался сертифицированный образец из минеральной ваты IRMM-440A известной теплопроводности.

Расчет теплопроводности проводился по формуле

$$\lambda = \frac{NV\delta}{F(\text{Т}_{\text{гор}} - \text{Т}_{\text{хол}})}, \quad (1)$$

где N – калибровочный коэффициент определенный на сертифицированном образце, V – напряжение, подаваемое на нагреватель пластины, F – площадь поверхности образца, δ – толщина образца, $T_{\text{гор}}, T_{\text{хол}}$ – температуры на поверхности образца со стороны «горячей» и «холодной» пластин.

Результаты сравнения тестовых опытов с данными сертификатов показали, что отклонение экспериментальных данных по теплопроводности для минеральной ваты IRMM-440A не превышает 2 %, для пенополистирола EPS – 2,5 %, и для боросиликатного стекла – 7 %.

Коэффициент теплопроводности ПКМ оценивался нормально к плоскости пластины (армирования).

Результаты определения температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности λ (Вт/(м·К)) для исследованных ПКМ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования

Образец	Температурная зависимость для коэффициентов теплопроводности
1	λ =0.43297 + 0.00096534·t + 8.1659·10^{-6}·t^2 - 7.29628·10^{-8}·t^3
2	λ =0.36841 + 0.00121·t + 1.47144·10^{-6}·t^2 - 2.86053273·10^{-9}·t^3
3	λ =0.44764 + 0.00144·t + 2.74792·10^{-7}·t^2 - 3.40043·10^{-8}·t^3
4	λ =0.29665 + 0.00105·t – 1.77706·10^{-5}·t^2 +1.52788·10^{-7}·t^3
5	λ =0.1442 + 2.16872·10^{-4}·t – 5.13871·10^{-6}·t^2 – 5.82999·10^{-8}·t^3
6	λ =0.31902 + 8.97684·10^{-5}·t – 3.30384·10^{-5}·t^2 – 1.56652·10^{-7}·t^3

Примечание. t – средняя температура образца, °С.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета и проектирования систем и установок с использованием конструкционных углепластиков, а также для моделирования технологических процессов производства. На основе полученных данных может быть сформирована база данных РФ по коэффициентам теплопроводности и удельной теплоемкости ПКМ. Результаты также позволяют проводить верификацию численных моделей теплопроводности исследованного материала с учетом его структуры.

Исследование проведено в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-03-2023-032.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКЦИЙ ФУТЕРОВОК АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С НФМ

А. В. Прошкин[1⁎], Г. Е. Нагибин[2], А. М. Иванова[3], А. А. Голоскова[1] [*]

[1] ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»
660111, Российская Федерация, Красноярск, ул. Пограничников, 37, стр. 1
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[3]ООО НТЦ ЭЛТЕР
660004, Российская Федерация, Красноярск, ул. 26 Бакинских комиссаров, 1
⁎ Aleksandr.Proshkin@rusal.com

В статье 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). Описаны технологии их монтажа и последующего повторного использования (рециклинга). Выявлены 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.

Приведены методики лабораторных и промышленных исследований теплофизических свойств футеровочных материалов. Представлены новые данные по теплофизическим и рабочим свойствам ключевых НФМ 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, в том числе и полученных в результате аварийных ситуаций, а также результаты сопоставительных испытаний катодных устройств с повторно используемыми и исходными материалами. Приведено описание особенностей изменения тепловых потерь кожухов электролизеров с новыми НФМ при пуске электролизеров и в процессе их последующей службы.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕНОСА ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ. ДИССИПАЦИЯ И НЕОБРАТИМОСТЬ

В. Я. Рудяк[1, 2] *

[1]*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*
630008, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
[2]*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
valery.rudyak@mail.ru

Анализируется проблема определения коэффициентов переноса. Показано, что в обычных ситуациях они определяются флуктуационно-диссипационными теоремами. Рассмотрены примеры с разреженными и плотными газами, с жидкостями и дисперсными жидкостями. Обсуждается связь диссипативных процессов с реально наблюдающейся необратимостью.

Одной из центральных проблем современной теплофизики является определение, моделирование и измерение коэффициентов переноса. Принципиально эта проблема решена для разреженных газов в кинетической теории Больцмана, что явилось одним из ее главных достижений. Здесь впервые был не только создан метод их расчета, но и указан соответствующий механизм [1, 2]. Выяснилось, что механизм этот молекулярный, и связан просто с процессом переноса соответствующих свойств при движении молекул. Методами неравновесной статистической механики выведены аналитические формулы для коэффициентов переноса, применимые и для простых жидкостей, и для дисперсных [2, 3]. Аналитический расчет этих коэффициентов невозможен из-за неумения решить задачу взаимодействия многих частиц. Однако было установлено, что коэффициенты переноса и газов, и жидкостей определяются флуктуационно-диссипационными теоремами (ФДТ), которые устанавливают их связь с эволюцией двухвременных корреляционных функций соответствующих динамических переменных. В литературе эти ФДТ принято называть формулами Грина – Кубо, и это совершенно справедливо, поскольку они генетически, безусловно, связаны. С другой стороны, появляющиеся в ФДТ коэффициенты переноса является функцией времени. Реально измеримое значение коэффициента переноса достигается лишь в том случае, когда соответствующая корреляционная функция затухает. Коэффициент переноса тогда выходит на свое платовое значение, которое характеризуется временем t_p. В формулах Грина – Кубо полагается, что $t_p = \infty$. Однако в силу квазипериодичности фазовых траекторий движение системы носит обратимый характер. Поэтому, в частности, строгое вычисление коэффициентов переноса с помощью формул Грина – Кубо дает ноль [1].

В данном докладе показано, что ФДТ имеют универсальный характер. Они описывают не только коэффициенты переноса газов, простых жидкостей, но и дисперсных флюидов: наногазовзвесей, наножидкостей и т. д. Помимо того, формулируются ФДТ, определяющие коэффициенты турбулентной диффузии, турбулентной термодиффузии, турбулентной вязкости и турбулентной энергии [4]. Затем систематически обсуждаются механизмы переноса в плотных газах и жидкостях. Показано, что вязкость жидкостей определятся преимущественно не обычным молекулярным переносом, как в разреженных газах, а постоянным перестроением в равновесном состоянии ближнего порядка. Таким образом, механизмы переноса импульса в жидкости имеют преимущественно коллективный характер. Коллективным является и перенос энергии в жидкости, определяющий коэффициент ее теплопроводности. В наножидкостях появляются дополнительные механизмы, связанные со структурированием базовой жидкости в окрестности наночастиц. Это структурирование тем эффективнее, чем больше суммарная поверхность наночастиц. А это, в свою очередь, объясняет зависимость вязкости наножидкости от размера частиц и ее увеличение с его уменьшением. С другой стороны, теплопроводность наножидкостей, как и диффузия наночастиц, определяется преимущественно взаимодействием молекул базовой жидкости с микрофлуктациями гидродинамических полей базовой жидкости, образующихся около наночастиц. Эти микрофлуктуации распространяются в жидкости со скоростью звука. Характерное время взаимодействия молекул с ними растет с увеличением размера частиц и их плотности, что и определяет соответствующую зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от этих параметров.

Существование ФДТ, в частности, указывает на то, что слабо неравновесные процессы переноса и соответствующие коэффициенты переноса определяются тепловыми микрофлуктуациями молекулярных полей плотности, импульса и энергии системы. Слабо неравновесными здесь называются процессы, в которых потоки пропорциональны градиентам соответствующих макроскопических наблюдаемых. В принципе могут существовать и сильно неравновесные процессы, в которых потоки зависят от градиентов высших порядков и от их произведений. Особое место занимают системы, в которых имеет место изменение реологии. Например, в наножидкостях оно может наблюдаться при сравнительно небольших градиентах скорости (скорости сдвига). В этой связи принципиальным является вопрос о том, что называется диссипативными явлениями в газах и жидкостях. Обсуждению этого посвящена вторая часть доклада.

Вязкость в жидкостях обычно определяется как трение слоев жидкости в процессе ее движения. На самом деле, речь идет лишь о перераспределении в системе ее импульса, неравномерность которого могла сформироваться либо вследствие некоторой локальной флуктуации (это не запрещено и в равновесной системе), либо из-за взаимодействия рассматриваемой системы с окружением. В закрытой системе нет никакой потери энергии, связанной с таким перераспределением. Она просто переходит из одной формы в другую. Иное дело, что этот процесс оказывается необратимым. Строго говоря, необратимый характер происходящих в молекулярной системе процессов переноса определяется необратимым характером их индивидуальных (и коллективных) взаимодействий. Такие взаимодействия не описываются принятыми для моделирования потенциальными силами, а всегда имеют некоторую стохастическую составляющую.

В заключительной части доклада показано, что наблюдающееся экспериментально изменение реологии в полимерных жидкостях, наножидкостях и т. п. связано в первую очередь с открытым характером таких систем. Изменение реологии всегда экспериментально фиксируется в течении жидкости, когда меняется скорость сдвига. При фиксированной скорости сдвига прибор покажет просто некоторое значение коэффициента вязкости. И это значение будет соответствовать структуре жидкости в данных условиях. Последующее изменение скорости сдвига будет приводить к изменению этой структуры, и в результате к изменению процесса перераспределения импульса в системе, а значит и ее вязкости. То же самое относится и к процессу переноса энергии в системе, а значит и к ее теплопроводности. В докладе иллюстрируется изменение структуры жидкости при различных скоростях сдвига в полимерной жидкости, в жидкости с углеродными нанотрубками и в обычных наножидкостях.

Работа поддержана мегагрантом Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-575).

Список литературы

1. Résibois P., Leener de. M. Classical Kinetic Theory of Fluids. N. Y., London: Wiley-Interscience, 412 p., 1977.

2. Рудяк В. Я. Статистическая Аэрогидромеханика Гомогенных и Гетерогенных Сред. Т. 1. Кинетическая Теория. Новосибирск: НГАСУ, 320 с., 2004.

3. Рудяк В. Я. Статистическая Аэрогидромеханика Гомогенных и Гетерогенных Сред. Т. 2. Гидромеханика. Новосибирск: НГАСУ, 470 с., 2005.

4. Rudyak V. Ya. Fluctuation-Dissipation Theorems and Transport Coefficients of the Gases, Liquids and Nanofluids // J. of Physics: Conference Series, vol. 1560, p. 012002, 2020.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В МЕМБРАНАХ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

И. И. Рыжков[1⁑], И. А. Харченко[1], Е. В. Михлина[1], А. В. Минаков[2], Д. В. Гузей[2], А. В. Коробко[1], М. А. Волочаев[3], И. В. Немцев[3,4], М. М. Симунин[2] *

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН*
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 44
[2]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[3]*Институт физики им. Л. В. Киренского,*
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38
[4]*Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН*
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50
⁑ *rii@icm.krasn.ru*

Предложена математическая модель для количественного описания синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) в мембранах из пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) в коммерческом CVD-реакторе. Проведено экспериментальное исследование синтеза УНТ из паров этанола и аргона в качестве газа-носителя. Полученные результаты позволяют объяснить закономерности роста УНТ в нанопористых средах и разработать количественные рекомендации по синтезу мембран ПАОА-УНТ с точно контролируемой геометрией нанопор.

Мембраны из пористого анодного оксида алюминия являются хорошо изученным и широко используемым шаблоном для производства углеродных нанотрубок [1]. Мембраны ПАОА-УНТ обладают рядом уникальных свойств, таких как контролируемая геометрия нанотрубок, селективность на основе размера и химического взаимодействия, а также высокая водопроницаемость [2].

В данной работе предлагается математическая модель для количественного описания роста углеродных нанотрубок в ПАОА мембранах в коммерческом трубчатом CVD-реакторе [3]. Модель учитывает химические реакции в газовой фазе и на поверхностности мембраны. В работе также проведено экспериментальное исследование синтеза УНТ с использованием этанола в качестве прекурсора и аргона в качестве газаносителя. Предложен новый метод характеризации углеродных нанотрубок с помощью обработки РЭМ и ПЭМ изображений поперечных срезов мембраны (рис. 1).

Моделирование показывает, что скорость роста углерода (в нм/мин), усредненная по мембране, остается постоянной в течение процесса осаждения до тех пор, пока диаметр пор не станет достаточно малым, а после этого быстро падает до практически до нуля. Установлено, что толщина углеродных нанотрубок у поверхности мембраны немного больше, чем в центре мембраны. Скорость роста углерода увеличивается с увеличением температуры (рис. 2) и давления синтеза, в то время как она уменьшается с увеличением расхода аргона. Зависимость скорости роста углерода от расхода этанола достигает максимума при некотором промежуточном значении расхода. Эти результаты подтверждаются экспериментальными данными, полученными с помощью обработки РЭМ/ПЭМ изображений. Установлено, что данные РЭМ дают завышенные значения диаметра и толщины нанотрубок по сравнению с данными ПЭМ (рис. 1).

Полученные результаты позволяют объяснить закономерности кинетики роста УНТ в нанопористых средах и разработать количественные рекомендации по синтезу мембран ПАОА-УНТ с точно контролируемой геометрией нанопор. Они также верифицируют предложенную комбинированную модель гомогенных/гетерогенных реакций и тепломассопереноса для описания процесса осаждения углерода в нанометровом масштабе.

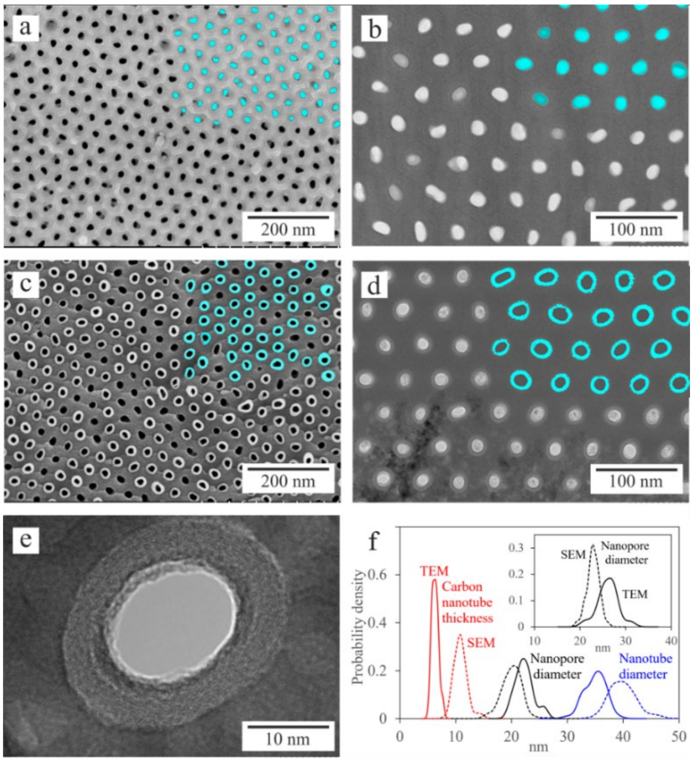


Рис. 1. РЭМ (*a*, *c*) и ПЭМ (*b*, *d*) изображения поперечного сечения мембраны ПАК до осаждения углерода (*a*, *b*) и после осаждения углерода (*c*, *d*). ПЭМ-изображение одной нанопоры с углеродной нанотрубкой (*e*). Распределение диаметра нанотрубок, диаметра нанопор и толщины нанотрубок (f). Результаты для мембран до осаждения углерода (вставка)

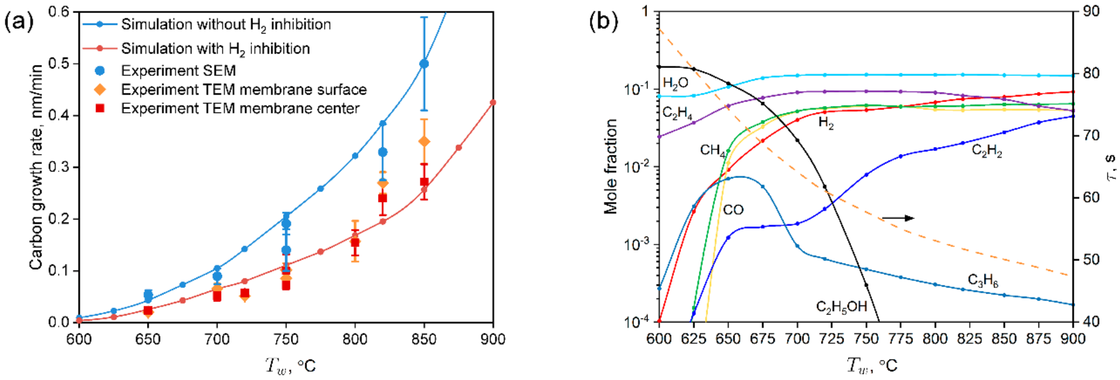


Рис. 2. Зависимость скорости роста стенок углеродных нанотрубок (*a*) и мольных долей частиц, усредненных по поверхности мембраны / времени пребывания (*b*) от температуры стенки реактора. Давление 0,5 бар, расход аргона 200 мл / мин, расход этанола 0,083 мл / мин.

Список литературы

1. Rashed A. O. et al. Carbon nanotube membranes – Strategies and challenges towards scalable manufacturing and practical separation applications // Sep. Purif. Techn. 2011, Vol. 257, 117929.

2. Lee J. H. et al. Vertically aligned carbon nanotube membranes: water purification and beyond. Membranes 2020, Vol. 10, 273.

3. Ryzhkov I. I., Kharchenko I. A., Mikhlina E. V., Minakov A. V., Guzei D. V., Nemtsev I. V., Volochaev M. N., Korobko A. V., Simunin M. M. Growth of carbon nanotubes inside porous anodic alumina membranes: Simulation and experiment. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021. Vol. 176 121414.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ХРОМА НА ПРОЦЕСС ЗАКАЛКИ

В. А. Рязанцев[1⁑], А. Р. Забиров[2], В. В. Ягов[1], И. А. Молотова[1], М. М. Виноградов[1] *

[1] Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
[2] Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
⁑ zorro-001@yandex.ru

В данной работе представлены результаты влияния пористого покрытия из хрома на процесс закалки после высокотемпературного оксидирования. Для этого были проведены эксперименты по охлаждению шаров из нержавеющей стали с полированным и хромовым покрытием. Получены профили срезов хромированных образцов для изучения структуры покрытий и толщины оксидного слоя.

Исследование процесса охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях представляет интерес для многих отраслей промышленности. К ним относятся теплоэнергетика, металлургия и атомная энергетика. Что касается атомной энергетики и безопасности, то после аварии на Фукусиме в 2011 г. во многих научных центрах начались исследовательские работы по поиску аварийно-стойкого топлива для атомных электростанций (АЭС) и изучению его характеристик. Новые виды топлива и материалов оболочки твэлов получили название «аварийно-устойчивое топливо» (ATF). Его концепции направлены на отсрочку начала разрушительного процесса в случае аварий за счет снижения скорости окисления при высоких температурах, а также за счет потенциальной задержки взрыва. Одним из основных рассматриваемых вариантов покрытия ATF является хром [1].

Оценка характеристик охлаждения имеет решающее значение в процессе разработки поверхностей ATF. Во время аварии с потерей теплоносителя (LOCA) оболочка твэла перегревается, и охлаждение устанавливается с помощью системы аварийного охлаждения. Скорость охлаждения защитной оболочки во время повторного залива определяется ее закалочными характеристиками. Закалка представляет собой процесс быстрого охлаждение твердого тела, который имеет высокую рабочую температуру. Из-за пленочного кипения, которое наступает после погружения образца в охлаждающую жидкость, коэффициент теплоотдачи очень низкий. В этом режиме наблюдается устойчивая паровая пленка, которая покрывает поверхность тела, уменьшая контакт между теплоносителем и поверхностью. Для быстрого охлаждения твэлов и предотвращения катастрофы необходимо добиться перехода от пленочного кипения к более интенсивному режиму теплообмена. Известно, что в процессе закалки возникает особый режим теплообмена, который может сопровождаться высокой интенсивностью [2, 3]. Этот режим наблюдается при определенных условиях даже при температурах охлаждаемой поверхности значительно выше критической температуры охлаждающей жидкости

Для изучения влияния пористого покрытия были проведены эксперименты по охлаждению металлических шаров в этаноле при разных уровнях недогрева. В качестве опытных образцов использовались шары из нержавеющей стали диаметром 30 мм, на которые было нанесено защитное покрытие из хрома. Поскольку хром наносился гальваническим методом, толщина покрытия по поверхности шара была неоднородной, но в среднем составляла ≈ 5 мкм. Каждый образец имел две термопары, центральную и поверхностную, расположенную под радиальным углом 180°. После экспериментов был проведен анализ защитного покрытия (рис. 1). По срезу видно, что хром окислился не полностью, а само покрытие стало более пористым. За счёт наличия пор тепловая активность металла ($\sqrt{\rho C_p \lambda}$) приблизительно в три раза ниже, чем у однородного покрытия. Количественно теплопроводность не оценивалась. Согласно [2], чем больше q_{ev} и меньше $\sqrt{\rho C_p \lambda}$, тем выше будет температура перехода. В нашем случае $\sqrt{\rho C_p \lambda}$ покрытия сопоставимо с исходным материалом.

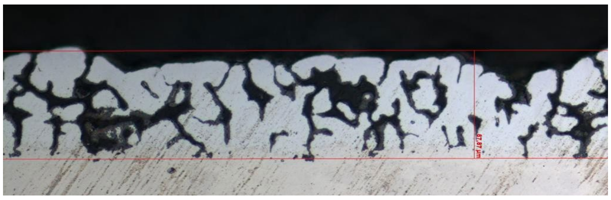


Рис. 1. Профили среза образца из нержавеющей стали
с хромовым покрытием после экспериментов

Опытный образец помещался в катушку индуктора экспериментальной установки, где в инертной атмосфере происходил, нагрев до необходимой температуры, после чего образец опускается в охлаждающую жидкость, а показания термопар транслируются на ПК. На рис. 2 представлены полученные результаты.

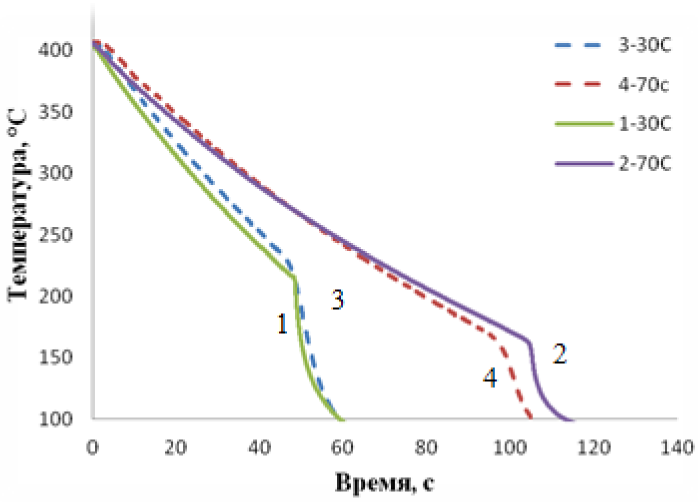


Рис. 2. Сравнение поверхностных термограмм полированного (кривые 1, 2)
и хромированного (кривые 3, 4) шара из нержавеющей стали в этаноле

По полученным термограммам видно, что режим пленочного кипения сохраняется в обоих экспериментах и продолжается более 55 с. Наличие хромированного покрытия не оказывает сильного влияния на процесс охлаждения, несмотря на то, что хром более теплопроводный материал, но за счёт пор его эффективная тепловодность сравнима с тепловодностью нержавеющей стали, поэтому процесс охлаждения протекает практически одинаково. Для того чтобы выявить более сильную закономерность, будут проведены эксперименты на воде и с покрытиями, которые сильно отличаются значениями $\sqrt{\rho C_p \lambda}$ от исходного материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-79-10363.

Список литературы

1. Park J.-H., Kim H.-G., Park J.-Y., Jung Y.-I., Park D.-J., Koo Y.-H., 2015. High temperature steam-oxidation behavior of arc ion plated Cr coatings for accident tolerant fuel claddings. Surf. Coat. Technol. 280, 256–259.

2. Yagov V. V., Zabirov A. R., Kanin P. K. 2018 Int. J. Heat Mass Transf. 126 823–830.

3. Yagov V. V., Minko K. B. and Zabirov A. R. 2021 Int. J. Heat Mass Transf. 167 120838

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ТИТАНА В ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОМ ПРОЦЕССЕ

П. В. Сергеев[1], Л. Н. Кашапов[1‡], Р. Н. Кашапов[1,2], Н. Ф. Кашапов[1,3] *

[1]Казанский федеральный университет
420008, Российская Федерация, Казань, ул. Кремлевская, 18
[2]Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ФИЦ КНЦ РАН
420029, Российская Федерация, Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7
[3]Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
‡ kashlenar@gmail.com

Работа посвящена исследованию плазменно-электролитного процесса, реализуемого в условиях катодной полярности активного металлического электрода и его погружения в электролит, для получения микро- и наночастиц оксида титана. Установлено влияние режимов горения разряда и концентрации раствора электролита на распределение частиц по размерам, а именно увеличение концентрации приводило к увеличению размеров получаемого ультрадисперсного порошка.

Использование нанотехнологий позволило принципиально по-другому посмотреть на методы переработки энергии от первичных источников, и сделать сам процесс трансформации более эффективным и экологически чистым. Всем известным примером использования наноструктурированных материалов и нанотехнологий является процесс выработки электроэнергии за счет преобразования солнечного света. Одним из эффективных и достаточно простым способом получения частиц порошка (от нанометрового до микронных размеров) является горение разряда с жидкими электродами или же называемого плазменно-электролитным процессом [1]. Горение разряда может происходить при разных условиях, а именно полярностях активного металлического электрода, на поверхности которого реализуется возникновение низкотемпературной плазмы, формах прикладываемого напряжения и расположения электродов (находятся в контакте с жидкостью или находятся над ней без соприкосновения) [2]. Комбинируя данные вариации можно получать требуемые результаты по обработке и получению материалов. Целью данной работы являлось исследование плазменно-электролитного процесса при получении наночастиц диоксида титана.

Получение ультрадисперсного порошка оксида титана предполагалось при использовании в качестве активного электрода, на поверхности которого будет реализоваться горение разряда – металлического катода, находящегося в погруженном состоянии в раствор электролита. Погружение электрода в электролит позволяет предотвратить интенсивный нагрев торцевой части и производить горение разряда по всей погруженной части металлического катода, тем самым реализовывать стабильный процесс локального нагрева и оплавления поверхности.

Горение газового разряда происходит между металлическим катодом, изготовленным из титана марки ВТ-1, и электролитическим анодом. Катод – металлический стержень диаметром 1 мм, погруженный в электролит на глубину до 10 мм. В качестве электролитического катода использовались водные растворы HCl и $NaOH$ с концентрацией от 0,3–2 % по массе. Получаемый в ходе экспериментов ультрадисперсный порошок оседал на дне электролитической ячейки, а получаемые наночастицы образовывали коллоидный раствор. Осажденный порошок промывался деионизованной водой и высушивался в сушильном шкафу. Для анализа получаемого коллоидного раствора наночастиц использовался анализатор Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd) и УФ-ВИД спектрофотометр Agilent Cary 100.

При постепенном повышении напряжения протекание плазменно-электролитного процесса обусловлено переходом из явления электролиза в состояние горения разряда между металлическим и жидким электродами. В зависимости от концентрации раствора электролита изменяется напряжение зажигания разряда и форма кривой вольт-амперной характеристики. При достижении определенных величин напряжения под воздействием низкотемпературной плазмы происходит явление нагрева металлического катода, приводящее к началу процесса получения частиц оксида титана.

Растворы электролитов, после плазменно-электролитного процессах были проанализированы с помощью УФ-ВИД-спектрофотометра для обнаружения плазмонного резонанса. Наблюдались пики поглощения 224, 230, 235 нм, подтверждающие наличие наночастиц оксида титана согласно обзору [3]. При дуговом режиме горения разряда наблюдается образование осадка, состоящего из сферического порошка размером менее 10 мкм. Коллоидный раствор очищенный от осадка порошка исследовался с помощью анализатора Zetasizer Nano ZS, полученное распределение частиц по размерам представлено на рис. 1.

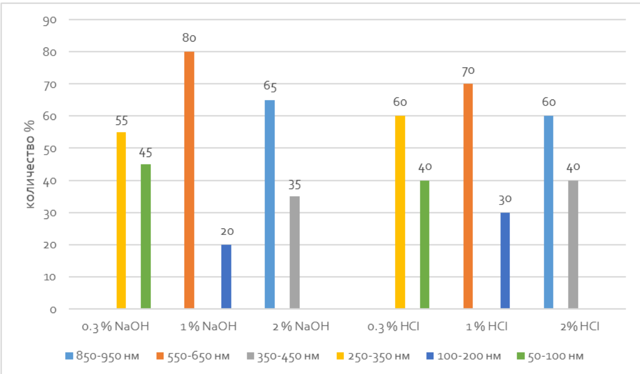


Рис. 1. Гистограмма распределения наночастиц оксида титана по размерам в зависимости от концентрации и вида используемого электролита

Установлено, что имеются два пика в распределении частиц, которые смещаются в область меньших значений с уменьшением концентрации электролита. К примеру, для раствора гидрооксида натрия при концентрации 2 % наблюдаем максимальное количество частиц для диапазона размеров 850–950 нм и 350–450 нм, а с уменьшением концентрации до 0,3 % при 250–350 нм и 50–100 нм.

Проведенные исследования показали, что плазменно-электролитный процесс, реализуемый в условиях катодной полярности активного металлического электрода и его погружения в электролит, может быть применен для получения микро- и наночастиц оксида титана, а также частиц титана размером до 10 мкм, покрытых оксидом титана. Установлено, что режим горения разряда существенно влияет на размеры получаемых частиц оксида титана. Выявлено два режима горения, отличающихся тепловыделением. Повышение напряжения может приводить к горению разряда в дуговом режиме за счет термоэмиссиии электронов и интенсивного нагрева катода-титана.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного заказа в сфере научной деятельности в рамках проекта FZSM-2022-0019.

Список литературы

1. Kashapov L., Kashapov N., Kashapov R. Research of the impact acidity of electrolytic cathode on the course of the plasma-electrolytic process // Journal of Physics: Conference Series. Volume 479, Issue 1, Article number 012011, 2013.
2. Denisov D., Kashapo N., Kashapov R. The appearance of shock waves in the plasma electrolytic processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 86, Issue 1, Article number 012005, 2015.
3. Tanabe I.; Ozaki Y. Far− and deep−ultraviolet spectroscopic investigations for titanium dioxide: electronic absorption, Rayleigh scattering, and Raman spectroscopy // J. Mater. Chem., vol. 4, 7706, 2016.

ГРАФЕНОВАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д. В. Смовж[1⁑], Д. В. Сорокин[2], З. Н. Нуриахметов[1,2], В. Н. Кудияров[3] *

*[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1*
*[2]Новосибирский государственный университет
630090, Российская Федерация, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*
*[2]Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30*
⁑ smovzh@itp.nsc.ru

Представлены данные о модификации физических и химических свойств поверхностей металлов при покрытии слоями графена. Исследована скорость коррозии и водородная проницаемость поверхностей, покрытых графеном, полученным методом химического осаждения из газовой фазы. Показано, что графен может использоваться в качестве защитного покрытия от окисления в воздушной атмосфере, в растворе кислоты и в качестве барьерного слоя для диффузии водорода. Продемонстрировано, что покрытие СВЧ-резонатора графеновым слоем приводит к стабилизации его свойств и защите от паразитных разрядов, возникающих в результате пробоев.

Графеновые защитные покрытия могут найти применение в различных областях, таких как защита металлов от коррозии, вызванной кислородом и водяным паром (автомобильная промышленность, авиастроение, изготовление металлоконструкций), защита металлов от охрупчивания в среде водорода (водородная энергетика), изготовление газонепроницаемых полимерных мембран (защитные покрытия, упаковки). Потенциал графена как защитного слоя обусловлен его уникальными физическими и химическими свойствами. Графен обладает исключительной термической и химической стабильностью, и в инертной среде, он устойчив при высоких температурах, превышающих 1500 °C. Это свойство позволяет использовать графен для защиты эмиссионных катодов [1]. Кроме того, графен обладает высокой оптической прозрачностью (~ 2,3 % поглощения на слой) в видимой области, высокой электро- и теплопроводностью, что позволяет минимизировать влияние покрытий на свойства материалов. Толщина графеновых покрытий составляет 0,34 нм на слой, что существенно меньше, чем толщина всех существующих защитных слоев.

Газонепроницаемость графена в основном объясняется его физической структурой. Диаметр пор гексагональной решетки графена составляет 0,246 нм, длина связи C-C 0,14 нм. Если рассматривать радиус Ван-дер-Ваальса атомов углерода 0,11 нм, то диаметр пор уменьшается до 0,064 нм. Такие малые геометрические поры в решетке графена обеспечивают минимальную проницаемость даже для небольших атомов, таких как атом гелия. Этот энергетический барьер для однослойного покрытия графеном достаточно высок, чтобы блокировать диффузию газов и паров в металлическую поверхность.

Графеновые покрытия получались методом химического осаждения из газовой фазы, с использованием в качестве источника углерода – метана, каталитической подложки – медной фольги М00б [2]. Защитные свойства исследовались при окислении в воздушной атмосфере и кислой среде KCl. Исследование электрохимических свойств материалов проводилось с использованием потенциостата/гальваностата Autolab PGSTAT 30 (Metrohm, Голландия). Электрохимические измерения осуществлялись в одностаканной трехэлектродной ячейке в насыщенном Ar электролите 0.5 M KCl. В качестве рабочего электрода использовали пластину образца, площадь контакта была ограничена кольцом FKM с диаметром 11 мм ($S_{геом}$ = 0,95 см^2). В качестве вспомогательного электрода использовали пластину Pt с высокой площадью поверхности. Электродом сравнения служил хлоросеребряный электрод (Ag/AgCl), заполненный насыщенным раствором KCl. Гидрогенизация образцов проводилась на установке PCI_ «Gas Reaction Controller» (строились зависимости максимального количества сорбированного (PCI absorption) или десорбированного (PCI desorption) водорода от давления в камере при постоянной температуре. Исследование явления вторично-эмиссионного резонансного разряда (мультипактора) проводилось в тороидальном СВЧ-резонаторе, содержащем цилиндрическую полость с электродами, установленными вдоль оси. В таком устройстве электрическое поле сосредоточено в основном в емкостном промежутке между электродами, в котором формируется разряд. Для подачи СВЧ-энергии на резонатор использовались СВЧ-генератор Г4-79 и специальный усилитель с импульсной СВЧ-мощностью до 100 Вт и коэффициентом заполнения импульсов до 1 %. Для подачи управляющих сигналов использовался генератор импульсов Г5-56. Резонансная частота, зазор между электродами и мощность СВЧ, подводимая к резонатору, выбирались таким образом, чтобы обеспечить возникновение мультипактора между электродами [3, 4].

В результате проведенных исследований показано, что графеновое покрытие защищает поверхности от взаимодействия с атмосферным кислородом, парами воды и углеводородами, что позволяет сохранять электропроводность и гидрофильность поверхности. Покрытие однослойным и несколькослойным графеном приводит к уменьшению скорости коррозии в растворе KCl в 10 раз. Диффузия водорода через графеновый слой происходит по границам кристаллов поликристаллической графеновой пленки. Нанесение на поверхность циркония (Э110) монослойного графенового покрытия позволяет в два раза снизить скорость сорбции водорода.

Покрытие графеном методом CVD медных элементов объемного резонатора подавляет возникновение и усиление мультипактора. Таким образом, технология покрытия медных элементов СВЧ-структур графеновыми слоями является перспективным методом подавления паразитных разрядов в вакуумных СВЧ-устройствах.

Список литературы

1. Liu F., Moody N. A., Jensen K. L., Pavlenko V. et al. Single layer graphene protective gas barrier for copper photocathodes // Appl. Phys. Lett., vol. 110, pp. 041607–4, 2017.

2. Kostogrud I. A., Trusov K. V., Smovzh D. V. Influence of Gas Mixture and Temperature on AP-CVD Synthesis of Graphene on Copper Foil // Advanced Materials Interfaces, vol. 3, №. 8, pp. 1500823, 2016.

3. Lin S., Wang H., Li Y., Liu C., Zhang N., Cui W., Neuber A. Multipactor threshold calculation of coaxial transmission lines in microwave applications with nonstationary statistical theory. Physics of Plasmas, vol. 22(8), pp. 082114, 2015.

4. Lin S., Yan Y. J., Li Y. D., Liu C. L. Monte-Carlo method of computing multipactor threshold in microwave devices. Acta Phys. Sin., vol. 63(14), pp. 147902, 2014.

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АБХМ С НИЗКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ГРЕЮЩЕГО ИСТОЧНИКА

В. А. Хорева*, С. Л. Елистратов *

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

Представлены результаты численного исследования циклов абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией пара рабочего вещества и одноступенчатой абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с одноступенчатой генерацией раствора с низкотемпературным водяным обогревом и проведен сравнительный анализ эксергетической эффективности их работы.

На рис. 1 приведена схема АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией. Условные обозначения на схеме: SC – солнечный коллектор; HST – бак-аккумулятор; E – испаритель; C – конденсатор; G – генератор; HE – теплообменник; P, SP – насосы; A – абсорбер; CT – градирня; CC – потребитель холода.

Все данные для расчета АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией взяты из [1].

Для расчета температуры окружающей среды в эксергетической функции температура окружающей среды была приравнена к средней логарифмической температуре испарителя, как точке с самой низкой температурой в установке, так как эксергия окружающей среды по определению равна нулю.

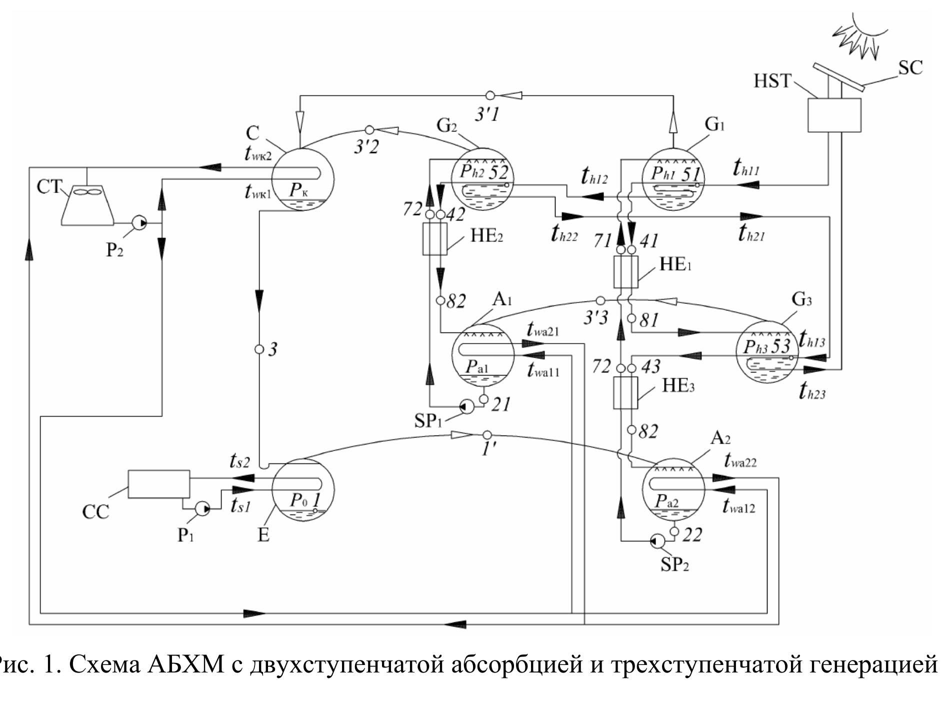


Рис. 1. Схема АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией

Полученные численные данные эксергетического КПД АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией пара рабочего вещества приведены в табл. 1.

Полученные численные данные эксергетического КПД АБХМ с одноступенчатой генерацией раствора с низкотемпературным водяным обогревом приведены в табл. 2.

В качестве примера для расчета абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с одноступенчатой генерацией раствора с низкотемпературным водяным обогревом приведена АБХМ типа АБХМ-600Вн-10 производства ОКБ «Теплосибмаш».

Таблица 1

Зависимость эксергетического КПД абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией пара рабочего вещества от входных параметров установки

$t_{охл.вход}$,°C	$t_{охл.выход}$, °C	Δt, °C	$t_{гор.вход}$, °C	$Q_{исп}$, кВт	η_{ex}
20	27	8,1	62,8	2570	0,595
25	35	10,0	74,5	2570	0,673
30	40	12,0	86,7	2570	0,681
35	**45**	**13,7**	**97,7**	**2570**	**0,696**
20	27	7,6	63,8	2550	0,583
25	35	9,4	75,5	2550	0,661
30	40	11,4	87,8	2550	0,669
35	45	13,1	98,7	2550	0,685
20	27	7,1	64,8	2450	0,567
25	35	8,8	76,6	2450	0,643
30	40	10,8	88,8	2450	0,653
35	45	*	*	2450	*

Таблица 2

Зависимость эксергетического КПД абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с одноступенчатой генерацией раствора с низкотемпературным водяным обогревом

$t_{охл.вход}$, °C	$t_{охл.выход}$, °C	$t_{гор.выход}$, °C	$t_{гор.вход}$, °C	$Q_{исп}$, кВт	η_{ex}
34	27	80	90	550	0,501

Из табл. 1 и 2 видно, что наибольший эксергетический КПД имеет АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией пара рабочего вещества с параметрами: температура входящей охлаждающей воды °C, температура выходящей охлаждающей воды °C, перепад температур в генераторах °C, температура воды на входе в первую ступень генератора °C.

Список литературы

1. Малинина О. С., Бараненко А. В., Лядова Е. Е. Анализ эффективности термодинамического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией со связанным потоком массы // Вестник МАХ. 2020. № 4. С. 12–19.

2. Ge T. S., Wang R. Z., X Z. Y., Pan Q. W., Du S., Chen X. M., Ma T., Wu X. N., Sun X. L., Chen J. F. Solar heating and cooling: present and future development // Renewable energy. 2018. P 126.

3. Loan Sarbu and Calin Sebarchievici, Solar heating and cooling systems. Ch. 2. Solar Radiation – TNQ Books and Journals. 2017. 441 p.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА МЕТОДОМ КЕЛЬБЕРНА

С. А. Чесноков[1*], Г. Н. Безукладнов[2], С. Ю. Грибанов[2], Е. А. Черемхина[1] *

[1] АО «Институт стекла»
111024, Российская Федерация, Москва, ул. Душинская, 7
[2] ООО «Экспо Гласс»
601570, Российская Федерация, Курлово, ул. Володарского, 1
[*] s.chesnokov@glassinfo.ru

На стекольном заводе «Символ» реализован проект по промышленному производству листового стекла тонких номиналов методом вертикально-горизонтального вытягивания (методом Кельберна). В докладе проводится сравнение различных методов производства листового стекла, рассматриваются особенности технологии Кельберна, его преимущества для производства стекла для фотоэлектрических модулей.

Вплоть до конца XIX в. основным методом производства листового стекла для остекления зданий, транспорта и других целей, для которых требовались достаточно крупные изделия из плоского гладкого стекла, был так называемый «халявный» метод, при котором из печи вынималась большая капля стекла, которая выдувалась в цилиндр. Полученную заготовку затем нагревали, разрезали вдоль, распрямляли и отжигали. Такая технология ведет свою историю из Римской империи и уже с XIX в. не обеспечивала необходимых индустриализировавшейся экономике объемов производства [2].

Вместе с разработкой и совершенствованием ванных печей непрерывного действия, появились и методы, позволявшие вынимать из печи непрерывную ленту стекла, которая затем подается на лер отжига и резку. К методам вытягивания стекла относятся методы Фурко, PPG, Кельберна [3].

К 1960 г. был введен в промышленную эксплуатацию новый метод получения листового стекла – флоат-метод. Постепенно он вытеснил большую часть других методов получения листового стекла, поскольку обеспечивал производство больших объемов стекла хорошего качества наиболее востребованных в строительстве толщин от 3 до 8 мм.

Однако развитие таких отраслей промышленности, как солнечная энергетика, тепличное хозяйство и ряда других, создало спрос на стекло, для которого флоат-метод подходит плохо. В частности, оптические искажения не имеют большого значения для остекления теплиц, для них гораздо важнее высокое светопропускание, небольшой вес и стоимость. Для остекления фотоэлектрических модулей также имеет значение пропускание солнечной энергии и минимальная толщина стекла [1].

ООО «Экспо Гласс» реализован проект промышленного производства стекла методом вертикально-горизонтального безлодочного вытягивания. Полностью оригинальная производственная линия обеспечивает выпуск стекла толщиной от 1,2 до 4 мм. С 2017 г. стекольный завод «Символ» активно развивает направление тепличного остекления. География поставок – РФ, экспорт в СНГ, страны Евросоюза, Азии и Африки. За период работы по данному направлению суммарно произведено и отгружено более 5 000 000 м^2 готовой продукции. На современном оборудовании производится нарезка, обработка и закалка выпускаемого заводом стекла.

Список литературы

1. Проект межгосударственного стандарта «Стекло для защитных покрытий фотоэлектрических модулей. Общие технические условия».

2. Poty F., Delaet J.-L. Charleroi pays verrier. Des origines a nos jours. / Centrale Generale Charleroi. 1986. 353 p.

3. Gläser H. J. Large area glass coating. / Von Ardenne Anlagentechnik GmbH. 2000. 471 p.

THERMALLY ACTIVATED SKYRMION GAS DRIFT IN AN INHOMOGENEOUS STRIPE

V. A. Orlov[1,2,*], A. A. Ivanov[1], I. N. Orlova[3], G. S. Patrin[1,2] *

[1]*Siberian Federal University*
660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79
[2]*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS*
660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/38
[3]*Krasnoyarsk State Pedagogical University after V. P. Astafev*
660049, Russia, Krasnoyarsk, Ady Lebedevoi street, 89
* *vaorlov@sfu-kras.ru*

This article theoretically solves the problem of the thermally activated motion of gas of non-interacting magnetic vortices/skyrmions in the field of defects located randomly, i.e., anchoring centers. The process of vortices motion is described as a sequence of thermally activated separation of vortices from the attracting centers. The cases of some model distribution functions of the energy barriers are considered: 1) the barriers are of the same height; 2) the heights of the barriers are distributed evenly; and 3) the heights are distributed according to the normal law. Within these models, analytical expressions for the drift velocity and the diffusion gas coefficient of quasiparticles are obtained.

In thin low-dimensional magnets (nanowires, nanostripes), as a rule, there are defects that create a random or modulated force field, where the vortex moves as a particle. Here, we present a statistical description of the time evolution of a conglomerate of magnetic vortices/skyrmions as a gas of non-interacting quasiparticles involved in one-dimensional motion in the field of magnetic structure defects under the influence of a constant external force. To describe the nature of the vortices displacement under the influence of a driving force in a random field of defects, we calculate the average number of trajectories of the $\rho(x,t)$ cores, resulting in a favorable outcome, i. e., the core is in the x coordinate at the t time. The elementary event: the core is in the *x* coordinate at the *t* time. The probability of such an elementary event can be written as:

$$d\rho_n^{(el)}(x,t) = \prod_{k=1}^{n} \rho(\Delta x_k)\rho(\Delta t_k)\rho(W_k)dx_k dt_k dW_k \delta\left(x - \sum_{k=1}^{b} \Delta x_k\right)\delta\left(t - \sum_{k=1}^{n} \Delta t_k\right). \quad (1)$$

$\rho(W_k)$ is the density of the distribution of the barriers heights; $\rho(\Delta x_k) = \mu \exp(-\mu \Delta x_k)$, $\rho(\Delta t_k) = \nu_k \exp(-\nu_k \Delta t_k)$ are the distribution densities of the jump lengths and their durations, respectively (Poisson's law); μ is the linear coordinate density of the distribution of the anchoring centers; ν_k is the frequency of attempts of the core disruption from the defect, which is determined by the Arrhenius law.

Based on calculations (1), analytical expressions were obtained for the average drift velocity, diffusion coefficients depending on temperature, and the degree of chaos in barrier heights. Calculations were carried out for three models: 1) Identical defects (model 1), 2) Smooth distribution of activation energy (model 2), 3) Normal activation energy distribution (Model 3). After integration (1) expression for models, it is obtained. Characteristic surface $\rho(x,t)$ is shown in Figure 1.

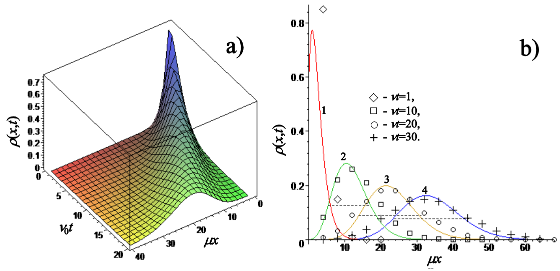


Fig. 1. The distribution of the vortex gas depending on the coordinate and time (Fig. a).
To demonstrate the evolution of the coordinate distribution, Fig. b) shows sections of the ρ(x, t) surface at some moments of time. Points - simulation result.

The figure below shows the main results of the comparative blooms of the three models. In the low temperature range, when the energy of thermal motion is much less than the average value of the energy barriers height, the features of the dependence of the diffusion coefficient on the dispersion of the activation energy of the anchoring centers have been found, i. e., nonmonotonicity associated with the determining role of the magnet defects with the maximum value of the barrier height.

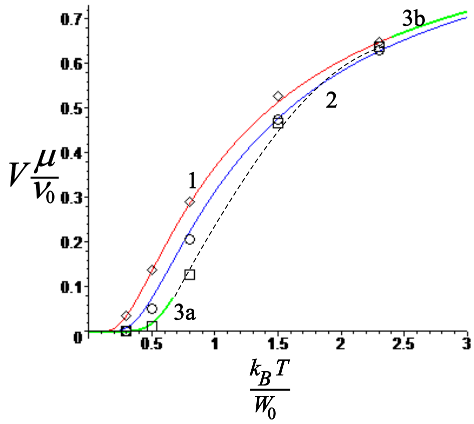


Fig. 2. Temperature dependences of the velocity displacement of the maximum coordinate of the ρ(x, t) function for the models under study.

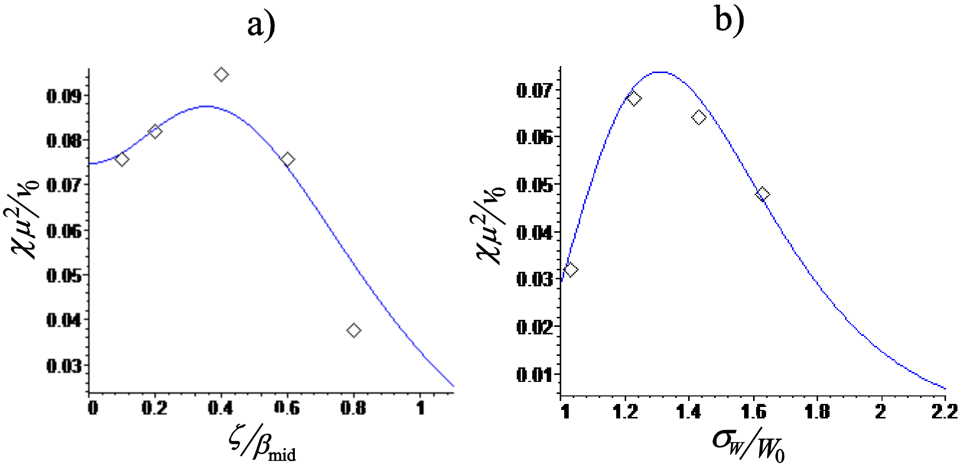


Fig. 3. The dependence of the dimensionless diffusion coefficients of the vortex gas on the value of the activation energy spread for the model of smooth distribution of barrier heights (Fig. a) and for the normal distribution (Fig. b).

An interesting fact is that the graphs in Fig. 3 are nonmonotonic. With a small value of the ($\zeta \ll \beta_{\mathrm{mid}}$ or $\sigma_W \ll W_0$) activation energy spread, when almost all defects are the same in their effect on vortices, a slight increase in accompanied by a natural increase in σ^2, as a response of the system to a more chaotic ”input signal”. But with the growth of chaos in the barriers heights of the anchoring centers at low temperatures, a significant role is played by rare but more rigid defects, where the quasiparticles gas can fix itself and slows down the expansion of its localization area. It results in the diffusion coefficients decrease. The motion of the vortices gas in this case looks as if most of the quasiparticles are delayed at one (several) high barrier with the growth of ζ (or σ), that limits the spread of coordinates and the drift velocity.

The study has been carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No.FSRZ-2020-0011).

Секция 9
«Теплофизика процессов горения»

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В СИСТЕМЕ УТИЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В. А. Архипов[*], С. С. Бондарчук, И. С. Бондарчук, Н. Н. Золоторёв, Е. А. Козлов, М. П. Орлова [*]

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 36
[*]Leva@niipmm.tsu.ru

Представлены результаты математического и физического моделирования процессов горения в пиротехнической системе утилизации отделяющихся элементов ракет-носителей для трех конфигураций твердотопливного заряда-заполнителя из высокоэнергетического материала. Представлены результаты расчетов распределений газодинамических и термодинамических параметров потока продуктов сгорания в квазистационарном режиме.

В настоящее время единственный способ доставки космических аппаратов и модулей на орбиту Земли – запуск ракет-носителей. Важной задачей является обеспечение безопасности полезной нагрузки, расположенной в головной части ракеты. Головной обтекатель (ГО) ракеты-носителя обеспечивает защиту выводимого на орбиту полезного груза от воздействия неблагоприятных условий в плотных слоях атмосферы. Ракеты-носители типа «Союз» имеют головной обтекатель массой 1 400 кг, длину 10,4 м и диаметр 3,7 м [1], что создает определенную угрозу населению в районе падения. Существенного снижения подобной опасности можно достигнуть фрагментацией ГО.

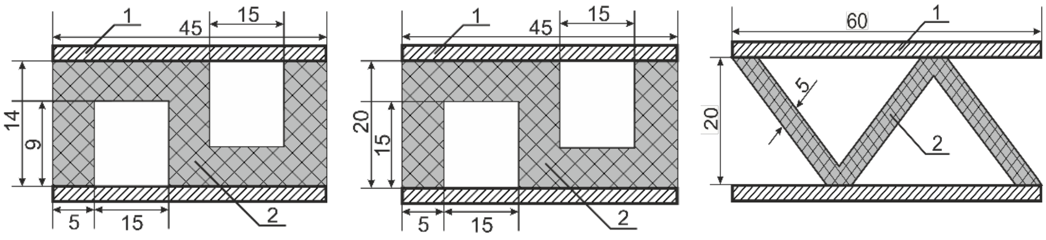
В качестве конструкционных материалов для несущих слоев обтекателя чаще всего применяются высокопрочные и высокомодульные полимерные композиционные материалы из углепластика, стеклопластика или органопластика с заполнителем сотовой структуры [2].

Конструкция системы утилизации головного обтекателя состоит из пиротехнического дефрагментатора, представляющего собой внутреннюю систему каналов, боковая поверхность которых на 60–80 % образована твердым топливом типа баллиститного высокоэнергетического материала (ВЭМ). Один из концов канала заглушен, а второй открыт во внешнюю среду, характеризующуюся соответствующей высоте давлением. В районе глухого торца канала имеется проволочный нагреватель, посредством которого осуществляется локальное зажигание твердого топлива.

Целью работы являлся анализ процессов горения заряда-заполнителя и оценка параметров функционирования пиротехнического дефрагментатора с помощью экспериментального исследования и физико-математической модели, разработанной с учетом сохранения физической целостности и прочностных характеристик головного обтекателя.

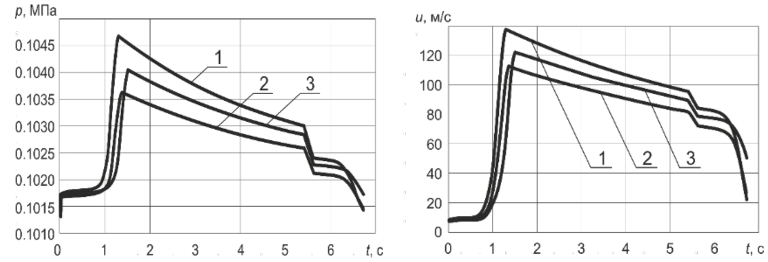
Вычисления и эксперимент проводились для модели пиротехнического дефрагментатора головного обтекателя длиной 40 мм с каналами трех конфигураций (рис. 1).

Начальная поверхность горения твердого топлива в момент времени $t = 0$ с определяется размером нагревательного элемента. Далее начинается период квазистационарного горения, образующего стенки канала топлива, сопровождающийся прогревом ограничивающей поток обшивки. После этого начинается период спада давления и догорания твердого топлива. В начале режима спада имеется короткий участок типа скачка (рис. 2, *а*), обусловленный прогаром области первичного подключения поверхности канала к горению; далее некоторое время происходит частичный разгар остаточной поверхности (с некоторым локальным повышением давления). Полное сгорание твердого топлива завершается к моменту времени $t \approx 6{,}8$ с. Полученная зависимость хорошо коррелируется с изменением скорости истечения продуктов сгорания через выходное сечение канала (рис. 2, *б*).



а б в

Рис. 1. Геометрические конфигурации и размеры элементов ГО, включающих обшивку из органопластика 1 и твердое топливо 2: *а* – прямоугольный канал 15 × 9 мм; *б* – прямоугольный канал 15 × 15 мм; *в* – треугольный канал высотой 20 мм



а б

Рис. 2. Зависимость изменения давления (*а*) и скорости истечения (*б*) продуктов горения через выходное сечение канала от времени: 1 – прямоугольный канал (рис. 1, *а*); 2 – прямоугольный канал (рис. 1, *б*); 3 – треугольный канал (рис. 1, *в*)

На рис. 3 приведены расчетные (сплошные линии) и типовая экспериментальная зависимости температуры наружной поверхности обшивки к моменту завершения горения твердого топлива. Более заметное отличие между расчетными и экспериментальными данными наблюдается в промежуточных значениях времени работы установки, что требует более детального учета параметров внешнего теплообмена обшивки с окружающей средой.

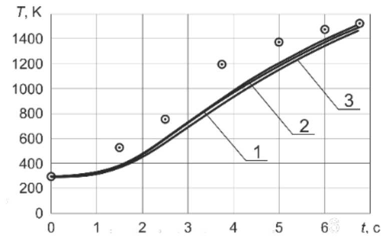


Рис. 3. Наружная температура обшивки к моменту завершения горения: 1 – прямоугольный канал (рис. 1, *а*); 2 – прямоугольный канал (рис. 1, *б*); 3 – треугольный канал (рис. 1, *в*); ⊙ – экспериментальные данные

Таким образом, в работе представлены результаты исследования горения пиротехнического дефрагментатора головного обтекателя крупногабаритных ракет-носителей, предназначенного для снижения угрозы инфраструктуре и населению в районе падения его отделяющихся фрагментов. Проведенный в работе анализ позволяет выполнить оценку оптимальных композиции и конфигурации заряда-заполнителя, обеспечивающих надежное сжигание отделяющихся элементов.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Головные обтекатели (Электронный ресурс). URL: https:/laspace.ru>company/products/launch-vehicles.
2. Гардымов Г. П., Мешков Е. В., Пчелинцев А. В. и др. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. СПб.: СпецЛит, 1999. 271 с.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ НА АКУСТИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

В. А. Архипов, Н. Н. Золоторёв[‡] [*]

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 36
[‡]*Nikzolotorev@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустической проводимости поверхности горения смесевого твердого топлива с добавками порошков алюминия разной дисперсности. Эксперименты проводились на двухконцевой Т-образной камере сгорания. Получены значения частот возникающих колебаний и акустической проводимости горящей поверхности в зависимости от длины камеры сгорания.

В процессе работы твердотопливного ракетного двигателя при выбранных его геометрических параметрах и заданных характеристиках топлива возможно развитие высокочастотных колебаний давления с расходящейся амплитудой и частотой 300–500 Гц, обусловленных близкими значениями собственных частот камеры сгорания и процесса горения. Высокочастотная неустойчивость камеры сгорания способствует возникновению и развитию вибрационного или резонансного горения, приводящего к неконтролируемому росту давления и, в конечном счете, к разрушению камеры сгорания [1]. В связи с этим возникает необходимость проведения экспериментальных исследований с целью определения характеристик акустической проводимости топлива на указанных частотах и последующей оценкой работоспособности конструкции камеры сгорания.

Основным источником усиления акустических колебаний является поверхность горения твердого топлива. Процесс усиления малых возмущений параметров газовой фазы, которые всегда присутствуют в виде турбулентных шумов, связан с откликом поверхности горения в виде дополнительной порции продуктов сгорания и энергии. При определенном соотношении частоты возмущений и частоты, соответствующей времени релаксации волны горения, первоначальное малое возмущение давления усиливается, что приводит к возникновению режима вибрационного горения.

В настоящее время интерес к исследованиям высокочастотной неустойчивости значительно возрос [2, 3], что связано с разработкой перспективных составов топлив, содержащих новые компоненты (активные горючие-связующие, нанопорошки металлов, катализаторы горения и т. д.). Скорость горения таких составов существенно выше, чем у традиционных составов твердых топлив. При этом становится реальной возможность возникновения неустойчивых режимов горения.

Для наблюдения за характером возникновения акустической волны горения используются камеры сгорания, специально приспособленные для изучения вибрационного горения. Схема двухконцевой Т-камеры длиной 1045 мм для исследования акустической проводимости приведен на рис. 1.

В качестве экспериментальных образцов были выбраны смесевые твердые топлива (СТТ), содержащие порошок алюминия промышленных марок АСД-4, АСД-6 и АСД-8. Образцы СТТ были изготовлены на основе бидисперсного перхлорат аммония, состоящего из 60 % крупнодисперсной фракции с диаметром частиц (165–315) мкм и 40 % мелкодисперсной фракции с диаметром частиц менее 50 мкм. В качестве горючего-связующего использовался бутадиеновый каучук, пластифицированный трансформаторным маслом. Фотографии готовых образцов СТТ приведены на рис. 2.

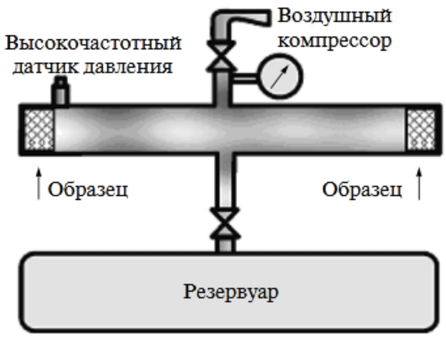


Рис. 1. Схема Т-образной камеры сгорания

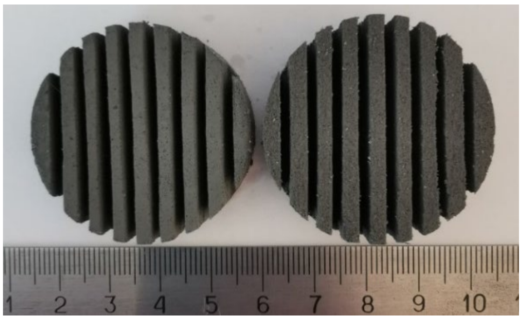


Рис. 2. Образцы СТТ, содержащие в качестве энергетической добавки 15 масс. % порошка алюминия

В работе проводились измерения акустической проводимости зоны горения для безметального твердого топлива и металлизированного СТТ, содержащего порошки алюминия разной дисперсности.

Анализ результатов полученных осциллограмм при экспериментальном исследовании горения СТТ в Т-камере позволил получить следующие результаты.

1. Горение образцов, изготовленных из пороха Н с катализатором, и СТТ без содержания алюминия сопровождается высокоинтенсивными колебаниями давления в резонаторе Т-камеры.

2. При горении образцов СТТ, содержащих 15 масс. % алюминия марки АСД-4 (среднемассовый размер частиц D_{43} = 8,1 мкм), наблюдается снижение амплитуды акустических колебаний с сохранением их частоты.

3. При горении образцов СТТ, содержащих 15 масс. % алюминия марки АСД-6 (D_{43} = 4,6 мкм), наблюдается дальнейшее снижение амплитуды акустических колебаний с сохранением их частоты.

4. При горении образцов СТТ, содержащих 15 масс. % алюминия марки АСД-8 (D_{43} = 2,1 мкм), акустические колебания давлений в резонаторе Т-камеры не наблюдались.

Полученные в экспериментах результаты по влиянию дисперсности порошков алюминия на развитие акустических колебаний в резонаторе Т-камеры можно объяснить различием средних размеров частиц конденсированных продуктов сгорания СТТ (оксида алюминия Al_2O_3), образующихся при горении порошков алюминия разной дисперсности в составе СТТ, которые могут демпфировать возникающие акустические колебания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.

Список литературы

1. Horton M. D. Use of the one-dimensional T-burner to study oscillatory combustion // AIAA Journal, vol. 2, N 6, pp. 1112–1118, 1964.

2. Su W., Wang N., Li J., Zhao Y., Yan M. Improved method of measuring pressure coupled response for composite solid propellants // J. of Sound and Vibration, vol. 333, N 8, pp. 2226–2240, 2013.

3. Куроедов А. А., Борисов Д. М., Семенов П. А. Определение акустической проводимости зоны горения безметальных и металлизированных энергетических конденсированных систем // Труды МАИ. 2018. № 98. С. 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ГИДРОЛИЗНОГО РАСТВОРА ТВЕРДЫХ БИОТОПЛИВ

А. П. Батрак[1,2‡], С. Д. Корнев[1], А. В. Жуйков[1], М. П. Полюшкина[1], Н. Г. Полюшкин[1], Д. С. Бузин[1,2], А. И. Краснов[1,2], П. С. Панкин[2,1], И. В. Тимофеев[2,1] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, Академгородок, 50/38
[‡]andrebatrak@mail.ru

Применяется закон Бугера – Ламберта – Бера для оценки размера фракции биотоплива в её гидролизном растворе: с уменьшением фракции возрастает удельная поверхность, за единицу времени в раствор экстрагируется большее количество вещества, что приводит к уменьшению светопропускания раствора. Методология может быть использована при подборе оптимального режима сгорания биотоплив.

Органические твёрдые биологические топлива – перспективный вид топлива, обладающий рядом достоинств. Во-первых, при сжигании биомассы в атмосферу выделяется только углекислый газ, поглощенный при ее росте. Вторым важным достоинством является низкая зольность, которая в случае продуктов лесопереработки не превышает 3 % от массы сжигаемого топлива. Зола биотоплив является ценным удобрением.

Биотоплива относятся к возобновляемым ресурсам. Твёрдое биологическое органическое топливо условно можно разделить на две группы: возобновляемые быстро – до 10 лет и возобновляемые медленно – свыше 10 лет.

Исходным сырьем для первой группы является животная или растительная среда, промышленные отходы, продукты жизнедеятельности человека. Активная переработка начинается до того, как биомасса попадет в природный ареал, что уже позволяет делать вывод о снижении негативного влияния на окружающую среду. Самый распространенный представитель вида – отходы лесообработки (опилки, шишки, кора, дрова). Экологическое достоинство этого типа – предупреждение эрозии почвы.

Типичным представителем сырья второй группы является торф. Торф – это условно «медленный» возобновляемый ресурс, но более быстрый, чем лес [1, 2], в пересчёте на каждого жителя Земли. Описанные выше представители твёрдых биологических органических топлив являются сырьём для получения высокоэффективных экструдированных конечных продуктов, таких как топливные брикеты и древесно-торфяные топливные гранулы. Топливные брикеты – высушенные и брикетированные энергоносители биологического происхождения, например, навоз и биологические отходы с минимальной степенью подготовки к сжиганию (опилки, шишка, щепа, кора, лузга, солома, шелуха и т. д.). Древесно-торфяные топливные гранулы (ДТГ, пеллеты) – топливный продукт, полученный прессованием или экструдированием древесных отходов (опилок, щепы, коры, некондиционной древесины и др.), соломы, отходов сельского хозяйства (навоза, куриного помета, лузги подсолнечника, ореховой скорлупы) и другой биомассы. Качество сгорания биотоплива зависит от условия горения (тип, процесс сжигания) и фракционного размера частиц самого топлива. Современные способы контроля фракционного размера частиц биотоплива сегодня мало продуктивны в связи с неоднородностью размера в профильном и продольном сечении частицы. Это приводит к неоднородности состава как в процессе прессования в ДТГ, так и сжигания.

В данной работе мы предлагаем косвенным способом оценить интервал размеров частиц биотоплива по величине светопропускания 72 % раствора серной кислоты в присутствии твёрдого биотоплива в зависимости от его типа [3–6]. Выбор данного метода обусловлен тем, что состав биотоплив различного происхождения неоднороден по содержанию основных составляющих целлюлозы и лигнина. Приведенные компоненты биотоплива слабо или вообще не растворимы в воде, но хорошо поддаются процессу гидролиза, чем и обусловлен выбор растворителя.

Цель исследования – определить размер фракции биотоплива в зависимости от оптической пропускающей способности гидролизного раствора. Актуальность работы обусловлена обеспечением оптимальности сгорания твёрдых биотоплив.

Спектр пропускания гидролизного помещённого в оптическую кювету измерялся спектрометром OCEAN FX-UV-VIS (Ocean Insight) по стандартной методике. В результате исследований были получены зависимости, изображенные на рис. 1. По полученным спектральным зависимостям был оценен коэффициент корреляции результатов измерений светопропускания гидролизного раствора.

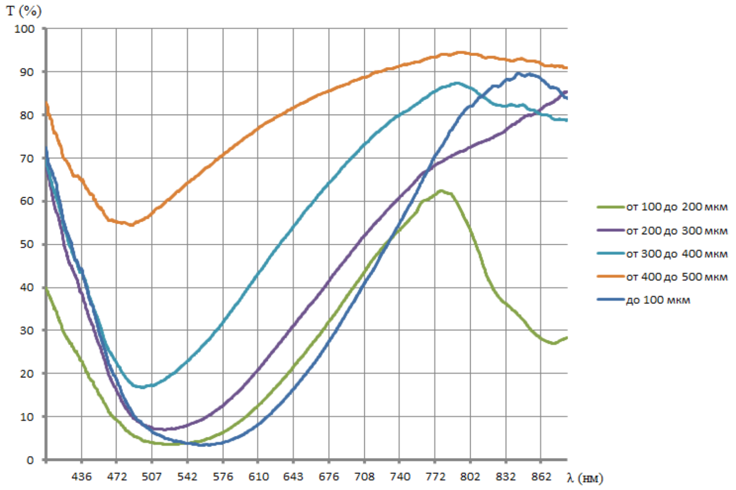


Рис. 1. Экспериментальные зависимости светопропускания гидролизного раствора от среднего размера фракции биотоплива на примере торфа

В результате проведены предварительные экспериментальные исследования светопропускания гидролизных растворов интервалов фракций биотоплива (шишка, береза, торф) от 100 до 500 мкм от длины волны света. Выявлены корреляционные зависимости спектров светопропускания гидролизного раствора биотоплива от размера фракции: для торфа – от 800 до 832 нм, для шишки – от 436 до 542 нм, что позволит определять дисперсность топливных частиц биомассы.

Список литературы

1. Аналитический отчет. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за период 2000–2012 годов. ОАО «Корпорация развития». 2013. 43 с.

2. Панов В. В., Мисников О. С., Купорова А. В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 5. С. 105–117.

3. Glushkov D. O., Matiushenko A. I., Nurpeiis A. E., Zhuikov A. V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel

with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // Fuel Processing Technology, 223, № 106986, 2021.

4. Васильев В. Т. Аналитическая химия: в 2 кн. Кн. 2. Физикохимические методы анализа: учебник. 5-е изд., стереотип. М.: Дрофа, 2005. 383 с.

5. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1983. 455 с.

6. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов. М.: Наука, 2019. 300 с.

7. ГОСТ Р ИСО 3534-1–2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ДУТЬЕ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В БЕЗАЗОТНОЙ СРЕДЕ

Д. М. Божеева[1*], В. А. Кузнецов[1,2], А. А. Дектерев[1,2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[*]dbozheeva@mail.ru

В работе проведено численное исследование влияния объёмной концентрации кислорода в дутье на воспламенение и горение пылеугольного топлива в среде O_2-CO_2-H_2O. Разработана комплексная математическая модель описания процессов факельного горения угольных частиц в безазотной среде. Проведена апробация выбранной математической модели на основе экспериментальных данных. Установлена зависимость физико-химических процессов в топочной камере от концентрации кислорода во вторичном дутье.

В сравнении с газом и нефтью, продукты сгорания угольного топлива содержат наибольшее количество углекислого газа на единицу выделяемой энергии [1]. В дополнение к этому, важным фактом является высокая доля угля в энергетике. Стоит также учитывать отрасль, связанную с повышением углеродного следа, – производство стали и цемента, так как там используется уголь [2]. Поэтому актуальной задачей является развитие технологий, способствующих снижению эмиссии углекислого газа при сжигании и переработке угольного топлива.

Обзор литературы показал, что для существующих угольных энергетических установок есть две основных технологии, способствующие улавливанию CO_2: это удаление азота из дымовых газов или удаление азота из воздуха перед сжиганием [3, 4]. Интерес представляет второй вариант, в нём образующиеся дымовые газы состоят из пара и диоксида углерода, что способствует более простому улавливанию последнего. В таком случае окисление топлива протекает в среде O_2-CO_2-H_2O. Для обеспечения транспортировки и подачи пылевидного угля в топочное пространство удалённый азот замещается на рециркулируемые дымовые газы (FRG – flue gas recycle), которые состоят из пара и углекислого газа. Отсутствие азота в камере сгорания также способствует снижению образования вредных NO_x.

Одной из проблем использования технологии кислородного сжигания является эффективное использование угольного топлива. При факельном горении пылеугольной пыли в среде CO_2-H_2O-O_2 возникает сложность выбора режима работы энергетического оборудования. Устойчивое воспламенение и полнота выгорания топлива зависит от множества факторов. Таким образом, целью работы является численное исследование зависимости процессов воспламенения и горения пылеугольного топлива от концентрации кислорода в дутье.

Для апробации математической модели горения пылеугольного топлива в среде O_2-CO_2-H_2O были использованы экспериментальные данные, полученные на огневом стенде мощностью 2,5 МВт [5]. На рис. 1 представлена схема горелочного устройства. Во внутреннем кольцевом канале подаётся прямоточный поток газа (преимущественно CO_2) с пылевидным углём. Во втором кольцевом канале подаётся закрученный поток (число закрутки 0,7) нагретого газа с 37 масс. % содержанием кислорода. Факельное горение осуществляется в топочное пространство прямоугольной формы длиной 6 метров и сечением 2 × 2 м. Дополнительные данные и детальная информация по грелочному стенду приведены в работах [5, 6].

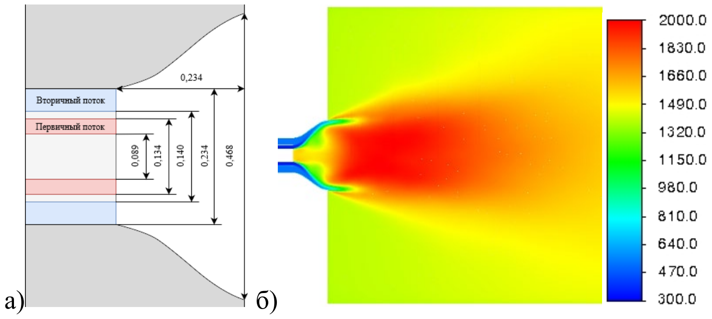


Рис. 1. Схема горелочного устройства (а), размеры указаны в миллиметрах; распределение температуры (б) в пылеугольном факеле при кислородном сжигании (К)

Для моделирования нестационарного турбулентного течения топочной среды использовалась URANS методика. Движение угольных частиц описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и тяжести. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на методе дискретных ординат. Коэффициент поглощения газа определялся в соответствии с условиями повышенной концентрации углекислого газа в камере сгорания. Для расчета скорости выхода летучих веществ используется приближение на основе модели CPD (chemical percolation devolatilization). Описание процессов газового горения основано на модели EDC (Eddy-Dissipation Concept). Скорость выгорания коксового остатка рассчитывается согласно диффузионно-кинетической модели.

Проведена апробация комплексной математической модели на основе данных опытного кислородного сжигания пылеугольного топлива в топочной камере мощностью 2,4 МВт. Исследовано влияние объёмной концентрации кислорода в дутье на физико-химические процессы в топочной камере при сжигании угольной пыли. Установлено, что изменение концентрации кислорода приводит к перестроению структуры течения в области формирования факела, изменению траектории движения угольных частиц, интенсивности выхода летучих веществ (интенсивности воспламенения) и скорости выгорания твердого углерода.

Работа выполнена лабораторией низкоуглеродной металлургии и энергетики в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» организации-участника НОЦ «Енисейская Сибирь» в рамках национального проекта «Наука и университеты» (проект № FSRZ-2021-0010).

Список литературы

1. Miller B. G. Carbon Dioxide Emissions Reduction and Storage. Clean Coal Eng. Technol., Elsevier; 2017, p. 609–68. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811365-3.00013-2.

2. Kumar D., Kumar D. Coal Usage and Control of CO2 Emissions. Sustain. Manag. Coal Prep., Elsevier; 2018, p. 15–33. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812632-5.00002-1.

3. Buhre B. J. P., Elliott L. K., Sheng C. D., Gupta R. P., Wall T. F. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. Prog Energy Combust Sci 2005;31:283–307. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.07.001.

4. Al Lagtah NMA, Onaizi SA, Albadarin AB, Ghaith FA, Nour MI. Techno-economic analysis of the effects of heat integration and different carbon capture technologies on the performance of coal-based IGCC power plants. J Environ Chem Eng 2019;7:103471. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103471.

5. Woycenko D. M., van de Kamp W. L. PAR. Combustion of Pulverized Coal in a Mixture of Oxygen and Recycled Flue Gas. Tech Rep, Int Flame Res Found Doc F98/Y/4, Ned 1995.
6. Guo J, Hu F, Jiang X, Li P, Liu Z. Effects of gas and particle radiation on IFRF 2.5 MW swirling flame under oxy-fuel combustion. Fuel 2020;263:116634. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116634.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА В ПРЯМОТОЧНО-ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКЕ НА КОНФИГУРАЦИЮ ФАКЕЛА И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРЕНИЯ

В. А. Верещетин[1*], А. Н. Тугов[1],
Д. А. Хохлов[2], М. Н. Зайченко[2] *

[1] ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт»
115280, Российская Федерация, Москва, ул. Автозаводская, 14
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
[*]VAVereshchetin@vti.ru

Представлены результаты исследования влияния изменения расхода природного газа в прямоточно-вихревой горелке (различные зоны) на форму факела, его длину, уровни температур, выгорание топлива и т. д., а также на экологические характеристики. Получены зависимости основных величин по длине факела. Установлено, что увеличение подачи топлива в центральную вихревую часть приводит к укорачиванию факела, увеличению уровня температур и увеличению концентраций оксидов азота.

Конструктивное исполнение горелочного устройства определяет, как потоки топлива и окислителя попадают в топочную камеру, где и каким образом будет происходить их перемешивание, а также определяет зону стабилизации горения факела.

В вихревой горелке конфигурация факела, его длина, степень раскрытия, протяженность и, соответственно, зоны горения в топке регулируются различными способами. Основной – это изменение интенсивности крутки воздушных потоков от максимально закрученного до прямоточного. Также оказывают влияние направление и скорости ввода газообразного топлива.

В условиях существующей горелки, которая в своей конструкции не позволяет изменить крутку и направления потоков, имеется возможность воздействовать только на режимные параметры – изменение расходов топлива и окислителя по каналам горелки. Тем не менее, это влияет на аэродинамику факела, условия выгорания топлива, распределение температуры, условия для подавления выбросов оксидов азота.

В качестве объекта исследования выбрано современное низкоэмиссионное топочно-горелочное устройство прямоточно-вихревого типа, особенностью которого является возможность использования ступенчатого подвода газа, часть которого подается по периферии горелки в циркулирующие в топке дымовые газы. В центральной части воздушного потока установлен завихритель, туда также подается газ.

Изменение соотношения расхода газа между центральным и периферийным коллекторами горелки обеспечивает изменение глубины проникновения периферийного газа и, соответственно, изменяется положение ядра факела по длине топки.

Исследование протекающих в горелке процессов проведено с помощью программного комплекса ANSYS, позволяющего провести численное моделирование физико-химических процессов, протекающих в гидрогазодинамических системах, в частности, топочных процессов.

Расчетные исследования показали, что области наиболее высоких температур наблюдаются в прикорневой центральной зоне и в конце факела, в результате догорания топлива. Увеличение подачи газа в периферию затягивает процесс сгорания топлива и смещает высокотемпературную область факела в конец топочной камеры, что снижает образование оксидов азота. Повышение расхода газа в центральную часть приводит к укорачиванию факела, смещает высокотемпературную зону к его корню, ускоряет процесс горения и однозначно приводит к увеличению концентраций NOx.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

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

[1]*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
[2]*Сибирский федеральный университет*
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[‡]*dek_art@mail.ru*

Работа посвящена разработке и применению методики моделирования процессов горения газового и жидкого топлива в камерах сгорания. Представлены результаты тестирования численной методики на задачах горения газовых закрученных пламен. Представлены результаты моделирования горения метана в экспериментальной камере сгорания ИТ СО РАН, в т. ч. при повышенных температуре смеси и давлении. Приведено сравнение с экспериментальными данными. Проведено тестирование методики расчета распыла жидкого топлива центробежной форсункой. Проведено моделирование горения жидкого топлива в модельной камере сгорания.

Экологические требования к газотурбинным двигателям самолетов и газотурбинным энергетическим установкам постоянно повышаются. Развитие и усовершенствование новых ГТД и ГТУ в современном мире не обходится без численного моделирования процессов, происходящих в этих системах. Особую сложность при этом составляет моделирование горения в камерах сгорания, и учет процессов распыла и испарения в случае применения жидкого топлива.

Данная работа посвящена разработке и тестированию методики численного моделирования процессов горения газового и жидкого топлива в условиях камер сгорания. При разработке численной методики были рассмотрены различные подходы к моделированию турбулентности, применялись разные модели горения с механизмами реагирования различной детализации.

Для верификации моделей и алгоритмов были проведены расчеты для задач аэродинамики, задач горения струйных пламен и горения в условиях камер сгорания. Результаты моделирования показали достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [1–2].

Во многих современных горелках жидкое топливо подается через центробежную форсунку. Расчет распыла таким форсунок методом объема жидкости (VOF) ресурсозатратен и применение его в полном расчете камеры сгорания практически невозможно. В работе показано, что, применяя гибридный метод VOFtoDPM за приемлемое расчетное время, можно определить основные параметры распыла, а затем использовать их в полном расчете камеры сгорания в качестве начальных условий для моделирования первичного распыла жидкого топлива методом дискретных частиц. Представлены результаты моделирования горения керосина в модельной камере сгорания с применением данной методики расчета.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер рег. 121031800229-1).

Список литературы

1. Lobasov A. S., Dulin V. M., Dekterev A. A., Minakov A. V. Turbulent transport in a swirling jet with vortex core breakdown. PIV/PLIF-measurement and numerical simulation// Thermophysics and Aeromechanicsthis. 2019. N 26(3). P. 351–359.

2. Dekterev A. A., Dekterev Ar. A., Minakov A. V. Comparative study of different combustion models for turbulent gas flames // Journal of Physics: Conference Series. 2016.

ВЛИЯНИЕ ГОМЕОМОРФИЗМА ЧАСТИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ

Ж. А. Косторева⁑, А. А. Косторева, Г. В. Кузнецов *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
⁑zhanna.kostoreva@yandex.ru

Получены результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения частиц древесной биомассы различных форм и размеров, но идентичных объёмов, применительно к условиям нагрева в камерах сгорания типичных котельных агрегатов. Исследовано три формы частицы древесины: прямоугольный параллелепипед, куб, пластина. Показано, что во всем исследовавшемся диапазоне температур частицы биомассы в форме пластин воспламеняются значительно быстрее частиц кубической и параллелепипедальной форм с относительно большими поперечными размерами. Также установлены достаточно неочевидные (исходя из традиционных представлений) зависимости времен задержки зажигания от характерных размеров частиц древесины.

Древесная биомасса имеет несколько вполне очевидных значимых преимуществ, как по сравнению с традиционными энергоносителями (уголь или нефть), так и с ветрогенераторами и солнечными батареями. Во-первых, древесина является единственным углерод-нейтральным топливом [1]. При ее сжигании формируется диоксид углерода, который не нарушает общего баланса CO_2 в мировом геохимическом цикле углерода [2]. Во-вторых, древесная биомасса является относительно дешевым источником энергии: древесина различных видов и пород произрастает практически во всех (за исключением Антарктики и пустыни Атакама) регионах планеты. Соответственно, можно обосновано предположить, что более активное внедрение в энергобаланс древесной биомассы приведет к сглаживанию ценовой «турбулентности» [3] на основных мировых торговых площадках, на которых торгуются энергоносители. В-третьих (очень важное преимущество), древесная биомасса, как правило, практически не содержит серы (во всяком случае много меньше, чем у углей). Соответственно, при ее сжигании образуется значительно меньшее по сравнению с углями SO_x. Также по результатам экспериментальных исследований [4] установлено, что при совместном сжигании угля с биомассой существенно снижаются концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах таких смесей по сравнению с процессами горения однородного угля.

Целью этой работы является проведение по результатам экспериментальных исследований анализа влияния форм и размеров частиц и их совокупности (другими словами гомеоморфности поверхности частицы древесной биомассы) на характеристики и условия их зажигания при высокотемпературном нагреве в окислительной среде.

В экспериментах использовались частицы, вырезанные на лазерном станке RABBIT HX-1290 SC из монолитного сухого фрагмента древесины сосны больших размеров, влажность которого составляла 5–8 %. При проведении экспериментов в качестве модельных форм приняты три типичные конфигурации: параллелепипед, куб и пластина. При этом характерные размеры варьировались в широком диапазоне значений при соблюдении условия одинакового (для частиц всех форм) объема V = idem (64, 128, 192, 640 и 960 мм^3) для каждой отдельной серии экспериментов. В результате формировались частицы древесной биомассы одинаковых масс, но с существенно отличающимися площадями поверхностей теплообмена.

Характерный поперечный размер прямоугольного параллелепипеда составлял δ = 4 мм, длина варьировалась в широком диапазоне (2δ, 3δ, 10δ и 15δ). В соответствии с объемом частиц в форме параллелепипеда вычислялись характерные размеры частицы в форме куба. Размер пластинообразной частицы по координате *z* (толщина) составлял 1 мм, по координате *x* – 45 мм (ширина), третий размер (длина) определялся в соответствии с условием равенства объемов частиц первых двух форм (куб, параллелепипед): $V = x \cdot y \cdot z$.

Все перечисленные выше преимущества создают предпосылки для активного внедрения биомассы в общий баланс тепло- и электрогенерации.

На рис. 1 хорошо видно, что форма и объём частиц оказывают достаточно значимое влияние на характеристики их зажигания. Так, времена задержки зажигания частиц кубической формы не зависят от их объема (или характерного размера) в диапазоне 64 мм^3 ≤ V ≤ 960 мм^3.

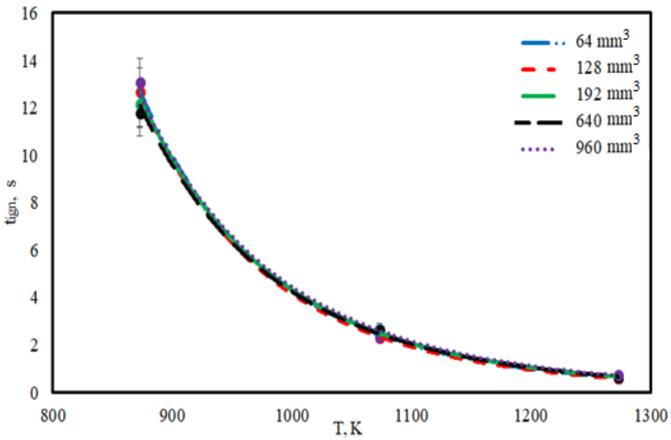


Рис. 1. Зависимости времени задержки зажигания частицы древесной биомассы в форме куба от температуры внешней среды при различных характерных размерах

Отсутствие влияния начального объема частиц кубической формы на величину t_{ign} обусловлено, скорее всего, тем, что глубина прогрева приповерхностного слоя частицы древесины, вследствие ее относительно низкой теплопроводности (в сухом состоянии), достаточна для генерации необходимого для начала горения объема летучих (горючих газов). Поэтому общие характерные размеры частиц – кубической формы (от 4 мм до 7,5 мм) не влияют на процессы, протекающие в прогретом слое частицы.

Проведенные эксперименты показали, что форма и размеры частиц древесной биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания при относительно низких температурах внешней среды. Показано, что характерный размер частиц древесины, выполненных в форме куба, не оказывает значимого влияния на характеристики и условия воспламенения.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (№ 18-79-10015-П), https://rscf.ru/project/21-79-03032.

Список литературы

1. Andrei Briones-Hidrovo, Jose Copa, Luís A.C. Tarelho, Catia Gonçalves, Tamíris Pacheco da Costa, Ana Claudia Dias. Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion // Journal of Cleaner Production, vol. 289, pp. 125680, 2021.

2. Thomas G. Kreutz, Eric D. Larson, Cristina Elsido, Emanuele Martelli, Chris Greig, Robert H. Williams. Techno-economic prospects for producing Fischer-Tropsch jet fuel and electricity from lignite and woody biomass with CO2 capture for EOR // Applied Energy, vol. 279, pp. 115841, (2020).

3. Eirik Ogner Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad. The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector // Applied Energy, vol. 274, pp. 115360, 2020.

4. Кузнецов Г. В., Янковский С. А. Условия и характеристики зажигания композиционных топлив на основе угля с добавлением древесины // Теплоэнергетика. 2019. № 2. С. 70.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

А. В. Лесных*, К. А. Штым, Ю. Б. Гончаренко *

Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
lesnykh.av@dvfu.ru

Предложен метод безмазутной подсветки пылеугольного факела на основе пористых излучателей. Рассмотрена технологическая схема установки. Приводятся результаты пусконаладочных работ и рекомендации по ведению режимов работы.

Пористые материалы и горелки, изготовленные на основе *NiAl*, обладают рядом преимуществ, наиболее важным из которых является повышенная лучистая теплоотдача [1, 2]. В энергетике для подсветки пылеугольных факелов и розжига котлов применяется дорогостоящий мазут. На сегодняшний день с учетом стоимости мазута, затрат на транспортировку и эксплуатацию мазутных хозяйств тепловых электрических станций перспективно выглядит его частичная или полная замена.

Для обеспечения необходимым количеством теплоты для подсветки пылеугольного факела предполагается использовать природный или сжиженные углеводородные газы. На текущий момент разработана и собрана установка для безмазутного розжига угольной пыли. Технологическая схема установки приведена на рис. 1.

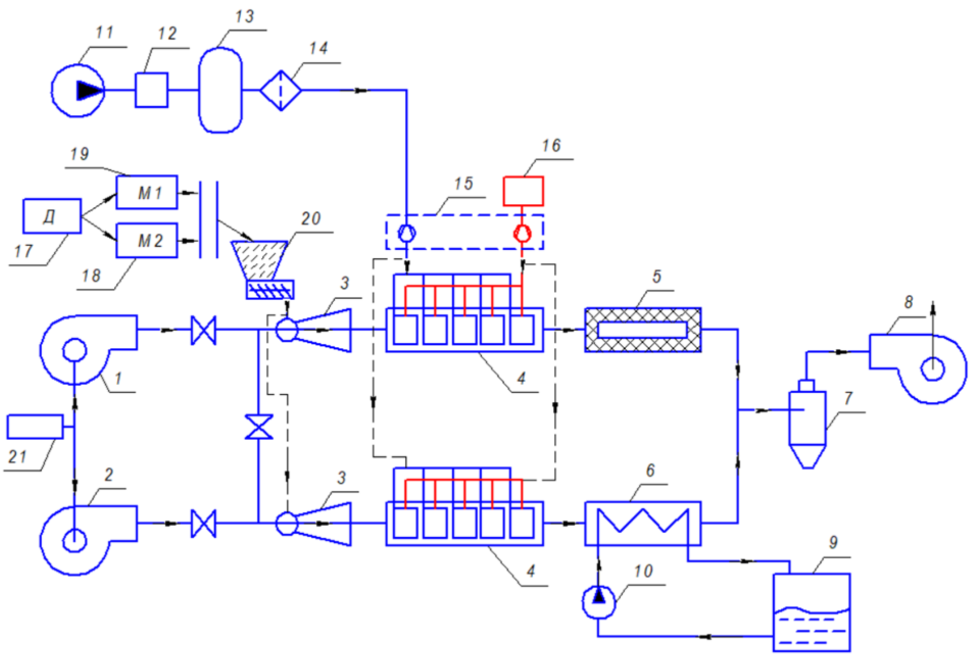


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор высоконапорный; 2 – вентилятор низконапорный; 3 – эжектор; 4 – модуль для розжига пыли; 5 – футерованная труба; 6 – водоохлаждаемая труба; 7 – золоуловитель; 8 – дымосос; 9 – бак охлаждающей воды; 10 – насос; 11 – компрессор; 12 – осушитель; 13 – ресивер; 14 – блок фильтрации; 15 – узел регулирования к радиационным горелкам; 16 – баллон с пропаном; 17 – дробилка; 18, 19 – дисковый истиратель; 20 – питатель пыли; 21 – калорифер

Пусконаладочные работы проводились с угольной пылью, полученной из угля Хакасского месторождения марки «Д». Характеристики пыли приведены в табл. 1.

Во время пусконаладочных работ выявлено отсутствие воспламенения пыли в диапазоне концентраций 0,03–0,1 кг/м^3. С ростом концентрации до значений 0,11–0,15 кг/м^3 наблюдается неустойчивое воспламенение с выгоранием 15–20 % от всего поданного топлива. Факел стабилизируется при повышении концентрации пыли до значений 0,16–0,21 кг/м^3.

Таблица 1

Характеристика угольной пыли во время экспериментальных измерений

Параметр	Влажность, $W_{пл}^r$, %	Зольность, $A_{пл}^r$, %	Низшая удельная теплота сгорания, Q_i^r, МДж/кг	Выход летучих веществ, V^{daf}, %	Остаток на сите R90, %
Значение	5–8	8–15	22,6–23,4	38–42	57–65

При проведении экспериментальных измерений выявлено, что необходимая скорость потока первичного воздуха должна находиться в диапазоне 7–16 м/с, что при различной концентрации угольной пыли позволяет обеспечить силу, превышающую вес угольных частиц и их доставку в зону радиационных излучателей, где за счет сгорания угля и высокой температуры поток еще больше ускоряется и уносит продукты сгорания за пределы камеры. При скоростях менее 7 м/с частицы сепарируются из потока и накапливаются в нижней части камеры сгорания, что приводит к необходимости проводить очистку установки. Оптимальная температура на стенке радиационного излучателя находится в диапазоне 1025–1100 ºС, при данной температуре происходит надежное воспламенение при соблюдении прочих условий. Снижение температуры на стенке ниже 800 ºС не обеспечивает надежного воспламенения. Поверхности радиационных излучателей способны разогреваться до температур 1300 ºС и выше, однако в этом нет необходимости, так как мощности теплового излучения 175–200 кВт/м^2 вполне достаточно для воспламенения угольной пыли [3]. Кроме того, при высоких температурах поверхность модулей становится более хрупкой, с возможным использованием углей с повышенной абразивностью их износ увеличится. Также высокие температуры опасны для углей с легкоплавкой золой, которая в зоне высоких тепловых напряжений будет переходить в псевдожидкое состояние, а при покидании вышеуказанных зон – налипать на относительно холодные стенки и зашлаковывать их.

В настоящий момент проводятся работы по оптимизации конструкции данной экспериментальной установки и ее пилотному внедрению на Биробиджанской ТЭЦ.

Список литературы

1. Fursenko R., Maznoy A., Odintsov E., Kirdyashkin A., Minaev S., Sudarshan K. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni-Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 98. P. 277–284.

2. Патент RU 2640305, Минаев С. С., Гущин А. Н., Цой К. А., Гущин Д. А., Кирдяшкин А. И., Штым К. А., Мазной А. С., Филиппов Д. А. Радиационная газовая горелка. URL: http://www.findpatent.ru/patent/264/2640305.html.

3. Бурдуков А. П., Чернова Г. В., Чурашев В. Н., Коновалов В. В. Проблемы замещения мазута в теплоэнергетике // Новые технологии сжигания твёрдого топлива: их текущее состояние и использование в будущем: Всероссийский научно-технический семинар. М.: Изд. ВТИ, 2001.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛАМЕНИ И В АТМОСФЕРЕ В ОКРЕСТНОСТИ МОДЕЛЬНОГО ПОЖАРА

А. В. Луценко*, Е. Л. Лобода, А. В. Агафонцев*

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 36
**lu.anastasik@gmail.com*

Приводятся результаты экспериментальных исследований спектров пульсации температуры и соответствующие им масштабы турбулентности в пламени при модельном верховом пожаре и в воздухе в окрестности фронта горения. Экспериментальные исследования проводились на Базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН. Экспериментальная площадка представляла собой «разгонный участок» низового пожара, реконструированные участок подроста и кустарников и полог леса высотой до 4.5 м. В работе представлены результаты анализа и обработки экспериментальных данных о турбулентных процессах. Установлено, что в пламени верхового пожара внутренние масштабы турбулентности соответствуют инерционному интервалу энергетического спектра, а турбулентные процессы в пламени формируют индуцированную атмосферную турбулентность.

Ежегодно во всем мире наблюдается рост количества природных пожаров, зачастую приводящих к катастрофическим последствиям для природы и человека. Массовые природные пожары также оказывают влияние и на глобальные климатические процессы. При природных пожарах реализуется диффузионный механизм горения, который характеризуется поступлением окислителя за счет диффузионного переноса и перемешивания продуктов пиролиза с атмосферным кислородом. Такой режим горения проявляется в существенной нестационарности и турбулентности течения в пламени [1].

Известно, что при природных пожарах выделяется значительное количество тепловой энергии, а интенсивные турбулентные процессы в пламени природного пожара формируют турбулентность в конвективной колонке над очагом горения [2]. Это оказывает влияние на метеорологические параметры, такие как скорость ветра, температуру и влажность воздуха, индуцированную атмосферную турбулентность. Изменения этих параметров напрямую влияют на перенос газообразных продуктов горения, дыма и аэрозоля. Исследования в этой области ведутся как с помощью экспериментальных методов [3–5], так и с помощью математических моделей [6–9]. Учитывая сказанное выше, можно утверждать, что массовые природные пожары способны оказывать влияние на глобальные климатические процессы, обеспечивать локальные условия, поддерживающие распространение пожара [10] и препятствующие формированию метеорологических условий для прекращения пожара.

В данной работе приводятся результаты анализа и обработки экспериментальных данных о турбулентных процессах в пламени модельного верхового лесного пожара и в атмосфере в окрестности очага горения. Экспериментальные данные получены с помощью бесконтактных методов измерений метеопараметров и ИК термографии с применением оригинальных методик, разработанных в ТГУ. Экспериментальная площадка представляла собой «разгонный участок» низового пожара, реконструированные участок подроста и кустарников и полог леса высотой до 4,5 м, который состоял из сосен, заранее заготовленных при проведении рубок ухода на территории томских лесничеств. Общий размер экспериментальной площадки составлял 4 × 10 м.

На основе представленных экспериментальных данных, полученных при исследовании модельного верхового пожара, установлено, что в пламени верхового пожара внутренние масштабы турбулентности соответствуют инерционному интервалу энергетического спектра, а турбулентные процессы в пламени формируют индуцированную атмосферную турбулентность. Определены значения волновых чисел, при которых внутренние масштабы индуцированной атмосферной турбулентности соответствуют диссипативным процессам.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10068).

Список литературы

1. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. Combustion. Berlin: Springer, 1999. 300 p.

2. Loboda E., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V., Gordeev Y., Tarakanova V., Martynov P., Loboda Y., Orlo, K., Savin K. et al. Effect of Small-Scale Wildfires on the Air Parame-ters near the Burning Centers // Atmosphere. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 75 (1-15). DOI: 10.3390/atmos12010075.

3. Loboda E. L., Reyno V. V., Vavilov V. P. The use of infrared thermography to study the optical characteristics offlames from burning vegetation // Infrared Physics and Technology. 2014. Vol. 67. No. 6. P. 566–573.

4. Clements C. B., Lareau N. P., Seto D., Contezac J., Davis B., Teske C. et al. Fire weather conditions and fire–atmosphere interactions observed during low-intensity prescribed fires – RxCADRE 2012 // Int. J. of Wildl. Fire. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 90–101. DOI: 10.1071/WF14173.

5. Mueller E. V., Skowronski N., Thomas J., Clark K., Gallagher M., Hadden R., Mell W., Simeoni A. Local measurements of wildland fire dynamics in a field-scale experiment // Combust. Flame. 2018. Vol. 194. P. 452–463. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.05.028.

6. FIRESTAR: A Physically based model to study wildfire behavior. DOI:10.1016/j.foreco.2006.08.155.

7. Mell W., Jenkins M. A., Gould J., Cheney Ph. A physics-based approach to modelling grassland fires // Int. J. Wildl. Fire. 2007. Vol. 16. No. 1. P. 1–22.

8. Mell W., Maranghides A., McDermott R., Manzello S.L. Numerical simulation and experiments of burning Douglas fir trees // Comb. Flame. 2009. Vol. 156. P. 2023–2041.

9. Filippi J. B., Bosseur F., Mari C., Stradda S. Numerical experiments using MESONH/FOREFIRE cou-pled atmospheric model // In: 8th Symposium on fire and forest meteorology, Kalispell, Montana USA, 13–15 October 2009.

10. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука СО АН СССР, 1992. 407 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ПРИСУТСТВИИ ВОДЯНОГО ПАРА В УСЛОВИЯХ ТОПОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА

М. А. Мухина*, И. С. Садкин,
Е. П. Копьев, Е. Ю. Шадрин, И. С. Ануфриев *

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
mary-andr@yandex.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию паромасляного горелочного устройства для сжигания жидких углеводородных отходов в условиях топочного пространства. Показана эффективность метода впрыска водяного пара. Такой способ обеспечивает высокую полноту сгорания топлива с одновременным снижением выбросов CO и NO_x в продуктах сгорания.

В работе на примере смеси отработанных моторных масел проводится изучение характеристик горения жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара [1] в условиях закрытого топочного пространства применительно к созданию безопасного способа утилизации некондиционных жидких горючих отходов с получением тепловой энергии.

Представлена модернизированная конструкция оригинального паромасляного горелочного устройства малой мощности [2], основанная на принципе распыла топлива высокоскоростной струей пара, с возможностью регулировки подачи первичного и вторичного воздуха. В ходе исследований определены показатели вредных выбросов при изменении коэффициента избытка воздуха внутри топки. Научная новизна работы заключается в получении новых экспериментальных данных о процессах горения некондиционных жидких углеводородов в условиях закрытой камеры сгорания и с управлением коэффициентом избытка воздуха, которые дополняют сведения о механизмах горения в присутствии пара.

Проведено исследование работы горелочного устройства в диапазоне мощности 15–35 кВт в условиях типового водогрейного котла при различных режимных соотношениях пар/воздух/топливо. При варьировании подачи вторичного воздуха (наддува) была получена калибровочная зависимость массового содержания токсичных веществ в продуктах сгорания от общего избытка воздуха в камере сгорания установки. Показано, что добавление перегретого водяного пара обеспечивает высокую полноту сгорания топлива с одновременным снижением выбросов CO и NO_x в продуктах сгорания.

В ходе экспериментов обосновывается перспективность предложенного принципа сжигания жидких углеводородов при их распылении перегретым водяным паром ввиду наличия ряда практических преимуществ перед существующими и широко применяющимися на практике решениями. Помимо низких показателей по содержанию вредных веществ в уходящих газах, конструкция горелочного устройства обеспечивает бесконтактный распыл, отсутствие топливной системы высокого давления, проблем засорения и коксования каналов подачи топлива.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (№ 18-79-10134-П).

Список литературы

1. 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, vol. 250, pp. 123849, 2022.

2. Патент РФ № 2740722 (ИТ СО РАН) Паромасляное горелочное устройство / Вигриянов М. С.; Ануфриев И. С.; Копьев Е. П.; Садкин И. С.; Шарыпов О. В.

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА НА РАЗВИТИЕ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

Д. А. Хохлов[1], М. Н. Зайченко[1*], А. Н. Тугов[2], В. А. Верещетин[2] *

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
[2] ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
115280, Российская Федерация, Москва, ул. Автозаводская, 14
[*]zaichenkomn@mpei.ru

В энергетических установках горение топлива в большинстве случаев протекает либо в большом объёме топочной камеры, либо в стесненных условиях камеры сгорания. Данные случаи широко и подробно описаны в различных литературных источниках, приведены опытные данные и результаты математического моделирования. Тем не менее встречаются такие энергетические установки, режимные и конструктивные параметры которых не позволяют однозначно определить протекание процесса горения. Одним из таких случаев являются установки, топочные устройства которых, с одной стороны, имеют значительные размеры в направлениях, перпендикулярных оси факела, а с другой – их длина вдоль оси факела невелика и ограничена, например, поверхностью нагрева. Исследованию процесса горения в подобных условиях посвящена данная работа.

В энергетических котлах горение топлива происходит в топочной камере, размеры которой, как правило, не оказывают практически никакого влияния на конфигурацию факела. В других энергетических устройствах применяют камеры сгорания, конструкция которых такова, что создаются определенные стесненные условия. В результате размеры в направлениях, перпендикулярных оси факела, оказывают значительно большее влияние на конфигурацию факела, чем длина вдоль оси факела и конструкция выхода из камеры сгорания. Процессы горения топлива для обоих случаев широко и подробно описаны в литературных источниках.

Значительно меньше сведений представлено для устройств, которые имеют такие размеры в направлениях, перпендикулярных оси факела, что не создает стесненных условий, но выход из топки находится достаточно близко к устью горелки, а поверхности нагрева, расположенные на выходе, создают большое аэродинамическое сопротивление. Такая конструкция применяется для котлов нестандартной компоновки с высокой степенью форсировки, генерирующих пар невысоких параметров.

Целью работы является исследование с помощью программного комплекса ANSYS возможности моделирования влияния поверхности нагрева на процесс горения топлива и конфигурацию факела при помощи так называемых фильтров. В качестве объекта исследования выбрано современное низкоэмиссионное горелочное прямоточно-вихревое устройство со ступенчатым подводом топлива [1]. Трёхмерная геометрическая модель исследуемой области включает горелки, топку и поверхности нагрева за топкой. Модель была построена средствами программного комплекса Solid Works.

В первоначальной геометрии трубы поверхности нагрева за топкой были смоделированы в полноценном виде. Однако это привело к излишнему сгущению расчётной сетки и усложнению расчетов. Было предложено для моделирования влияния поверхности нагрева использовать фильтры, которые позволяют создать требуемые аэродинамическое сопротивление и теплообмен. Сравнение полученных результатов CFD-моделирования с натурным экспериментом на работающем котле показало, что этого оказалось достаточно для получения достоверной картины топочного процесса.

Список литературы

1. Зройчиков Н. А., Григорьев Д. Р., Gamburg M., Пай А. В. Внедрение на энергетическом котле горелочных устройств с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов // Теплоэнергетика. 2021. № 11. С. 71–79. DOI 10.1134/S0040363621110084. EDN MDZNMN.

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

О. В. Шарыпов*, Е. П. Копьев, Д. В. Красинский*

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1
**sharypov@itp.nsc.ru*

Представлены результаты цикла комплексных исследований влияния перегретого водяного пара на характеристики горения углеводородов, обосновывающие перспективный способ эффективного сжигания топлива и отходов с управлением уровнем вредных выбросов.

Повышение экологических показателей технологий производства энергии при сжигании органического топлива является актуальной практической задачей. Ограничения касаются, в первую очередь, выбросов таких продуктов сгорания, как оксиды азота, монооксид углерода и сажа. Прогресс в решении этих задач связан с развитием научных основ технологий сжигания топлива. В этом направлении в ИТ СО РАН за последние годы выполнен комплекс экспериментальных и численных исследований, связанный с использованием перегретого водяного пара, подаваемого в зону горения углеводородного топлива, показана перспективность предложенного способа управления процессом горения [1].

Разработан ряд оригинальных лабораторных горелочных устройств на жидком углеводородном топливе, обеспечивающих устойчивое интенсивное горение (в т. ч. горелки испарительного и распылительного типа, прямоточные и вихревые, с автономным или внешним производством перегретого водяного пара с контролируемыми параметрами, при естественной и регулируемой подаче топлива и воздуха), получены патенты на принципиальные технические решения. Созданные горелочные устройства 10–50 кВт испытаны на огневом стенде, оснащенном современными измерительными системами на основе передовых оптических методов диагностики реагирующих потоков, методов газового анализа, ИК-термографии, калориметрии и др. В широком диапазоне параметров компонентов смеси и режимов подачи топлива исследованы основные показатели процесса горения: дисперсный состав распыляемого жидкого топлива, распределение температуры во внешнем факеле, состав промежуточных и «равновесных» газообразных продуктов сгорания, концентрация и структура сажевых частиц, тепловой эффект, характеризующий полноту сгорания топлива [2, 3]. Экспериментально подтвержден ряд значимых преимуществ предложенного способа организации процесса сжигания жидких углеводородных топлив и опасных производственных отходов. Показано, что, в отличие от интенсификации горения жидкого топлива за счет потока воздуха, подача в зону горения высокоскоростной струи перегретого водяного пара обеспечивает возможность управления производством NOx. С использованием пара в лабораторных условиях реализованы режимы горения дизельного топлива со значительным снижением концентрации NOx в продуктах сгорания (менее 30 ppm) при содержании CO до 5 ppm и тепловыделении на уровне высшей теплоты сгорания топлива (характерный уровень содержания сажи ~30 мг/м^3). Установлено, что основным управляющим параметром служит отношение расходов пара и топлива, определяющее показатели горения различных жидких углеводородов (при прочих равных условиях). Показано, что созданные горелочные устройства с большим запасом удовлетворяют наиболее жестким современным экологическим требованиям к показателям устройств аналогичной мощности (III класс экологического норматива EN:267).

Этот важный эффект, впервые зафиксированный с помощью надежных измерений, основан на процессе паровой газификации продуктов термического разложения топлива в условиях недостатка окислителя (воздуха), повышении концентрации активных радикалов и снижении уровня температуры в факеле. Немаловажную роль играет также разработанный способ ввода пара в камеру сгорания – в виде высокоскоростного потока, обеспечивающего без применения топливной форсунки эффективное диспергирование жидкого топлива, а также интенсивное испарение горючего и перемешивание компонентов смеси. Применение паровой газификации органического топлива характерно и для технологии беспламенного сжигания (так называемые режимы flameless oxidation или MILD combustion), от которой предложенный способ отличается использованием водяного пара в сочетании с уникальной аэродинамической компоновкой, применяемой в лабораторных горелках ИТ СО РАН.

Полученные детальные экспериментальные данные позволяют осуществить верификацию моделей и валидацию расчетов, включая моделирование процесса диспергирования и структуры турбулентного газокапельного реагирующего потока [4, 5]. Сравнение демонстрирует хорошее соответствие по составу продуктов сгорания и распределению температуры во внешнем факеле. Численное моделирование обеспечивает получение информации о процессах, протекающих в области, недоступной для измерений. Внутри исследуемого горелочного устройства выявлена трехслойная структура потока с газификацией жидкого топлива и образованием синтез-газа [5], показано, что такая структура характерна для различных видов используемого топлива: дизель, метан, природный газ.

Верифицированные математические модели позволяют успешно прогнозировать режимы горения и могут быть использованы для задач оптимизации конструктивных характеристик и режимных параметров горелочных устройств под конкретные практические задачи. В частности, моделирование горения пылеугольного топлива в осесимметричном горелочном устройстве при комбинированной подаче горючего газа и водяного пара показало «масштабируемость» эффектов, характерных для лабораторной горелки, на устройство с увеличенными в 10 раз размерами и мощностью 1 МВт.

Наряду с практической применимостью полученных результатов для разработки перспективных технологий производства энергии, результаты обеспечивают возможность эффективной утилизации некондиционных жидких углеводородных топлив, что открывает широкие перспективы применения полученных научных результатов для решения важных экологических задач, таких как ликвидация последствий разливов нефтепродуктов и др.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку исследований в рамках проекта № 18-79-10134.

Список литературы

1. Патент РФ № 2219435. Способ бессажного сжигания топлива. Дата публикации: 20.12.2003. Патентообладатель: ИТ СО РАН / Вигриянов М. С., Саломатов В. В., Алексеенко С. В.

2. Anufriev I. S., Kopyev E. P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Processing Technology, vol. 192, pp. 154-169, 2019. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.027

3. Kopyev E., Anufriev I., Alekseenko S., Sharypov O., Vigriyanov M. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy, vol. 250, article No. 123849, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123849.

4. Minakov A. V., Kuznetsov V. A., Anufriev I. S., Kopyev E. P. Numerical analysis of a pre-chamber vortex burner with a steam blast atomizer // Fuel, vol. 323, article No. 124375, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124375.

5. Krasinsky D. V., Sharypov O. V. Numerical analysis of the water steam jet gas-dynamic parameters influence on the hydrocarbon fuel combustion in a pilot burner // Journal of Physics: Conference Series, vol. 1369(1), article No. 012027, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1369/1/012027.

Секция 10
«Теплофизические вопросы получения новых видов топлива»

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОЙ МАССЫ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

М. П. Баранова[1,2] *

[1]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
[2]Красноярский государственный аграрный университет
660049, Российская Федерация, Красноярск, пр. Мира, 90
marina60@mail.ru

Определена технологическая и техническая возможность глубокой переработки низкосортного угля и отходов углеобогащения путем ожижения с использованием методов экстремальных механохимических и физических воздействий, выработаны рекомендации по прикладному использованию полученных материалов в теплоэнергетике. Органическая часть твердой массы, приготовленной углемасляной суспензии, которая превратилась в относительно тяжелую органическую жидкость, может быть использована в качестве котельного или моторного топлива, а также в качестве исходного сырья для получения жидких углеводородов.

Технологический суверенитет России зависит от новых материалов, определяющих развитие инновационных материалов. Высокий уровень техногенной нагрузки угледобывающей и углеперерабатывающей промышленности на окружающую среду приводит к сокращению среды обитания человека. Создание индустриальных решений по вовлечению отходов угольной отрасли в хозяйственный оборот является актуальной задачей. Изучение возможности использования углешламов для получения различных органических продуктов, пригодных в качестве сырья для производства разнообразных товарных органических соединений, стимулируется ограниченным количеством углеводородов, производимых из нефти. Из угля можно получать различные циклические углеводороды, используемые в производстве широкого ассортимента полимеров, красителей и лекарств [1]. Для решения проблем использования низкосортных углей и утилизации отходов углеобогащения создана установка по ожижению органической массы. В работе представлены результаты выполненных исследований и показаны перспективы решения имеющейся проблемы. Таким образом, целью работы являлось получение исходных данных для создания пилотного образца технологического комплекса. Для исследования возможности глубокой трансформации органической массы угля с применением механо-химической деструкции в кавитационной установке были отобраны и использованы пробы тонкодисперсных отходов углеобогащения, а именно фильтр-кека «ОФ имени С. М. Кирова». Результаты технического и элементного анализов показали, что влажность представленных для проведения исследований проб фильтр-кека была стабильно высокой (порядка 40 %). Зольность фильтр-кека зависит от качества исходного сырья и меняется в узком интервале значений (A^d = 30,7 %; 26,8 %). Гранулометрический состав фильтр-кека включал классы крупности до 3,0 мм. Исходное сырье предварительно подвергали мокрому измельчению до кл. 0-1(3) мм с последующей деминерализацией водоугольной суспензии методом масляной грануляции с получением угольного концентрата и водопородной суспензии, при этом экстремальному физическому воздействию подвергали органоугольную суспензию, приготовленную на основе полученного угольного концентрата. Использование в качестве масляного агента преимущественно исходного органического растворителя приводит к повышению эффективности процесса деструкции органических соединений.

Ожижение органической массы угля в кавитационной установке с добавлением донора водорода. Одно из важнейших направлений ожижения – это прямая конверсия угля в органические продукты. С этой целью реакции проводят так, чтобы расщепить выбранные связи для получения представляющих интерес структурных фрагментов. Высокоселективное расщепление исходных структур может привести к образованию нескольких ценных химических промежуточных веществ или «прекурсоров» ряда определенных товарных продуктов [2].

Были проведены исследования по возможности ожижения органической массы угля при воздействии кавитационных явлений, возникающих в роторно-пульсационном аппарате (РПА) с добавлением донора водорода. Количество добавки составляло от 1 до 10 % на сухую органическую массу угля. Количество оборотов 3000, время воздействия от 10 до 30 мин. В качестве донора водорода использовали смесь изомеров 60 % цис-декалин и 40 % транс-декалина, который является бициклическим органическим соединением и используется в качестве растворителя для многих смол или топливных присадок. На рис. 1 представлено влияние количества циклов обработки суспензии в РПА на уменьшение твердой фазы в суспензии.

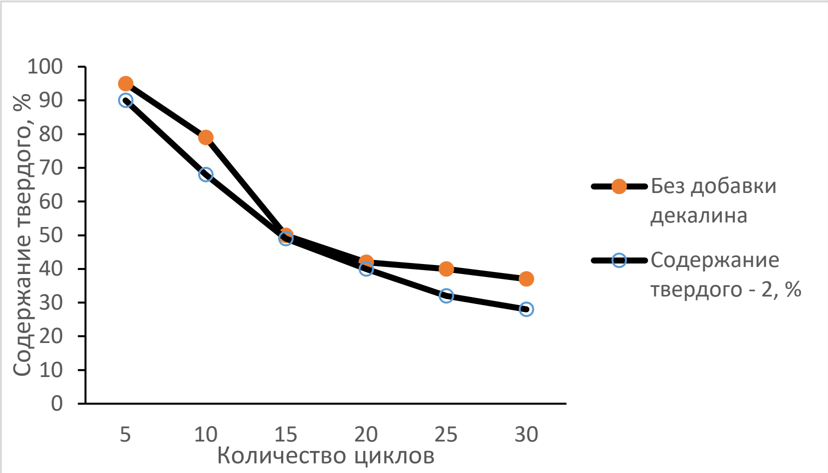


Рис. 1. Влияние количества циклов пропускания суспензии через РПА на процесс ожижения

Продукты ожижения углей анализировались методами ИК-спектроскопии. Определено наличие в жидкой фазе 5-метилтетралин и 6-метилтетралин, которые являются продуктами расщепления органических веществ углей, представляют собой ценные химические реагенты. Следует отметить, что эти химические соединения могут образовываться при трансметилировании декалина – донора водорода при расщеплении структур органических веществ углей.

Полученная смесь углеводородов может быть подвергнута ректификации с получением фракций углеводородов для получения пластмасс, масляных фракций и всего спектра углеводородов для вторичного использования. Эффективное использование указанных выше веществ позволит получить не только экономический, но и существенный экологический эффект.

Разработанная технология позволит решить проблему повышения ценности конечной угольной продукции, в т. ч. за счет вовлечения в оборот неиспользуемых тонких угольных шламов.

Список литературы

1. Murko V. I., Temlyantsev M. V., Litvinov Y. A., Volkov M. A., Baranova M. P. Development and substantiation of technological solutions for the transformation of organic matter of fine-dispersed waste coal IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciencethis link is disabled, 2021, 823(1), 012043

2. Murko V. I., Baranova M. P., Grishina I. I. Deep Processing Of Organic Mass Of Finely Dispersed Coal Waste // E3S Web of Conferences. VIth International Innovative Mining Symposium. 2021. P. 02014.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕОЛИТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

А. Г. Батухтин, С. Г. Батухтин, В. И. Рудой* *

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

Описывается возможность применения цеолитсодержащей породы для снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при горении. Описаны результаты первых опытных исследований в данном направлении.

Сжигание угольного топлива для нужд энергоснабжения сопровождается выделением большого количества разнообразных загрязняющих веществ. К данным веществам можно отнести оксиды азота, оксиды серы, бенз(а)пирен, оксиды углерода. Во многих населенных пунктах наблюдается превышение допустимых концентраций данных веществ [1].

Переход на другие виды топлива, в частности газовое топливо, мог бы решить большую часть этих проблем. Однако не всегда существует возможность подвода газопровода или строительства хранилища под сжиженный газ. Смена твердого топлива на более доступный и экологичный аналог – древесину – также затруднена в связи с её низкой плотностью и необходимостью хранить большие объемы топлива. Внедрение же различных способов очистки газов бывает затруднено или невозможно, особенно для небольших точечных источников теплоснабжения. Отсутствует как финансовая, так и техническая возможность покупки и установки соответствующих устройств для подавления выбросов.

Частичным решением данной проблемы может стать смена угольного топлива на топливные брикеты. За счет возможности производить их из различных компонентов можно добиваться различных свойств горения, в т. ч. теплоты сгорания, сопоставимой с углем и более низким выбросом загрязняющих веществ. В частности, возможно производство брикетов из угольной пыли и древесных опилок без связующего компонента с добавлением адсорбента – цеолита. Связующим компонентом в брикетах будет выступать лигнин, содержащийся в древесине.

Сама по себе смесь древесины и угля при горении показывает снижение уровня выхода загрязняющих веществ [2]. В присутствии цеолита данный уровень снижается еще больше. Первые опыты по изготовлению и сжиганию данных брикетов показали снижение выбросов диоксидов азота и серы при горении на 60 %. Дальнейшее исследование различных вариантов соотношения угля, древесины и цеолита в брикете позволит добиться максимального экологического эффекта при сохранении необходимых теплофизических свойств.

Топливные брикеты также имеют следующие преимущества: более однородный состав топлива; форма, удобная для применения в автоматических системах топливоподачи.

Список литературы

1. Тимофеева С. С. Техносферная безопасность Байкальского региона: современное состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3. № 4(12). С. 75–90. DOI 10.21285/1814-3520-2018-4-75-90.

2. Янковский С. А., Кузнецов Г. В. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве // Химия твердого топлива. 2019. № 1. С. 26–33. DOI 10.1134/S0023117719010080.

РАЗРАБОТКА НАНОСТРУКТУРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

М. Ю. Василевичев*, В. В. Ан *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
**myv7@tpu.ru*

В работе рассматриваются методы переработки бытового пластика. Выявлены основные проблемы различных способов утилизации полимеров. Предложен наиболее оптимальный метод переработки отходов – пиролиз. Для достижения наилучшего эффекта протекания процесса возможно применение различных катализаторов. Полученные продукты пиролиза можно использовать для получения полимерных продуктов, а также жидкого котельного топлива.

Производство и потребление пластиковых отходов растет очень высокими темпами, вместе с увеличением населения, быстрым экономическим ростом, непрерывной урбанизацией и изменениями в образе жизни. Исходя из того, что срок службы пластика довольно короткий, то вместе с его производством растет и количество пластиковых отходов. Мировое производство пластика оценивается в 300 млн тонн ежегодно и постоянно увеличивается [1]. Полимеры изготавливаются из нефтехимических углеводородов с добавками, такими как антипирены, стабилизаторы и окислители, которые затрудняют биоразложение. Говоря о переработке пластика, следует отметить, что есть несколько вариантов: 1) сжигание; 2) химическая переработка; 3) механическая переработка.

При сжигании отходов для выработки энергии можно отказаться от этапа сортировки сырья. Несмотря на это, при данном виде переработки существенно влияние на окружающую среду: индекс влияния на окружающую среду находится на очень высоком уровне. Механическая переработка, несмотря на простоту аппаратного оформления, имеет существенный недостаток, а именно снижение физико-механических свойств полученного продукта. Если рассматривать вопрос со стороны экологии и экономики, то наиболее оптимальным является процесс пиролиза пластика. Целью пиролиза пластика является разложение исходных полимеров до мономеров. Полученные продукты пиролиза возможно использовать для получения полимерных продуктов, а также извлечения жидкого топлива.

Пиролиз – это термическое разложение пластиковых отходов при различных температурах (300–900 °C) в отсутствие кислорода с образованием жидкого котельного топлива и пирогаза. Различные типы катализаторов используются для улучшения процесса пиролиза пластиковых отходов в целом и для повышения эффективности процесса. Катализаторы играют очень важную роль в повышении эффективности процесса, нацеливании на конкретную реакцию и снижении температуры и времени процесса. В процессах пиролиза пластика используется широкий спектр катализаторов, но наиболее широко используемыми катализаторами являются ZSM-5, цеолит, Y-цеолит, FCC и MCM-41. Каталитическая реакция при пиролизе пластиковых отходов на твердокислотных катализаторах может включать реакции крекинга, олигомеризации, циклизации, ароматизации и изомеризации. Катализаторы делятся на два типа – гомогенные и гетерогенные.

Основным недостатком гомогенных катализаторов является сложное отделение от реакционной смеси после реакции, тогда как гетерогенные катализаторы легко отделяются, поскольку они находятся в твердом состоянии.

Часто применяемые $TiCl_4$, $AlCl_3$, $FeCl_3$ и $TiCl_3$ являются сильными кислотами Льюиса и действуют как акцепторы электронных пар. Они могут растворяться в расплавленном полимере и изменять распределение заряда полимерной цепи с образованием карбкатиона [2, 3]. Использование $AlCl_3$ в качестве гомогенного катализатора привело к более низкой температуре процесса и более высокому выходу газообразного продукта, но к более низкой селективности по мономеру по сравнению с некаталитическим процессом [4]. В настоящее время основным направлением исследований в области каталитического пиролиза остается разработка гетерогенных катализаторов.

В литературе приводятся исследования достаточно большого количества гетерогенных катализаторов, таких как цеолиты, нанокристаллический цеолит (HUSY, n-HZSM-5, Hβ, HMOR), кремнезем-глинозем, глинозем, катализаторы псевдоожиженного крекинга (FCC), MCM-41, цементный порошок [5], глина/песок, каолин [6], SBA-16, оксиды металлов, молекулярные сита и т. д.

Наибольшее влияние на процесс пиролиза оказывают кислотные свойства, размер пор и площадь поверхности катализатора. Все перечисленные выше катализаторы имеют разные свойства и по-разному влияют на скорость реакции, состав продукта и другие параметры. Механизм крекинга, который определяется кислотностью и плотностью кислотных центров на поверхности катализатора, включает образование карбкатиона с изомеризацией, β-расщеплением, случайным разрывом связей, олигомеризацией/алкилированием, переносом водорода и образованием ароматических соединений [7]. Кислотность гетерогенных кристаллических катализаторов определяется центрами кислот Льюиса и Бренстеда, которые, как полагают, находятся внутри пор материала [8], поэтому размер пор катализатора должен быть достаточно большим. Центры с высокой кислотностью на поверхности катализатора приводят к образованию изомеризованного продукта посредством передачи иона водорода на полиолефин. Несмотря на то, что аморфный ZSM-5, Y-цеолиты, кремнезем-глинозем и другие различные кислотные катализаторы широко используются в промышленности, они нежелательны из-за высокой стоимости их производства, невозможности их регенерации, вследствие чего требуется их утилизация. В последнее время большое внимание уделяется глинистым катализаторам, достоинствами которых является экологичность и быстрая регенерация практически без потери активности, что снижает стоимость процесса.

Список литературы

1. Ratnasari D. K., Nahil M. A., Williams P. T. (2017). Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. J. Anal. Appl. Pyrolysis 124, 631–637. doi: 10.1016/j.jaap.2016.12.027.

2. Donaj P. J., Kaminsky W., Buzeto F., Yanga, W. (2012). Pyrolysis of polyolefins for increasing the yield of monomers' recovery. Waste Manag., 32, 840–846.

3. Kaminsky W., Nuñez Zorriqueta, I.-J. (2007). Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 79, 368–374.

4. Kaminsky W., Nuñez Zorriqueta, I.-J. (2007). Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 79, 368–374.

5. Obeid F., Zeaiter J., Al-Muhtaseb A.H., Bouhadir K. (2014). Thermo-catalytic pyrolysis of waste polyethylene bottles in a packed bed reactor with different bed materials and catalysts. Energy Convers. Manag., 85, 1–6.

6. Panda A.K., Singh R.K. (2001). Catalytic performances of kaoline and silica alumina in the thermal degradation of polypropylene. J. Fuel Chem. Technol., 39, 198–202.
7. Almeida D., Marques, de F. M. (2015). Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene plastic waste. Polimeros, 26, 1–8.
8. Chlup Z., Černý M., Strachota A., Sucharda Z., Halasová, M., Dlouhý I. (2014). Influence of pyrolysis temperature on fracture response in SiOC based composites reinforced by basalt woven fabric. J. Eur. Ceram. Soc., 34, 3389–3398.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

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

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

Сформулированы основные условия применения газогенерации в энергетике ДФО. Рассмотрена технологическая схема экспериментальной установки, определены характеристики углей, рекомендуемые для использования в ней.

В сегодняшних реалиях цены на органическое топливо постоянно растут, поэтому вопросы рационального использования энергоресурсов весьма актуальны. Наиболее распространенными видами жидкого топлива, применяемого в большой и промышленной энергетике, являются топочный мазут и дизель. Фактически их использование обусловлено отсутствием возможности подключения к магистрали природного газа и достаточной удаленностью. Мировой опыт показывает, что внедрение газогенераторных технологий в энергетику при определенных условиях весьма перспективно [1].

Для исследования процессов газификации разработана и сконструирована установка для получения генераторного газа на базе «Энергетического полигона» ДВФУ, схема которой приведена на рис. 1.

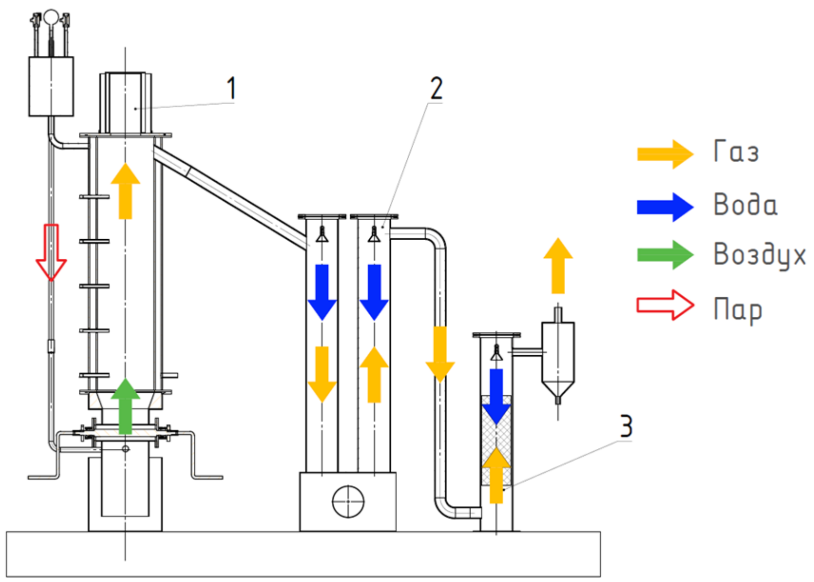


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки по газификации угля:
1 – газогенератор; *2* – охладитель; *3* – скруббер;

Проведенные теоретические исследования показывают, что наиболее подходящими для газификации являются угли битуминозные и длиннопламенные угли с умеренным выходом летучих веществ, а также для снижения негативного воздействия на окружающую среду для газификации не подходят угли с содержанием серы более

0,5 % и зольности более 25 % [2]. При паровоздушной газификации при различных технологиях возможно получение газа с низшей теплотой сгорания $Q_i^r = 11–15$ МДж/нм^3. Бурые угли, применяемые в энергосистемах ДФО, возможно использовать при соблюдении условий приведенных выше и влажности менее 30 %, так как ее чрезмерное количество приведет к снижению энергетической ценности полученного газа и повышению расхода первичного топлива, а вкупе с средним содержанием золы повысит удельные затраты на содержанием и эксплуатацию систем золоудаления.

Получение генераторного газа относится к химическому производству II класса, для которых регламентируется санитарно-защитная зона 500 м [3], что невозможно обеспечить для некоторых энергоисточников.

Для реальной окупаемости проекта реконструкции переводом котельной на сжигание генераторного газа, ее установленная мощность должна составлять не менее 23 МВт. Перевод твердотопливных котельных и вовсе нецелесообразен, так как все положительные моменты перекрываются усложнением технологии сжигания.

Целесообразна замена жидкотопливной составляющей на ТЭЦ средней мощности, так как помимо основного продукта газификации в небольшом количестве возможен выход газойля, имеющего теплоту сгорания около 37 Мдж/кг. Комбинированное сжигание генераторного газа и жидкой фракции позволит полностью покрыть необходимость в мазуте для подсветки и растопки, а также при благоприятном стечении обстоятельств снизить долю прямого сжигания твердого топлива.

Список литературы

1. Кейко А. В., Баталов Н. Н., Богатова Т. В. Газогенераторные технологии в энергетике. Екатеринбург: ИД «Сократ», 2010. 610 с.

2. Лесных А. В., Штым К. А., Головатый С. В. Условия эффективного применения газогенераторов в промышленной энергетике Приморского края // Вологдинские чтения. 2012. № 80. С. 179–181.

3. СанПин 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов», с изм. от 28.02.2022.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Л. Б. Директор, В. А. Синельщиков, Ю. М. Фалеева* *

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
**faleeva.julia@mail.ru*

Рассмотрена возможность использования шестиканальной кинетической модели Парка (Park) для расчета тепломассообменных процессов, протекающих в реакторах пиролиза биомассы. Разработан программный код и проведены экспериментальные исследования термической деструкции древесины. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало, что использование рассмотренной кинетической модели применительно к условиям реактора низкотемпературного пиролиза (торрефикации) может привести к существенным ошибкам в составе конечных продуктов пиролиза.

При численном моделировании процессов термохимической переработки биомассы в различные виды топлива (твердое, газообразное, жидкое) необходимо иметь адекватную кинетическую модель процесса деструкции биомассы и соответствующие кинетические константы. Наиболее простой моделью является одноканальная модель, включающая только одну брутто-реакцию, которая описывает изменение массы перерабатываемого сырья. Такая модель была использована в работе [1] для описания процесса получения кондиционного твердого биотоплива в реакторе торрефикации с движущимся слоем и прямым нагревом перерабатываемого сырья выхлопными газами от электрогенерирующей установки на базе газопоршневого двигателя. Явный недостаток такой модели заключается в принципиальной невозможности корректного учета теплового эффекта экзотермических реакций, которые являются вторичными и связаны с химическими превращениями первичных продуктов термического распада. Необходимость учета экзоэффектов при температурах выше 530 К продемонстрирована как в экспериментах на лабораторном стенде [2], так и на пилотной установке для торрефикации древесных пеллет [3]. В [4] экспериментально показано, что за счет экзотермических реакций, сопровождающих процесс термической деструкции древесины, температура в центре образца может превышать температуру его поверхности. Нагрев проводился в электрической трубчатой печи, температура изменялась в диапазоне 638–879 К.

На основе анализа имеющихся в литературе кинетических моделей и полученных экспериментальных данных в [4] предложена новая модель. В основе модели лежат три первичные эндотермические реакции, приводящие к образованию конденсирующихся и неконденсирующихся летучих продуктов пиролиза и промежуточного состояния твердой фазы, и три вторичные экзотермические реакции, две из которых описывают конверсию конденсирующихся летучих продуктов в газ и угольный остаток, а третья – конверсию промежуточного состояния в угольный остаток. Для констант скорости всех реакций использовалась аррениусовская зависимость. Предложенная модель позволила удовлетворительно описать полученные экспериментальные данные. Следует отметить, что с уменьшением температуры различие между экспериментальными и расчетными зависимостями, описывающими изменение массы образца в процессе нагрева, возрастало.

В настоящей работе для выяснения вопроса о корректности использования предложенной в [4] кинетической модели и программного кода на ее основе в низкотемпературной области, соответствующей условиям реактора торрефикации, проведено сопоставление результатов расчета с результатами термогравиметрического анализа.

В математической модели расчета процесса нагрева образца древесины с заданной начальной пористостью учитывались три механизма переноса тепла: теплопроводность твердого каркаса и летучих продуктов пиролиза, представлявших собой парогазовую смесь, излучение и конвективный теплообмен за счет потока летучих продуктов пиролиза. Предполагалось, что течение газовой фазы описывается линейным законом Дарси, а парогазовая смесь летучих продуктов пиролиза подчиняется уравнению состояния идеального газа. Для описания термической деструкции образца использовалась кинетическая схема, предложенная в [4]. Верификация программы проводилась путем сопоставления результатов расчета с результатами [4].

Особенностью рассматриваемой кинетической модели является то, что образующаяся на первой стадии твердая промежуточная фракция в ходе дальнейшей конверсии не изменяет своего фазового состояния. При этом при температуре ниже 550 К характерное время реакции образования промежуточной фракции меньше, чем время конверсии исходного сырья в летучие продукты пиролиза. С ростом температуры ситуация меняется на противоположную. Из сказанного следует, что в рамках рассматриваемой кинетической модели массовый выход твердой фазы должен существенным образом зависеть не только от конечной температуры, но и от режима нагрева. При одной и той же конечной температуре нагрева, делая выдержку при температуре меньшей 550 К, можно увеличивать долю промежуточной твердой фракции, а следовательно, и долю твердой фракции в конечных продуктах. Этот вывод подтверждают результаты расчета, проведенные для двух режимов нагрева (рис. 1, *a*), – различие в величине массового выхода твердой фазы составило более 18 %. Из результатов термогравиметрического анализа, выполненного при тех же режимах нагрева (рис. 1, *b*), видно, что массовый выход твердой фракции практически не зависит от режима нагрева – различие для двух режимов не превышало 1 %. Отметим, что расхождение между долей твердой фазы в конечных продуктах, измеренной и рассчитанной для варианта нагрева без выдержки при промежуточной температуре, не превышало 3,5 % (кривые 4).

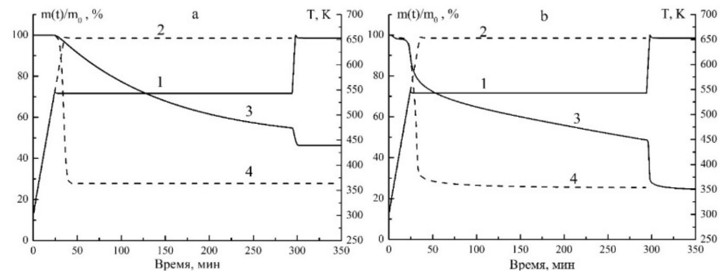


Рис. 1. Изменение температуры (1, 2) и относительной массы образца (3, 4) для двух режимов нагрева: *a* – расчет, *b* – эксперимент

Таким образом, сопоставление результатов расчета, соответствующих условиям реактора торрефикации, с результатами термогравиметрического анализа показало некорректность использования предложенной в [4] кинетической модели для описания тепломассообменных процессов в низкотемпературной области.

Список литературы

1. Director L. B., Sinelshchikov V. A. Numerical modeling of torrefaction reactor integrated in energy technological complex // Energy, vol. 167, pp. 1194–1204, 2019.

2. Faleeva J. M., Sinelshchikov V. A., Sytchev G. A., Zaichenko V. M. Exothermic effect during torrefaction // J. Phys.: Conf. Ser., 946, 012033, 2018.
3. Shevchenko A. L., Sytchev G. A., Zaichenko V. M. Possibility of the use of exothermic-reactions heat from thermal destruction of biomass to increase the energy efficiency of the torrefaction process // J. Phys.: Conf. Ser., 1147, 012093, 2018.
4. Park W. C., Atreya A., Baum H. R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis // Combustion and Flame, vol. 157, pp. 481–494, 2010.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТИГЛЕ С УГЛЕМ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКЛОННОСТИ УГЛЯ К САМОВОЗГОРАНИЮ

А. И. Докучаева*, О. Н. Малинникова, Ю. А. Филиппов *

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН
111020, Российская Федерация, Москва, Крюковский тупик, 4
**ana-anastasia2015@yandex.ru*

Термогравиметрический анализ (ТГА) применяется при определении некоторых свойств углей и также используется при изучении механизма нагрева угля. Для выбора оптимальной скорости нагрева при определении склонности углей к самовозгоранию методом ТГА построены модели распределения температуры в тигле с образцом угля при скоростях нагрева 3 и 10 °С/мин. Получено, что скорость нагрева 3 °С/мин способствует более равномерному прогреву образца угля при достижении заданной температуры 300 °С. При нагревании угля со скоростью 10 °С/мин температура образца заметно отстает от температуры нагрева, создаются заметные градиенты температуры в самом образце и процессы, происходящие в угле при нагревании, становятся более размытыми.

Увеличение скорости добычи угля и интенсивность обработки действующих углепластов влияют на проблему самовозгорания угля. В скором будущем угледобыча столкнется с ужесточением экологического надзора за выбросами газов при горении. Для определения угольных пластов с высоким риском самовозгорания необходимо улучшить существующие лабораторные методы оценки угля к самовозгоранию, объединить результаты с фактическими данными разрабатываемого участка и пересмотреть систему действующих методик, чтобы разработать эффективные способы предотвращения самовозгорания угля при ведении добычных работ и при хранении угля.

Среди многих тепловых методов оценки склонности угля к самовозгоранию, метод термогравиметрического анализа (ТГА) позволяет регистрировать изменение массы образца угля во времени с ростом температуры, однако результаты анализа зависят от вводных параметров, в частности, от выбранной скорости нагрева камеры анализатора [1; 2]. В работе [3] обосновано применение метода ТГА для обнаружения реакции сорбции кислорода образцами углей, которая определяет химическую активность исследуемых углей в низкотемпературной зоне окисления до 300 °С и характеризует склонность углей к самовозгоранию.

Для подбора оптимальной скорости нагрева нами были построены модели распределения температуры в тигле с образцом угля при скоростях нагрева 3 и 10 °С/мин. Расчет проводился методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Были заданы условия нагрева с 22 до 300 °С при равномерном нагреве на стенки тигля в среде с воздухом. Получили, что при быстром нагреве (10 °С/мин) по прошествии 30 мин температура в образце составила 174 °С в местах соприкосновения со стенками тигля и 167 °С в середине образца. При скорости 10 °С/мин образец не достиг заданной температуры 300 °С и нагрев во всем объеме образца произошел в неравной степени. При медленном нагреве образец достиг температуры 300 °С. Скорость 3 °С/мин позволила добиться более равномерного распределения температуры во всем объеме исследуемого угля за 90 мин нагрева.

Список литературы

1. Onifade M., Genc B. A review of research on spontaneous combustion of coal // International Journal of Mining Science and Technology, vol. 30, pp. 303–311, 2020.

2. Mohalik N., Lester E., Lowndes I. Application of TG technique to determine spontaneous heating propensity of coals // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 143, pp. 185–201, 2020.

3. Докучаева А. И., Малинникова О. Н., Палкин А. Б. Усовершенствованный метод оценки химической активности углей при определении их склонности к самовозгоранию // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 5. С. 483–487.

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ ПРИ СЖИГАНИИ КАПЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЖИДКИХ БИОТОПЛИВ

В. В. Дорохов*, Г. С. Няшина, П. А. Стрижак *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
**vvd11@tpu.ru*

Приведены результаты экспериментальных исследований состава продуктов сгорания перспективных биотопливных суспензий на основе воды, рапсового масла и биомассы в виде опилок. Эксперименты проведены на стенде, основными элементами которого являлись трубчатая муфельная печь (диапазон температуры 700-900 °C) и газоанализатор с группой сенсоров для регистрации совокупности газов: CO_2, CO, CH_4, H_2, SO_2 и NO. Установлены тренды изменения основных антропогенных выбросов в течение всех стадий реагирования топлив. Вычислены средние значения концентраций основных продуктов сгорания. Определены условия эффективного сжигания жидких биотоплив на основе жидких и твердых отходов растительного происхождения.

Мировые тенденции роста объемов топлив из числа отходов растительного происхождения [1] демонстрируют стремление к увеличению доли перспективных биотоплив в энергетическом секторе. В качестве компонентов таких топлив в настоящее время широко применяются [2]: отходы лесного хозяйства, отходы деревообработки, сельскохозяйственные культуры, сточные воды, твердые бытовые отходы, продукты масленичного производства, водоросли. При этом сжигание такого рода композиций может быть реализовано как в виде сухих смесей, так и определенных перемешанных и неперемешанных жидкостей (суспензий, растворов, эмульсий).

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда. Процессы зажигания и горения эмульсионных и суспензионных топлив протекали в горизонтальной электрической печи Nabertherm R 50/250/13 (диапазон варьирования температуры 20–1200 °C; температура регулируется по сигналу встроенной термопары типа S). Диапазон варьируемых в эксперименте температур составлял 700–900 °C. Контроль и измерение состава газа, образующегося при сжигании рассматриваемых топлив, осуществлялись с применением газоаналитической системы Тест 1 («Бонэр-ВТ», г. Новосибирск).

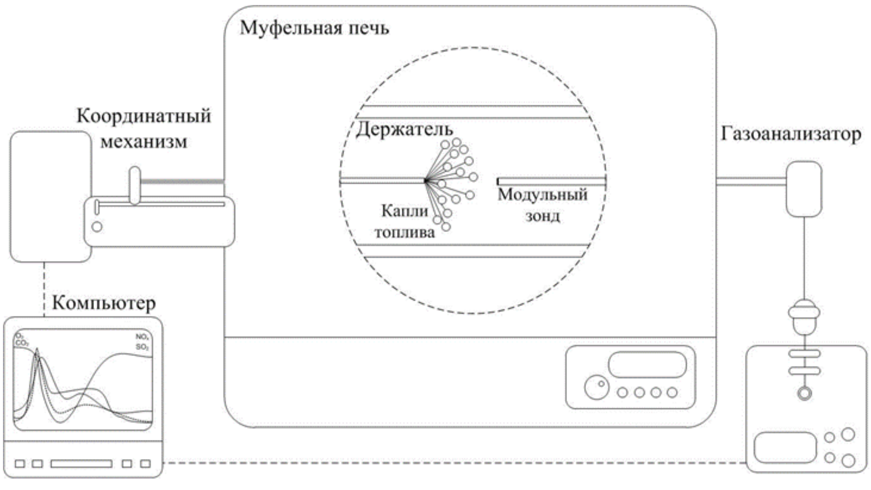


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

На рис. 2 представлены концентрации оксидов углерода при варьировании температуры в муфельной печи. Рост температуры стимулировал выделение CO_2. Установлено (рис. 2, *а*), что при горении смесевых топлив средние концентрации CO_2 увеличились на 10–52 % по сравнению с отдельными компонентами (каплями рапсового масла и частицами опилок). В ходе экспериментальных исследований при горении суспензий с высокой долей масла (90 и 80 %) регистрировались процессы диспергирования и микровзрывного измельчения капель жидкостей с неоднородным компонентным составом. Данные эффекты позволяли кратно увеличить площадь поверхности испарения и химического реагирования. Более мелкая дисперсия капель приводила к большему контакту топлива с воздухом. Следовательно, за счет микровзрывного измельчения капель суспензий повышалась степень выгорания топлива, происходило более активное окисление углеродной части, что подтверждается ростом концентраций CO_2.

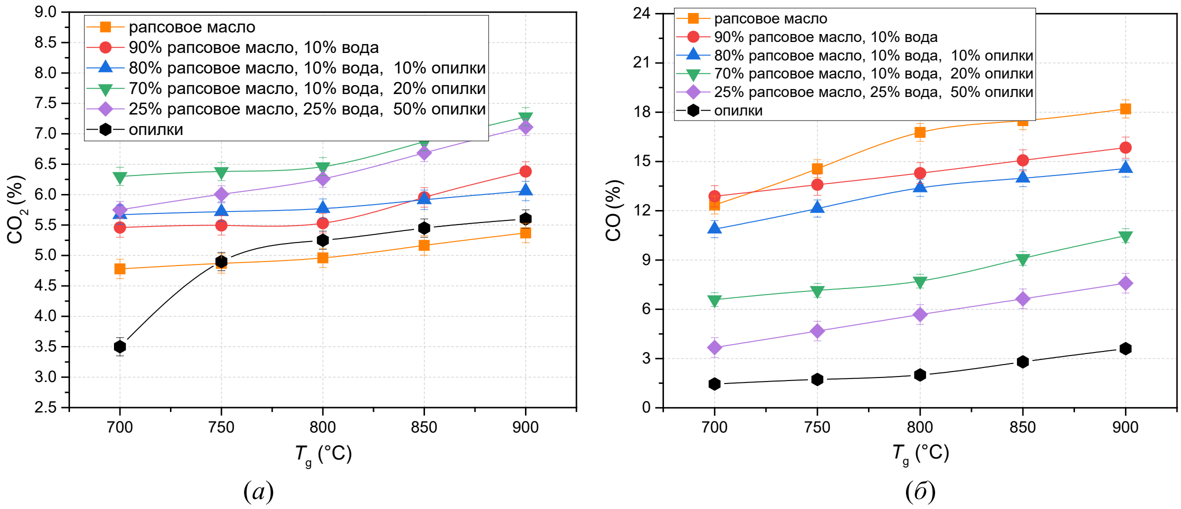


Рис. 2. Концентрации оксидов углерода в зависимости от температуры в камере сгорания

На рис. 2, *б* представлены установленные в проведенных опытах значения концентраций монооксида углерода при горении разных топлив. Получена хорошая корреляция между концентрациями CO и CO_2. Микровзрывное измельчение капель топлива интенсифицировало его смешение с воздухом. Воздушно-топливный межфазный слой уменьшался, в результате чего интенсифицировался процесс горения, что вызывало снижение значений CO. Так, для составов «90 масс. % рапсовое масло, 10 масс. % вода» и «80 масс. % рапсовое масло, 10 масс. % вода, 10 масс. % опилки» концентрации CO снизились на 7–20 % относительно рапсового масла. Однако минимальные концентрации монооксида углерода регистрировались при горении композиций с содержанием опилок около 20 и 50 %. Последнее также связано с интенсификацией горения за счет процессов диспергирования и синергетических эффектов, возникающих между опилками и рапсовым маслом. В результате максимальные значения выбросов CO_2 и минимальные концентрации CO зарегистрированы для этих двух составов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-1616.2022.4).

Список литературы

1. Loureiro L. M. E. F., Gil P. B. F., Vieira de Campos F. V, Nunes L. J. R., Ferreira J. M. F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // Journal of the Energy Institute. 2018. V. 91, N 6. P. 978–983.

2. Saravanan A., Senthil Kumar P., Jeevanantham S., Karishma S., Vo D. V. N. Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass // Bioresource Technology. 2022. V. 344. P. 126–203.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ, БИОМАССЫ И ИХ СМЕСЕЙ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

А. В. Жуйков*, Н. А. Землянский *

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

В работе представлены результаты термического анализа горения бурого угля, сосновых шишек и их смесей. Определены температуры воспламенения и выгорания топлив. Проведен сравнительный анализ индекса горения и реакционной способности топлив в зависимости от массового содержания биомассы в смеси.

Частичное вовлечение в топливно-энергетический комплекс лесной биомассы может интенсифицировать процесс перехода к ресурсосберегающей и экологически безопасной выработке тепловой энергии на угольных котельных [1]. Под частичным вовлечением понимается сжигание лесной биомассы совместно с углем разной степени метаморфизма в виде твердотопливных смесей. Доказано [2], что частичное добавление биомассы к углю может не только снизить расход твердого ископаемого топлива, но и уменьшить количество вредных газообразных продуктов сгорания. Одна из причин, затрудняющая переход к совместному сжиганию угля и биомассы, заключается в недостатке экспериментальных данных, отражающих полную картину взаимодействия компонентов твердотопливной смеси в процессе горения.

Целью данной работы является определение основных характеристик совместного горения лесной биомассы и бурого угля для расширения теоретико-экспериментальной базы. Результаты данной работы могут быть применены при проектировании теплоэнергетического оборудования.

Объектами исследования были выбраны сосновые шишки (далее – СШ) и балахтинский бурый уголь марки 3Б (далее – УГ). Теплотехнический анализ исследуемых топлив был проведен в соответствии со стандартными методиками. Твердотопливные смеси были подготовлены в следующих массовых пропорциях: УГ 75 % + СШ 25 %; УГ 50 % + СШ 50 %; УГ 25 % + СШ 75 %. Влажность в аналитическом состоянии: СШ 3,3 %, УГ 3,5 %; зольность: СШ 1 %, УГ 6,2 %; содержание летучих веществ: СШ 77,1 %, УГ 44,6 %; низшая теплота сгорания в рабочем состоянии: СШ 17 МДж/кг, УГ 20,5 МДж/кг.

При определении основных характеристик горения смесей использовался синхронный термоанализатор SDT Q600 (США). Эксперимент проводился в окислительной среде, масса навески составила около 6 мг. Температуры воспламенения (T_i) и выгорания (T_b) смесей получали по методике пересечения кривых [2]. Реакционная способность топлива пропорциональна DTG_{max} и обратно пропорциональна T_{max}, поэтому для удобства расчета был применен индекс средней реакционности топлива (R), который определялся по выражению [2, 3]:

$$R = 100(DTG_{\max}/T_{\max}), \tag{1}$$

где DTG_{max} – максимальная скорость убыли массы, %/мин; T_{max} – температура, соответствующая DTG_{max}, °C.

Индекс горения S – это количественная характеристика процесса горения топлив, включающая в себя температуры воспламенения, выгорания, а также максимальную и среднюю скорость убыли массы, определялась [3] по выражению:

$$S = 10^6(DTG_{max}DTG_{mean}/T_i^2T_\mathrm{b}), \tag{2}$$

где DTG_{mean} – средняя скорость убыли массы, %/мин; T_i – температура воспламенения коксового остатка, °С; T_b – температура выгорания, °С.

Процесс горения УГ, СШ и их смесей представлен профилями кривых DTG на рис. 1. Горение летучих веществ и коксового остатка угля выражено одним пиком DTG в интервале температур 250–550 °С (рис. 1), температура воспламенения кокосового остатка УГ 360 °С, выгорания 554 °С. Процесс горения биомассы выражен двумя пиками DTG, в первом пике в расположенном в интервале температур 200–380 °С происходит горение летучих веществ и части коксового остатка (лигнина), во втором пике в интервале температур 400–495 °С происходит горение коксового остатка (рис. 1), температура воспламенения коксового остатка СШ 303 °С, выгорания 495 °С. Горение смесей выражено двумя пиками DTG, первый пик соответствует горению летучих веществ и части коксового остатка, второй пик соответствует горению коксового остатка биомассы и угля (рис. 1).

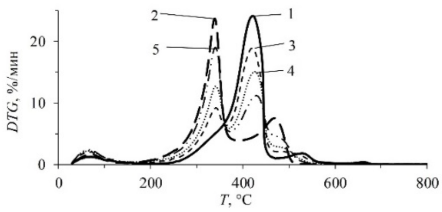


Рис. 1. Горение УГ, СШ и их смесей: *1* – УГ 100 %; *2* – СШ 100 %; *3* – УГ 75 % + СШ 25 %; *4* – УГ 50 % + СШ 50 %; *5* – УГ 25 % + СШ 75 %

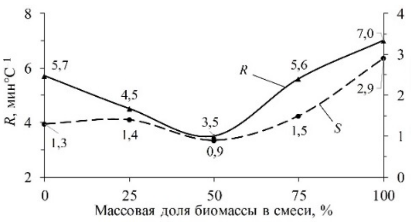


Рис. 2. Зависимость индекса средней реакционности и индекса горения от массовой доли содержания биомассы в смеси

Добавление 25 % биомассы к углю повлияло на снижение температуры воспламенения на 21 °С, выгорания на 6 °С по сравнению с углем, что не отразилось положительно на индексе реакционной способности, которая уменьшились за счет снижения максимальной скорости убыли массы, но при этом увеличился S (рис. 2). Снижение R говорит об ухудшении процесса горения смеси. Это объясняется тем, что данный вид угля является высокореакционным и имеет максимальную скорость убыли массы выше, чем у СШ, поэтому добавление СШ влияет на снижение индекса R. Добавление свыше 50 % биомассы к углю влияет на улучшение процесса горения, увеличивая индексы S и R (рис. 2). При увеличении массовой доли биомассы в смеси температура воспламенения снижается на 12 %, а выгорания снижается всего на 1,8 %.

Добавление сосновых шишек к бурому углю влияет только на снижение температуры воспламенения, снижая ее на 20 %, и на температуру выгорания, снижая ее на 2 %, за счет высокого содержания летучих веществ в биомассе. Значение индекса горения биомассы в два раза выше, чем у угля, индекс средней реакционной способности биомассы выше на 23 %. Самые низкие характеристики горения отмечены при добавлении 50 % биомассы к углю, что приводит к снижению индексов S и R вследствие того, что максимальная скорость убыли массы угля выше на 2 %, чем у биомассы. Смесь на основе 75 % угля и 25 % сосновых шишек имеет самые энергоэффективные характеристики горения, по сравнению с углем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00280, https://rscf.ru/project/23-23-00280.

Список литературы

1. Saidur R., Abdelaziz E. A., Demirbas A., Hossain M. S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers // Renew. Sust. Energ. Rev., vol. 15, pp. 2262–2289, 2011.

2. Chen L., Wen C., Wang W., Liu T., Liu E., Liu H., Li Z. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal // Renew. Energy, vol. 161, pp. 867–877, 2020.

3. Vamvuka D., Loukakou E., Sfakiotakis S., Petrakis E. The impact of a combined pre-treatment on the combustion performance of various biomass wastes and their blends with lignite // Thermochim. Acta, vol. 688, 178599, 2020.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЛИФИЦИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ПРИ ТОРРЕФИКАЦИИ БИОМАССЫ

В. М. Зайченко, А. Л. Шевченко[*] [*]

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
[*]*shev@jiht.ru*

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований торрефикации гранулированной растительной биомассы. В результате этого процесса из биомассы различных видов (в т. ч. отходов) получается качественное твердое гидрофобное биотопливо с повышенной теплотворной способностью. В отличие от ископаемого угля, торрефицированное топливо практически не содержит серу и тяжелые металлы, обладает меньшей зольностью и является углеродно-нейтральным продуктом. В Объединенном институте высоких температур РАН создана энергоэффективная технология и экспериментальный энергокомплекс торрефикации гранулированной растительной биомассы с использованием выхлопных газов газопоршневой энергоустановки и тепла управляемой экзотермической реакции.

Разработка и внедрение энергетических технологий, позволяющих снизить нагрузку на природное равновесие, является одной из важнейших задач настоящего времени. В этом плане определенный интерес представляет перевод угольных котельных на совместное сжигание угля и биомассы (как правило, древесины). Поскольку затраты на размол древесины примерно в семь раз превышают аналогичный показатель для угля, то использование древесины в существующих конструкциях котельного оборудования не представляется возможным. Энергетические затраты на размол торрефицированного сырья примерно равны затратам на размол угля. Это исключает главные ограничения использования биомассы в угольных котлах.

Торрефикация (низкотемпературный пиролиз) нагрев в бескислородной среде гранулированного биосырья до температуры около 250–300 °С. Теплотворная способность в результате торрефикации исходной биомассы увеличивается на 25–30 %, топливо становится гидрофобным, что в значительной степени упрощает хранение и перевозку топлив из биомассы. Торрефицированное топливо может быть использовано в существующих угольных энергетических устройствах, а по сравнению с ископаемым углем обладает существенно меньшей зольностью, содержанием серы, тяжелых металлов и других вредных компонент, является углероднейтральным. Поскольку биотопливо получено из растительной биомассы, то углекислый газ, выделяемый при горении такого топлива, был полностью поглощен растениями в период их роста. Несмотря на значительные преимущества торрефицированного топлива, эта технология не получила широкого промышленного внедрения. Это связано с тем, что затраты на торрефикацию не компенсируются выгодой, получаемой при использовании торрефицированного биотоплива.

В отличие от известных технологий, в схеме торрефикации, разработанной в Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), в качестве бескислородного теплоносителя используются выхлопные газы газопоршневой энергоустановки (ГПУ). В ГПУ сжигается природный газ и производится электрическая энергия, а выхлопные газы подаются в реактор-торрефикатор. Использование природного газа в качестве топлива ГПУ при получении электрической энергии является выгодным с экономической точки зрения. Даже в том случае, если продукты сгорания напрямую выбрасываются в атмосферу. В схеме ОИВТ РАН отходящие продукты сгорания используется для торрефикации. Таким образом, связка ГПУ и реактора торрефикации становится когенерационным комплексом. Вторым фактором, повышающим энергоэффективность установки ОИВТ РАН, является использование энергии управляемой экзотермической реакции.

Как известно, пиролиз биомассы сопровождается как эндотермическими, так и экзотермическими реакциями. В температурном диапазоне 250–300 °C, характерном для процесса торрефикации, основной вклад дают экзотермические реакции, связанные с распадом гемицеллюлозы. Энергия экзотермической реакции ~1 МДж/кг [1] соизмерима с энергией, подводимой извне, необходимой для проведения процесса торрефикации. Т. е. потенциально можно построить установку, в которой после инициализации процесс торрефикации будет происходить без подвода внешней энергии в автотермальном режиме [2].

Насколько нам известно из анализа литературных источников, в настоящее время не существует схем торрефикации, в которых экзотермическая реакция использовалась для нагрева перерабатываемой биомассы.

В ОИВТ РАН была спроектирована и изготовлена торрефикационная установка производительностью до 150 кг в час перерабатываемого сырья, в которой для повышения производительности и энергетической эффективности реализована концепция управляемого экзотермического эффекта. Реактор представляет собой вертикальный стальной теплоизолированный цилиндр. Сверху установлен подогреваемый узел загрузки исходного сырья. Снизу – секция охлаждения бескислородным газовым потоком. Важным компонентом энергокомплекса является система управления, которая, с одной стороны, поддерживает заданную температуру греющего теплоносителя на входе в секцию торрефикации, с другой – управляет открытием заслонок, выгружая определенный объем торрефицированной продукции в зону охлаждения, поддерживая необходимый температурный уровень в секции торрефикации и не допуская перегрева.

Экспериментально было показано, что использование разработанных технических решений позволяет примерно в 3–6 раз сократить потребление энергии на процесс по сравнению с имеющимися в настоящее время аналогами [3].

Проведенные экспериментальные и расчетные [4] исследования показали, что экзотермическое тепловыделение в процессе торрефикации при неправильном управлении процессом может привести к неконтролируемому разогреву перерабатываемого сырья и к тепловой «раскачке» на переходных режимах работы установки [5].

Разработанная в ОИВТ РАН технология получения качественного биотоплива путем термообработки гранулированного биосырья с использованием тепловой энергии управляемой экзотермической реакции позволяет существенно снизить энергозатраты на получение качественного твердого биотоплива из биомассы, что делает производство торрефицированной продукции экономически выгодным.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-01056-22-00 от 24.12.2021).

Список литературы

1. Козлов В. Н., Нимвицкий А. А. Технология пирогенетической переработки древесины. М.: Гослесбумиздат, 1954. 620 с.

2. Способ пиролиза гранулированной биомассы в автотермальном режиме. Патент RU-2732411, заявка 11.09.2019г.

3. Shevchenko A. L., Sytchev G. A., Zaichenko V. M. Energy efficient technology for torrefied biofuel production // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. P. 9271198.

4. Шевченко А. Л., Директор Л. Б. Программа расчета теплофизических параметров реактора термической конверсии биомассы. (PYRBM). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664704, 20.11.2018. Заявка № 2018661826 от 29.10.2018.

5. Зайченко В. М., Шевченко А. Л. Энергоэффективная торрефикация с использованием управляемой экзотермической реакции // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 3. С. 448–454.

СИНТЕЗ МЕТАНОЛА И БЕНЗИНА ИЗ ПРОДУКТОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

В. М. Зайченко, И. И. Лищинер, О. В. Малова, О. М. Ларина* *

Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Российская Федерация, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2
**olga.m.larina@gmail.com*

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса термохимической конверсии осадков сточных вод в синтез-газ с последующим синтезом компонентов жидких моторных топлив.

Осадки сточных вод (ОСВ) относятся к видам вторичной биомассы. В последнее время утилизации этого вида отходов уделяется особое внимание. Основной целью утилизации является не только снижение накопленных объемов, но и максимальное извлечение всего заложенного в них энергопотенциала с нанесением минимального экологического вреда для окружающей среды. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования переработки ОСВ в синтез-газ с его последующим синтезом в метанол и бензиновую фракцию.

Особенность представленной технологии заключается в том, что синтез-газ производится не газификацией, как принято в промышленности сейчас, а с помощью пиролитической переработки с последующим термическим крекингом летучих продуктов (температура в зоне крекинга 1000 °С). Основы процесса получения синтез-газа из биомассы описанным методом представлены в работе [1]. В качестве среды для термического крекинга использовался древесный уголь и керамика. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства синтез-газа, полученного термическим крекингом жидких и газообразных продуктов пиролиза осадка сточных вод

Среда для крекинга	Удельный объемный выход, нм^3/кг	Состав синтез-газа, об. %					H_2/CO
		H_2	CO	CH_4	CO_2	$SO_2 + H_2S$	
Древесный уголь	1,07	58,9	35,8	0,6	0,4	0,2	1,64
Керамика	0,59	55,3	22,8	12,4	8,9	0,3	2,4

В результате экспериментальных исследований было получено, что выход синтез- газа, содержание H_2 и CO в его составе, произведенное на древесном угле, выше, чем на керамике. В синтез-газе, полученном на керамике, присутствуют в значительном количестве метан и CO_2, что говорит о неполной степени разложения пиролизной парогазовой смеси. Суммарное содержание H_2 и CO, полученных на древесном угле, составляет 94,7 об. %, при этом отношение H_2/CO в составе синтез-газа составляет 1,64. Суммарное содержание H_2 и CO, полученное на керамике, составляет 78,1 об. %, при этом отношение H_2/CO в составе синтез-газа составляет 2,4.

Дальнейшая переработка синтез-газа в компоненты жидких моторных топлив условно разделяется на две стадии: синтез метанола из синтез-газа и синтез жидких углеводородов из метанола. Метанол образуется вследствие следующей реакции с использованием медьцинкалюминиевого катализатора [2]:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \qquad (1)$$

Отношение H_2/CO в составе синтез-газа является важным показателем его применимости для получения метанола. Избыток водорода повышает скорость реакции и позволяет достичь большей степени превращения. Уменьшение концентрации CO в исходном газе приводит к снижению интенсивности побочных реакций [3]. Исходя из стехиометрических коэффициентов уравнения (1), отношение H_2/CO в составе синтез-газ должно составлять 2/1. Снижение этого показателя приводит к уменьшению степени конверсии синтез-газа, и, как следствие, к снижению выхода метанола. Минимальное отношение H_2:CO должно быть 1,5/1 [4]. С данной точки зрения, синтез-газ, полученный на керамике, является идеальным сырьем для производства метанола. С другой стороны, синтез-газ полученный из ОСВ на древесном угле, гораздо лучше, чем синтез-газ, произведенный аналогичным способом из растительной биомассы, с точки зрения его использования для синтеза метанола. Соотношение H_2/CO в составе синтез-газа из растительной биомассы составляет не более 1,2 [5].

Данный синтез-газ содержит сернистые соединения, которые губительны для катализаторов синтеза метанола. Для дальнейшего применения синтез-газ необходимо очищать.

Процесс превращения метанола в жидкие углеводороды происходит на цеолитных катализаторах. Он состоит из трех последовательных стадий – дегидратация метанола в диметиловый эфир (ДМЭ), дегидратация диметилового эфира в низшие олефины и превращение низших олефинов в смесь ароматических углеводородов и алканов [2]:

$$\begin{gathered} 2CH_3OH \leftrightarrow CH_3OCH_3 \rightarrow \text{Олефины } C_2 - C_5 \rightarrow \\ \rightarrow \text{Ароматические УВ} + \text{Алканы} \qquad (2) \end{gathered}$$

В зависимости от реакционных условий процесс превращения можно остановить на стадии получения низших олефинов, но производство бензиновой фракции, включающей в свой состав ароматические углеводороды и алканы, является наиболее предпочтительным.

В результате экспериментальных исследований было получено, что из 1 кг высушенных за один проход синтез-газа через слой катализатора образуется 170 г метанола и далее 67 г бензина. Образующийся метанол после некоторой степени очистки будет отвечать техническим метанолам марки Б. Бензиновая фракция в исходном виде удовлетворяет практически всем требованиям к автомобильным бензинам марки АИ-92, а после снижения доли ароматических углеводородов будет отвечать требованиям бензинов стандарта Евро 5. Стоит отметить, что масса непрореагировавшего синтез-газа была в 2,2 раза больше, чем масса образующегося метанола, что вызывает далее низкий выход бензина. В промышленности для увеличения выхода метанола применяются проточно-циркуляционные схемы, в которых непрореагировавший синтез-газ подается обратно в реактор синтеза метанола. Также существует способ увеличения выхода метанола за счет создания каскада из трех проточных каталитических реакторов синтеза метанола.

Список литературы

1. Батенин В. М., Зайченко В. М., Косов В. Ф., Синельщиков В.А. Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо // Докл. РАН. 2012. Т. 446 (2). С. 179.

2. Sheldon R. A. Chemical from Synthesis gas // D. Reidel publishing company, 248 p., 1987.

3. Козюков Е. А., Крылова А. Ю., Крылова М. В. Химическая переработка природ- ного газа. М.: Изд-во МАИ, 2006. 184 с.

4. Елисеев О. Л. Технологии «газ в жидкость» // Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. 2008. Т. 52 (6). С. 53–62.

5. Lavrenov V. A., Larina O. M., Sinelshchikov V. A., Sytchev G. A. Two-stage pyrolyt ic conversion of different types of biomass into synthesis gas // High Temperature. 2016. Vol. 54 (6). P. 892–898.

ЧАСТИЧНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ
КАК АЛЬТЕРНАТИВА КЛАССИЧЕСКОМУ СЖИГАНИЮ

С. Р. Исламов *

ООО «Уголь-инжиниринг» (АО СГК)
660060, Российская Федерация, Красноярск, ул. Лебедевой, д. 64а
IslamovSR@suek.ru

Проблема экологической и экономической эффективности использования угля в значительной мере обусловлена не его природными свойствами, а исторически сложившимися способами сжигания. Технология частичной газификации углей с высоким содержанием летучих веществ радикальным образом снижает воздействие на окружающую среду, а также повышает экономические показатели за счет когенерационного эффекта производства.

В течение последнего десятилетия за бурым углем закрепился статус экологически опасного топлива. Однако такая оценка в значительной мере обусловлена не природными свойствами угля, а архаичными способами его использования. Объективно угли крупнейших разрезов Красноярского края имеют уникально положительные физико-химические характеристики: низкая зольность, низкое содержание серы и других вредных компонентов (для сравнения: в Кузбассе все эти показатели кратно выше).

Технологический принцип индустриального сжигания угля сформировался на рубеже XVII–XVIII веков в период Промышленной революции и практически без каких-либо изменений используется до настоящего времени. Изменились конструкции аппаратов для сжигания, появились новые конструкционные материалы, оптимизированы процессы тепломассобмена, но технологический принцип остался неизменным, и это беспрецедентный образец долгожительства технологического уклада.

Одной из альтернатив классическому сжиганию угля является технология «Термококс», основанная на частичной газификации энергетических углей с высоким содержанием летучих веществ (рис. 1). Очевидно, что для производства тепловой энергии целесообразно сжигать только *газовую компоненту* угля, а коксовый остаток выгодно использовать *как второй ценный продукт*:

– углеродистый восстановитель для электрометаллургии и металлургии нового поколения – заменитель классического кокса, производимого из самых дорогих коксующихся углей;

– специальное технологическое топливо с теплотой сгорания около 7000 ккал/кг (обжиг и спекание материалов; вдувание в домны и т. п.)

– бездымное бытовое топливо;

– активированный уголь (сорбент).

– Переход к сжиганию газового топлива радикальным образом изменяет воздействие на окружающую среду. При этом в зависимости от марки исходного угля на 10–20 % снижается эмиссия углекислого газа в расчете на единицу полезной тепловой энергии. Это обусловлено более высоким содержанием водорода в газовом топливе. Основная часть золы капсулируется в твердом продукте – термококсе. В итоге по экологическим показателям угольная теплогенерация приближается к генерации на природном газе.

– С точки зрения экономики, данная технология обеспечивает когенерационный эффект за счет производства второго продукта, причем более ценного, чем тепловая энергия. Так, в зависимости от конъюнктуры рынка термококс в виде углеродного сорбента продается по цене 30–70 тыс. руб./т, металлургический брикет – 15–30 тыс. руб./т.

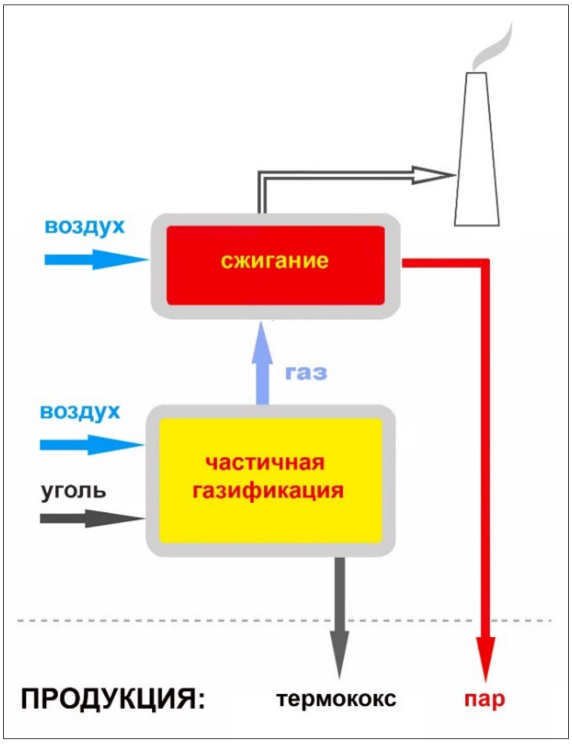


Рис. 1. Принципиальная схема технологии «ТЕРМОКОКС»

Первое предприятие по технологии «Термококс», известное сегодня как ООО «Карбоника-Ф», было сдано в эксплуатацию в Красноярске еще в 1996 году. Его котельная на газовом топливе около двадцати лет поставляла горячую воду для коммунального хозяйства города. Углеродную продукцию в виде сорбента для очистки оборотной воды до настоящего времени покупает «Норникель». Компания «Новая энергия», работающая по технологии частичной газификации, поставляет сорбент для очистки газовых выбросов и городских стоков, а за счет попутного газа отапливает жилой сектор районного центра Балахта.

В 2007 году на разрезе «Березовский» (АО «СУЭК») был запущен первый агрегат для частичной газификации бурого угля в кипящем слое. Сегодня на трех энерготехнологических установках с проектной мощностью около 150 тыс. т/год угля производится буроугольный кокс широкого назначения: сорбент для глубокой переработки тяжелых нефтяных остатков, буроугольный кокс в виде металлургического брикета, а также в качестве бытового топлива. Широкую известность получил новый для России продукт – бездымный брикет. Замена угля на этот вид топлива в частном секторе практически до нуля снижает эмиссию бензапирена – наиболее опасного спутника угольного отопления.

Таким образом, инновационная технология «Термококс», разработанная на основе глубоких теоретических и экспериментальных исследований [1], вступила в стадию промышленного использования. В настоящее время в разных стадиях проработки находится целый ряд новых проектов, как на территории Красноярского края, так и за его пределами. Одновременно продолжаются исследования, направленные на усовершенствование используемых технологических решений, а также по созданию новых технологий в рамках концепции «Термококс».

Список литературы

1. Исламов С. Р. Частичная газификация угля. М.: Изд-во «Горное дело», 2017. 384 с.

ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОЧНОГО ГАЗИФИКАТОРА БИОМАССЫ

В. А. Кирьянов[‡], Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков *

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, пр. Мира, 19
[‡]kiryanoffvladimir@yandex.ru

Технология поточной газификации биомассы активно развивается благодаря стремлению технически развитых стран перейти от «грязного» угля к «чистой» биомассе. Отличительные особенности биомассы серьезно снижают тепловые напряжения и повышают требуемое время пребывания частиц в установке, что вынуждает принципиально пересматривать конструкцию и режим работы установки. Моделирование гидродинамики проводилось с использованием метода вычислительной гидродинамики (CFD). Из полученных результатов видно, что чем больше размер частиц, тем ниже они расположены в установке, так как их скорость витания возрастает. Расчет не только показал удовлетворительное согласование с литературными данными, но также позволил определить, частицы какого размера способны подниматься на ту или иную высоту газификатора.

Тематика поточной газификации биомассы начала очень активно развиваться в конце 1990-х гг., а первые публикации появились уже в 2000-е гг. [1], что связано с коммерческим успехом угольных газификаторов в 90-е гг. и последующим стремлением перейти от «грязного» угля к «чистой» биомассе. Несмотря на кажущуюся схожесть процессов поточной газификации угля и биомассы (и то и то является твердым органическим топливом), прямая замена оказалась невозможной по целому ряду причин, основной из которых является низкая теплота сгорания биомассы ввиду низкого содержания в ней углерода (основного теплотворного элемента). Также проблемой является низкая способность сырой биомассы к мелкому помолу, что вызывает огромные затраты на приготовление пылевидного топлива из нее и вынуждает использовать относительно крупные частицы размером до 1 мм [2]. Вышеописанные факторы серьезно снижают тепловые напряжения и повышают требуемое время пребывания частиц биомассы в установке, что вынуждает принципиально пересматривать конструкцию и режим работы установки.

Самым близким к коммерческой эксплуатации поточным газификатором неторрефицированной (сырой) биомассы является установка MHI, компании, разработавшей первый в мире коммерческий воздушный поточный газификатор угля. В газификаторе биомассы MHI проблема низких теплонапряжений решается путем замены воздушного дутья на парокислородное, не содержащее инертный азот. А проблема времени пребывания крупных частиц в газификаторе решена изменением его геометрии – нижняя часть имеет форму конуса, что обеспечивает высокую скорость газа в низу газификатора, которая не позволяет крупным частицам проваливаться на дно установки. При этом крупные частицы покидают нижнюю часть только после частичной конверсии и уменьшении своего размера, что и увеличивает их результирующее время пребывания в газификаторе.

Моделирование проводилось с использованием метода вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics). В рамках данного метода все газы принято называть жидкостями (флюидами), поэтому в данной работе понятия аэродинамика и гидродинамика означают одно и тоже. Разработанная CFD-модель представляет собой комплекс взаимосвязанных подмоделей. Разработка заключалась в подборе наиболее адекватных для рассматриваемого режима течения подмоделей, настройке и отработке модели в целом. К базовым подмоделям CFD-моделирования относятся уравнения: неразрывности, энергии, переноса компонентов среды, равновесия сил для дискретной фазы, закон сохранения импульса и т. д. В результате ранее проведенной валидации из трех популярных подмоделей турбулентности (k-ε, k–ω SST, RSM SSG) выбрана подмодель турбулентности k–ω SST [3]. Геометрия и сетка строились в программе Salome 9.6, выбор и настройка подмоделей выполнялись в OpenFOAM 1806, тамже производился расчет, а анализ результатов осуществлен в ParaView 5.6.0.

На рис. 1 представлены результаты валидации разработанной CFD-модели с подачей частиц биомассы в газификатор. Сравнение проведено с литературными данными MHI [4]: высота газификатора – 2,5 м, диаметр 0,5 м, производительность по топливу 2 т/сут. Расчеты выполнялись при холодной постановке задачи, т. е. без тепломассообмена и химических превращений. Поэтому размер частиц задавался на входе в установку и не менялся в течение всего времени. Максимальный возраст частиц (время их пребывания в установке) задавался равным 10 с, что несколько больше, чем их время пиролизы в реальной установке по данным японцев (4–8 с).

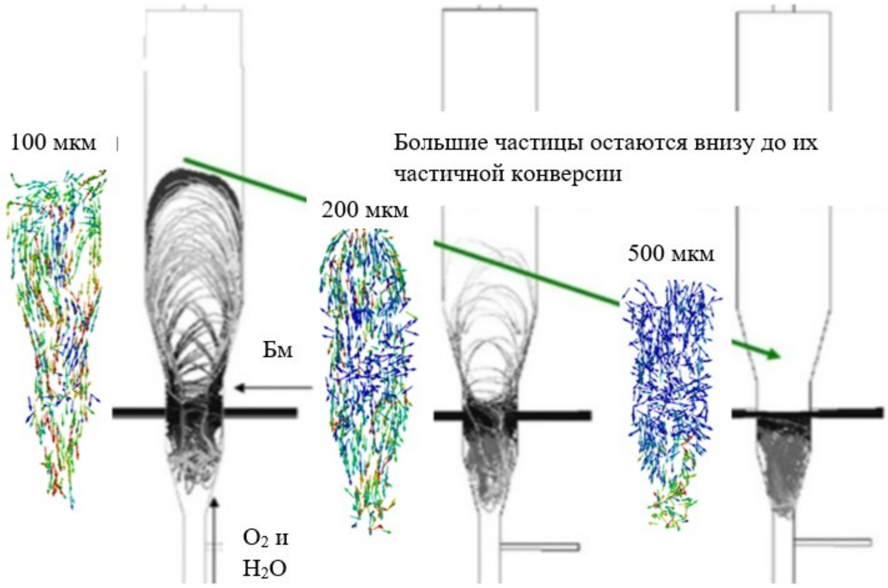


Рис. 1. Валидация численной модели по данным из [4]

Из рисунка видно, что чем больше размер частиц, тем ниже они расположены в установке, так как их скорость витания возрастает. Расчет не только показал удовлетворительное согласование с литературными данными, но также позволил определить, частицы какого размера способны подниматься на ту или иную высоту газификатора.

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 литературы

1. Mori R., Oki Y., Takeno K., Matsumoto K., Kobayashi Y., Ishii H. Production of Alternative Fuel Using Biomass Gasification Technology // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, vol. 45(1), pp. 67–69, 2008.

2. Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J. Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification // Fuel Processing Technology, vol. 90, pp. 629–635, 2009.

3. Abaimov N. A., Rizhkov A. F. Turbulence models verification for numerical simulation of the cyclone chamber // Proc. of 5th Int. Conf. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling, pp. 429–437, 2015.

4. Fujii A., Inada K., Takahashi H., Shinoda K. Development of Bio Jet Fuel Production System // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 58(3), pp. 1–6, 2021.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. Ю. Коптев[1*], А. В. Кулик[1], А. А. Пономарева[1,2], М. В. Мурадова[1], Ч. М. Пак[1] *

[1]Дальневосточный федеральный университет
690922, Российская Федерация, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
[2]Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, Российская Федерация, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49, литер А
**koptev.aiu@dvfu.ru*

Показана применимость ИК-спектроскопии для идентификации покомпонентного состава газогенераторных смесей газов. Обнаружены компоненты газогенераторных смесей газов: CH_4, CO, CO_2, H_2O.

Исследования по использованию угля значительно расширились в последние годы в связи с глобальным изменением климата [1, 2]. Теперь исследования включают в себя разработки, направленные на поиск новых технологий сжигания угля, которые обещают эффективное использование этого источника энергии с минимальным количеством выбросов CO_2 [3]. В свою очередь, газификация твердого топлива является универсальным методом повышения эффективности использования твердого топлива.

Для определения состава газовой смеси (на основе инфракрасной (ИК) спектроскопии), полученной в процессе газификации, необходимо выполнить разработку экспресс-методики качественного и количественного определения компонентов газовой смеси. Для выполнения данной цели проведено исследование генераторного газа, полученного в экспериментальной установке, имитирующей газификацию рядового каменного угля.

В процессе работы газификатора отобраны пробы генераторного газов, полученные на выходе из газификатора, с целью изучить продукты реакции и оценить эффективность работы газогенератора. Отобранные пробы исследованы с помощью спектрометра ФТ 801 (Россия) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 см$^{-1}$. Полученные ИК-спектры проб представлены на рис. 1.

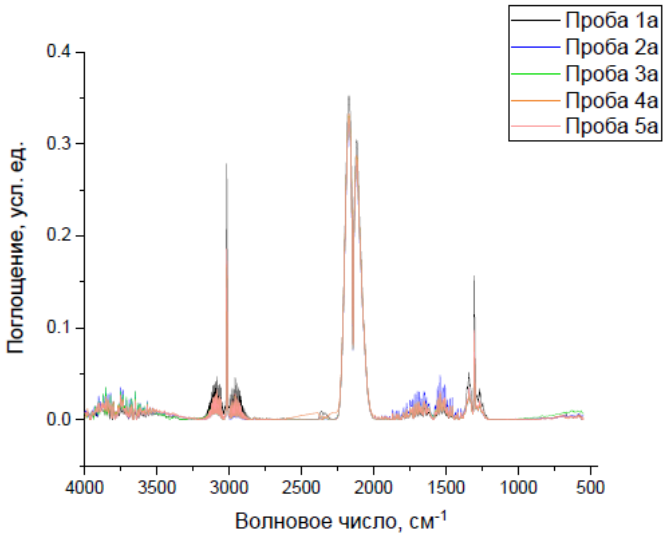


Рис. 1. ИК спектры образцов проб, взятых на выходе из газификатора

Полученные спектры проанализированы и все пики идентифицированы. Результаты обработки спектров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки ИК-спектров образцов газовых проб, взятых на выходе из газификатора

Образец	CH4		CO		CO2		H2O	Примечание
	Пик 1‡	Пик 2	Пик 1	Пик 2	Пик 1	Пик 2	Imax ‡‡	–
Проба 1	3000/ 0,268	1304/ 0,142	2172/ 0,288	2118/ 0,237	2361/ 0,0055	2339/ 0,0032	≤0,01	–
Проба 2	3016/ 0,162	1304/ 0,0768	2172/ 0,277	2118/ 0,232	2363/ 0,0021	–	≤0,046	Минимальное значение CO2
Проба 3	3017 /0,161	1304/ 0,0773	2172/ 0,271	2118/ 0,223	2359/ 0,0036	2336/ 0,0023	≤0,032	–
Проба 4	3017/ 0,167	1304/ 0,087	2172/ 0,268	2118/ 0,221	–	–	≤0,032	Вычитание background даёт искажение спектра
Проба 5	3018/ 0,182	1304/ 0,088	2172/ 0,270	2118/ 0,222	2361/ 0,0033	2336/ 0,0013	≤0,023	–

Примечание. ‡Указано положение пика, см$^{-1}$ / интенсивность поглощения

‡‡Так как у колебаний OH нет выраженных пиков, то указывается уровень интенсивности, который не превышается общим массивом пиков

В первоначальный момент времени наблюдаются наибольшие концентрации газов, таких как метан, углекислый газ и угарный газ, а пары воды детектируются в наименьшем количестве. Предположительно, концентрация молекулярного водорода также будет максимальной в этих условиях.

Далее наблюдается некоторое уменьшение концентрации компонентов: регистрируется уменьшение метана примерно в 1,5 раза для всех других проб, при этом уменьшение концентрации CO составляет не более 8 % (если рассматривать все последующие пробы). Концентрация угарного газа начиная со второй пробы остаётся практически неизменной. По полученным данным видно снижение CO_2 примерно в 1,5 раза (если сравнивать 1 и 5 пробы). Можно предположить похожее поведение у концентрации водорода, это можно косвенно увидеть по небольшому увеличению в концентрации CH4 для пробы 5.

В работе показана применимость ИК-спектроскопии для идентификации покомпонентного состава газогенераторных смесей газов. Результаты исследований могут лечь в основу разработки экспресс-методики (на основе инфракрасной (ИК) спектроскопии) качественного и количественного определения компонентов газовой смеси, полученной в процессе газификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZNS-2022-0010).

Список литературы

1. Bradley D., Lawes M., Park HY and al. Modeling of laminar pulverized coal flames with speciateddevolatilization and comparisons with experiments, Combustion and Flame 144, 2006, pp. 190–204.

2. Degereji M. U., Ingham D. B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers. Fuel 102, 2012, pp. 345–353.

3. Maffei T., Khatami R., Pierucci S., Faravelli T., Ranzi E., Levendis Y.A. Experimental and modeling study of single coal particle combustion in O_2/N_2 and Oxy-fuel (O_2/CO_2) atmos-pheres, Combustion and Flame, V. 160, Issue 11, 2013, pp. 2559–2572.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ НА ВРЕМЯ ЕЁ ПРОГРЕВА ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

С. С. Кубрин* *

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН
111020, Российская Федерация, Москва, Крюковский тупик, 4
**s_kubrin@mail.ru*

В последние годы все попытки теоретического описания процессов, происходящих с угольным аэрозолем (массоперенос, седиментация, воспламенение), исходили из представления формы частиц в виде сфер. На самом деле формы частиц угольной пыли существенно отличаются от сферической формы [17]. Они скорее всего ближе к форме параллелепипедов. Так, большие расстояния массопереноса пыли объяснялись исключительно турбулентностью воздушного потока. Аэродинамические сила и момент, влияющие на массоперенос частицы, не рассматривались. Аналогично не учитывалась форма частицы в процессах нагрева, воспламенения и теплопроводности. В работе получен результат влияния формы пылевой частицы на время прогрева до температуры воспламенения.

Исследования с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV отобранных проб аэрозоли показали, что форма угольных частиц пыли, витающей в горных выработках, очень сложная. Частицы размеров 100 и более микрон имеют призматическую форму. Поэтому для параметров промышленной безопасности необходимо дополнительно учитывать ряд факторов и закономерностей, которые ранее не рассматривались. Форма угольной частицы влияет на процессы воспламенения и горения. Условно процесс горения можно представить в виде последовательности некоторых стадий. Это прогрев вещества, испарение влаги, выход летучих веществ, горение летучих веществ и горение коксового остатка. Из-за небольших размеров частиц угольной пыли горение летучих веществ и горение коксового остатка объединяются в одну стадию. Часто, в т. ч. из-за небольших размеров частиц угольной пыли, в них не содержится влаги. В случае присутствия влаги в угольном аэрозоле, её объем крайне незначителен.

Первый и главный вопрос, на который необходимо найти ответ: при какой концентрации аэрозоля в горной выработке произойдет лавинообразный процесс воспламенения угольной пыли. Это концентрация угольной пыли, при которой энергия горения одной угольной частицы способна воспламенить соседние, которые, в свою очередь, воспламенят расположенные рядам угольные частицы и т. д. Таким образом, решение указанной задачи можно разбить на несколько шагов. Первый заключается в предположении, что если одна из частиц угольной пыли воспламенилась, то необходимо вычислить объем выделяемой энергии от её сгорания, второй – определить пространство-временное распределение тепловой энергии от сгоревшей частицы. На третьем шаге требуется рассчитать время, необходимое для прогрева соседней угольной частицы до температуры её воспламенения (после выхода летучих до момента воспламенение их и коксового остатка). Соответственно, если частица не успеет прогреться, то она не воспламенится. То есть необходимо определить размер (меру) R_{min} пространства, в котором от выделенной теплоты при сгорании угольной частицы соседние частицы воспламенятся. Решение поставленной задачи сводится к сопоставлению решений двух уравнений: теплопроводности [1] и теплового баланса угольной частицы [2–4]. Первоначально определяется необходимое время прогрева угольной частицы до температуры воспламенения угля (условно принято 470 °C). Ниже приведены результаты расчетов шести вариантов форм-факторов частиц: шар, куб и четыре призмы с разными сочетаниями габаритов (рис. 1). При этом объем всех частиц одинаков. Из полученных данных следует, что наибольшее время прогрева необходимо телу с минимальной площадью поверхности. Полученные результаты приведены на рис. 2.

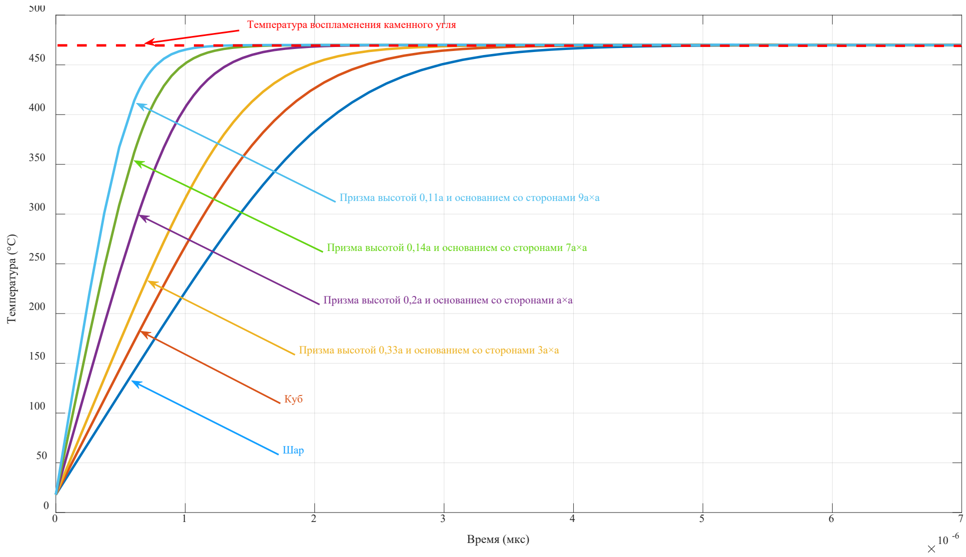


Рис. 1. Воспламенение угольных частиц различных форм

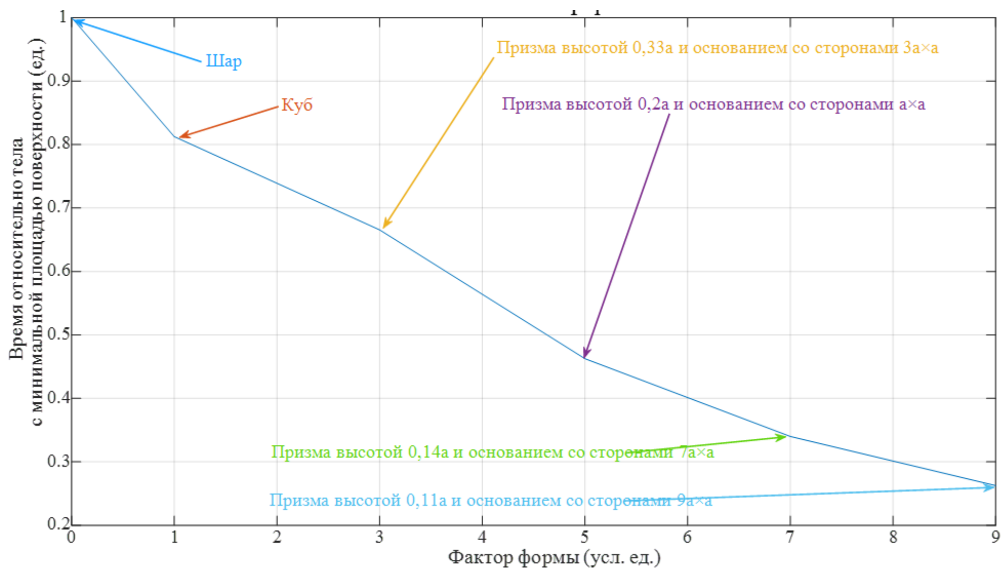


Рис. 2. Влияние фактора формы угольной частицы на время ее прогрева

Соответственно, анализ полученных результатов (рис. 2) свидетельствует, что для прогрева угольных частиц наиболее часто встречающихся форм требуется в два раза меньше времени, чем для угольной частицы в форме сферы. Поэтому расчеты времен прогрева угольных частиц в предположении, что они имеют форму шара, некорректны и завышают значения в два раза для фактических наблюдаемых призматических угольных частиц. Следовательно, при температурных расчетах представление угольной частицы в форме сферы недопустимо.

Список литературы

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1977. 735 с.

2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.

3. Основы практической теории горения: для вузов / под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 321 с.

4. Сэйитиро К. Горение / пер. с яп. С. К. Оржоникидзе, Б. С. Ермолаева. М.: Химия, 1979. 255 с.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Г. Е. Масленников*, А. Ф. Рыжков, Т. Ф. Богатова *

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002, Российская Федерация, Екатеринбург, ул. Мира, 19
**g.e.maslennikov@urfu.ru*

В данной работе проводится составление и валидация кинетической модели конверсии древесной биомассы. Модель включает кинетику стадий сушки, пиролиза, газификации коксового остатка и газофазные реакции. Подмодель газофазных реакций валидируется по литературным данным, гетерогенные реакции – по результатам собственных термогравиметрических исследований. Расчеты показывают хорошую сходимость. Для реализации программного кода используется пакет Scilab.

Численные модели газификаторов биомассы осложнены подмоделями теплообмена и гидродинамики твердой дисперсной фазы, поэтому для уменьшения вычислительных затрат химическую модель целесообразно упростить по сравнению с детальными кинетическими моделями конверсии газообразных топлив. Упрощение допускается, так как газофазные реакции протекают на несколько порядков быстрее гетерогенных.

Процесс газификации биомассы состоит из четырех этапов: 1) испарение влаги; 2) пиролиз; 3) газификация коксового остатка; 4) окислительно-восстановительные реакции в газовой фазе. Предлагаемая модель включает 13 реакций, из них 4 гетерогенных реакций газификации кокса, 7 гомогенных реакций, а также одностадийная реакция выхода летучих и сушка.

Особенностью модели является учет конкуренции между параллельными реакциями по методике, изложенной в [1]. Итоговая скорость i-й реакции R_i^* рассчитывается следующим образом:

$$R_i^* = rf_i \cdot R_i,$$

где rf_i – коэффициент селективности по реагенту, R_i – скорость i-й реакции, определенная без учета конкуренции. Коэффициент селективности находится как

$$rf_i = \cdot \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{N} R_i},$$

где в знаменателе находится сумма скоростей реакций, в которых потребляется одинаковое вещество.

Подмодель газофазных реакций валидируется по литературным данным, гетерогенные реакции – по результатам термогравиметрических исследований, проведенных А. Д. Никитиным.

Расчетная модель реализуется при помощи среды математического программирования Scilab.

На рис. 1 показан результат валидации газофазных реакций по данным из [2]. В реакцию вступает смесь CH_4 и O_2 при коэффициенте окислителя α = 0,34. Расчет хорошо сходится с экспериментальными данными.

На рис. 2 показан результат валидации по данным из [3]. В реакцию вступает смесь CH_4 и воздуха при коэффициенте окислителя α = 0,8. В данном случае расчет удовлетворительно сходится с экспериментом. Наблюдается завышение концентраций H_2 и CO при степени конверсии CH_4 от 10 – 95 %.

Полученная упрощенная модель показала хорошую сходимость при низком коэффициенте окислителя α ~ 0,4 и удовлетворительную при α ~ 0,8. Поскольку конверсия биомассы будет осуществляться при низком коэффициенте окислителя, то данную модель можно использовать при расчете газификаторов биомассы.

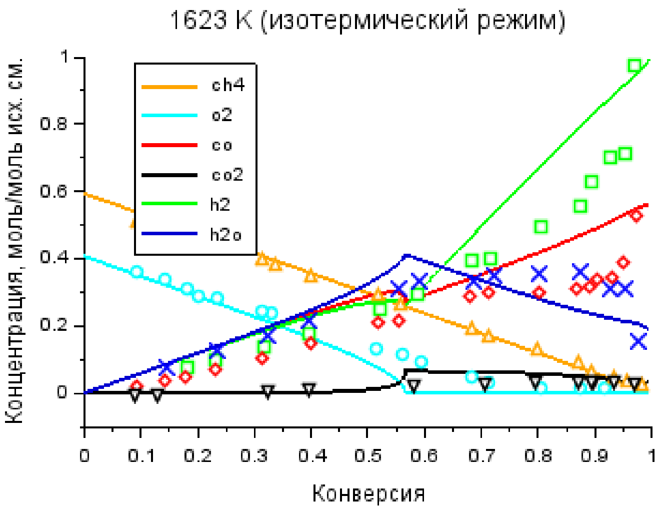


Рис. 1. Валидация газофазных реакций по данным [2]:
сплошные линии – расчет; точки – эксперимент

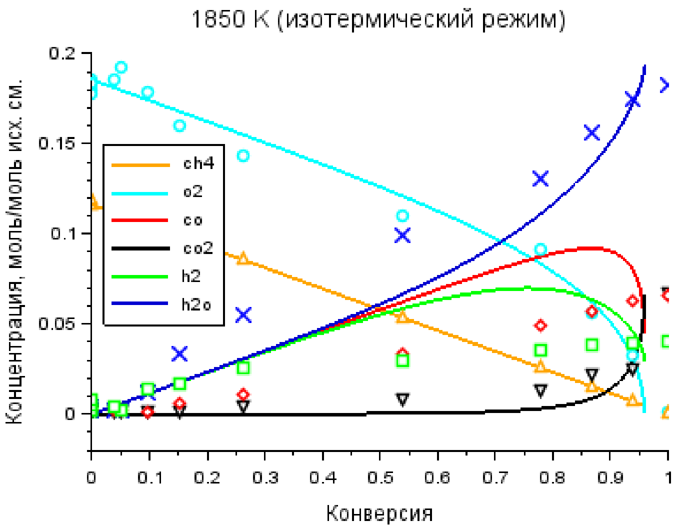


Рис. 2. Валидация газофазных реакций по данным [3]:
сплошные линии – расчет; точки – эксперимент

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 литературы

1. Kagramanov Y. A., Tuponogov V. G., Ryzhkov A. F., Nikitin A. D. Multiple Gas-Solid Reactions in a Porous Sorbent Applied to Warm Gas Desulfurization // Ind. Eng. Chem. Res., vol. 59, pp. 12943–12954, 2020.

2. Алейнова Л. Н., Алейнов Д. П., Казарновский Я. С., Корнило Б. П. Промежуточные стадии неполного горения метана в кислороде // Химическая промышленность. 1965. № 4. С. 241–247.

3. Bechtel J. H., Blint R. J., Dasch C. J., Weinberger D. A. Atmospheric Pressure Premixed Hydrocarbon-Air Flames: Theory and Experiment // Combustion and Flame. 1981. Vol. 42. P. 197–213.

ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКИХ БИОТОПЛИВ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ ДРЕВЕСНОГО ЛИГНИНА

А. В. Мирошникова[1,2*], Ли Сяоминь[2], О. П. Таран[1,2], Б. Н. Кузнецов[1,2] *

[1]Институт химии и химической технологии СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 50/24
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
**miroshnikova35@gmail.com*

Впервые предложено использовать недорогой катализатор $NiCuMo/SiO_2$ для замены Ru-, Pt-, Pd-содержащих катализаторов в процессе восстановительного фракционирования лигнина хвойной древесины для получения бионефти. Подобраны оптимальные условия гидрирования, обеспечивающие эффективную деполимеризацию лигнина древесины пихты (250 °С, 3 ч, начальное давление Н2 4 МПа). Установлены состав и строение получаемых жидких продуктов. Катализатор $NiCuMo/SiO_2$ трехкратно (с 10 до 37 масс. %) увеличивает содержание алкилпроизводных метоксифенолов, преимущественно 4-пропилгваякола и 4-пропанолгваякола.

Древесный лигнин является источником ценных фенольных и ароматических углеводородов, однако при этом остается малоиспользуемым сырьем [1]. Деполимеризация лигнина может быть осуществлена в атмосфере водорода в среде низших алифатических спиртов. Для получения из лигнина мономерных фенольных соединений предложен метод восстановительного каталитического фракционирования лигноцеллюлозной биомассы (ВКФ), в процессе которого лигнин подвергается деполимеризации, а основная часть целлюлозы сохраняется. Для селективного получения мономерных фенольных соединений при каталитической деполимеризации лигнина целесообразно использовать лигнин хвойной древесины, поскольку лигнин хвойных пород преимущественно образован фенилпропановыми звеньями гваяцильного типа, в то время как в лигнине лиственных пород преобладают структурные звенья сирингильного типа.

Использование твердых катализаторов на основе металлов платиновой группы (Pd, Ru, Pt), закрепленных на устойчивых носителях, позволяет интенсифицировать гидрогенолиз связей и деполимеризацию лигнина, а следовательно, существенно увеличить выход жидких продуктов.

Процессы ВКФ осуществляются в водно-органических средах при достаточно жестких условиях (повышенные температуры, давление, кислотность реакционной среды). Поэтому катализаторы процесса ВКФ должны иметь большой размер пор, быть устойчивыми в гидротермальных условиях и не подвергаться дезактивации побочными продуктами процесса (например, органическими кислотами).

Для гидродеоксигенирования бионефти был специально разработан катализатор $NiCuMo/SiO_2$, который является коррозийно-устойчивым в кислой среде за счет модификации молибденом, добавки меди снижают температуру восстановления никеля.

Нами впервые предложено использовать недорогой катализатор $NiCuMo/SiO_2$ для замены Ru, Pt, Pd-содержащих катализаторов в процессе ВКФ древесины для получения жидких продуктов из лигнина. Подобраны оптимальные условия, обеспечивающие его эффективную деполимеризацию (250 °С, 3 ч, начальное давление H_2 4 МПа) [1, 2].

Было показано, что при гидрировании этаноллигнина пихты в присутствии катализатора $NiCuMo/SiO_2$ получен выход жидких продуктов (88 масс. %), аналогичный выходам в присутствии бифункциональных катализаторов на основе благородных металлов Ru/C и Pt/ZrO_2 (85 и 90 масс. % соответственно). Выход мономерных метоксифенолов составил 9,2 масс. %. Пониженный выход метоксифенолов, вероятно, связан с тем, что в процессе извлечения этаноллигнина в нем уменьшается содержание реакционноспособных связей β-O-4 и он становится более сконденсированным.

При ВКФ древесины пихты катализатор $NiCuMo/SiO_2$ увеличивает выход алкилпроизводных метоксифенолов (с 10 до 37 масс. %), которые представлены преимущественно 4-пропанолгваяколом (16 масс. %) и 4-пропилгваяколом (12 масс. %). Результат по выходу мономерных метоксифенолов сопоставим с результатом, полученным при ВКФ древесины ели в присутствии катализатора Ru/C, где выход мономеров составил 36 масс. %, при этом преобладающим компонентом являлся 4-пропилгваякол. Полученные нами результаты подтверждают литературные данные, что природа металла имеет существенное влияние на выход и состав продуктов ВКФ [3]. Восстановительная деполимеризация лигнина в присутствии рутениевых катализаторов протекает с преимущественным образованием пропилзамещенных метоксифенолов, а никельсодержащие катализаторы способствуют образованию пропанолзамещенных метоксифенолов.

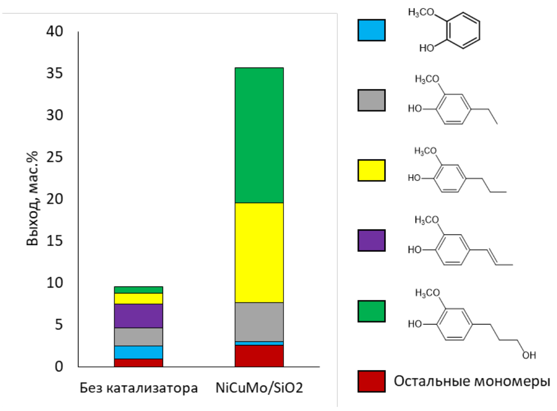


Рис. 1. Выход мономерных фенольных соединений, полученных
при некаталитическом и каталитическом гидрировании древесины пихты в этаноле

Нами также было установлено, что содержание Mo в составе катализатора $NiCuMo/SiO_2$ оказывает влияние на селективность продуктов в процессе термопревращения этаноллигнина сосны при повышенных температурах (350 °C). При содержании Mo 11,7 масс. % инициируются реакции образования алкилпроизводных катехинов, тогда как снижение содержания Mo до 8,8 масс. % приводит преимущественно к образованию алкилфенолов.

Таким образом, было показано, что из древесного лигнина с помощью восстановительного каталитического фракционирования можно получить высокий выход жидких продуктов с использованием катализатора $NiCuMo/SiO_2$, не содержащего дорогих благородных металлов. При этом полученные жидкие продукты имеют высокое содержание метоксифенолов, как и в случае использования более дорогих Ru- и Pt-содержащих катализаторов. Никельсодержащий катализатор является более селективным по отношению к пропанолзамещенным метоксифенолам. Получаемые метоксифенолы могут использоваться для получения топливных присадок, компонентов моторных топлив, и других востребованных химических продуктов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-13-00250).

Список литературы

1. Kuznetsov B. N., Sharypov V. I., Baryshnikov S. V., Miroshnikova A. V., Taran O. P., Yakovlev V. A., Lavrenov A. V., Djakovitch L. Catalytic hydrogenolysis of native and organosolv lignins of aspen wood to liquid products in supercritical ethanol medium // Catal. Today, vol. 379, pp. 114–123, 2021.

2. Taran O. P., Miroshnikova A. V., Baryshnikov S. V., Kazachenko A. S., Skripnikov A. M., Sychev V. V., Malyar Y. N., Kuznetsov B. N. Reductive Catalytic Fractionation of Spruce Wood over Ru/C Bifunctional Catalyst in the Medium of Ethanol and Molecular Hydrogen // Catalysts, vol. 12, pp. 1384, 2022.

3. Miroshnikova A. V., Kazachenko A. S., Kuznetsov B. N. et al. Reductive Catalytic Fractionation of Lignocellulosic Biomass: A New Promising Method for Its Complex Processing // Catal. Ind., vol. 14, pp. 231–250, 2022.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАНАНОВОЙ КОЖУРЫ И БИОУГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО НА ЕЁ ОСНОВЕ

А. Д. Мисюкова[1,2⁑], С. А. Янковский[1,2] *

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
[2]Кузбасский государственный университет имени Т. Ф. Горбачева 650000, Российская Федерация, Кемерово, ул. Весенняя, 28
⁑adm14@tpu.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований технических характеристик высушенной банановой кожуры, а также полученного из нее биоуглерода. Установлено несущественное отличие калорийности углерода от исходной биомассы, связанное с удалением из последней летучих компонент, что подтверждается термогравиметрическим анализом.

В последние годы учеными-энергетиками активно выполняются исследования по полезному использованию отходов биомассы [1]. Согласно статистическим данным, ежегодно во всем мире формируются более 931 млн тонн пищевых отходов, и порядка 48 млн тонн составляет банановая кожура. В состав кожуры бананов входят гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин [2]. Углерод, полученный из отходов лигноцеллюлозной биомассы, может быть использован в различных сферах промышленности. В сфере энергетики биоуглерод может использоваться как составной элемент смесевого топлива, сформированный на основе угля и биоуглерода; в сфере электроники – для создания углеродных нанотрубок и для использования в литийионных аккумуляторах; в химии – в качестве адсорбента для очистки жидкостей [3].

Целью настоящей работы является сравнение технических характеристик биомассы банановой кожуры и биоуглерода, полученного из биомассы методом пиролиза.

Методология экспериментального исследования состоит в предварительной подготовке биомассы. Кожура банановой биомассы предварительно подсушивалась до содержания аналитической влаги ниже 5 %. Подсушенная кожура измельчалась механическим способом, после чего просеивалась через сито с размером ячеек 200 мкм.

Процесс термической конверсии осуществлялся в реакторе, предназначенном для пиролиза углеродсодержащих материалов. Пиролиз осуществлялся при температуре 600 °C в течение 60–90 минут.

Исследование технических характеристик биомассы и биоуглерода проводились в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 147–2013 (ISO 1928–2009). Результаты технического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа технических характеристик биомассы и биоуглерода (влажность, зольность, выход летучих, теплота сгорания)

Материал	A^d	W^a	V^{daf}	Q_i^a
	Масс. %			МДж/кг
Банан (биомасса)	12,136	5	71,76	17,02
Банан (биоуглерод)	30,887	3	23,89	18,803

Из анализа технических характеристик видно, что калорийность биоуглерода увеличилась незначительно, что также подтверждается анализом ДСК (рис. 1, *в*). Зольность биоуглерода выросла в два с половиной раза из-за активного удаления летучих веществ в процессе термической конверсии.

Результаты термогравиметрического анализа биомассы банановой кожуры и биоуглерода, полученного методом ускоренного пиролиза, приведены на рис. 1.

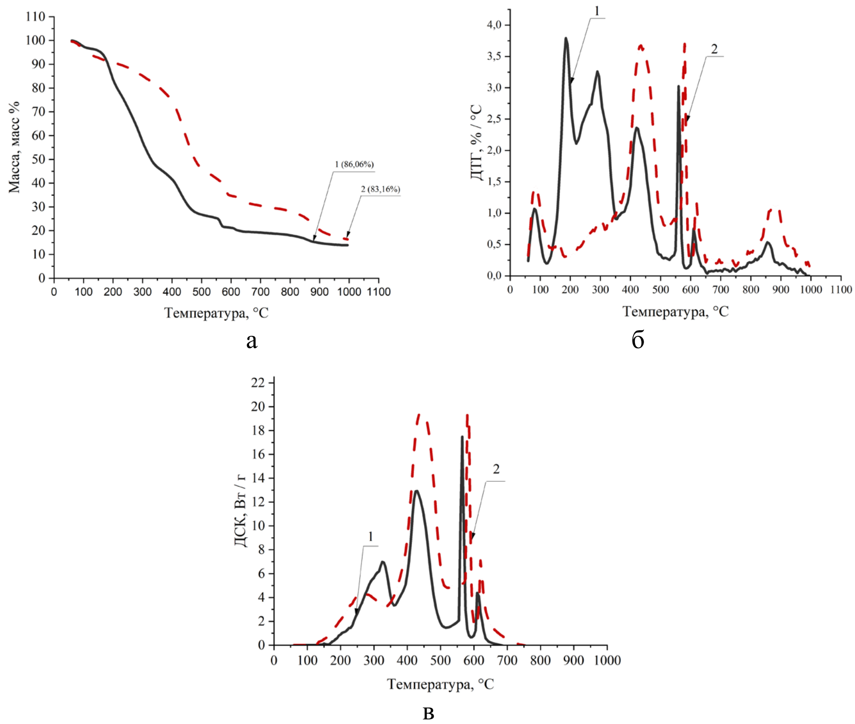


Рис. 1. Данные ТГ (*а*), ДТГ (*б*) и ДСК (*в*) : *1* – биомасса банановой кожуры; *2* – биоуглерод из банановой кожуры

Термогравиметрический анализ (рис. 1) показал, что наибольший пик выделения энергии у биомассы происходит в диапазоне низких температур от 120 до 350 °С, далее происходит спад, у биоуглерода в данном диапазоне температур интенсивность выделения энергии существенно ниже, но с увеличением температуры (350–550 °С) интенсивность выделения энергии у биоуглерода увеличивается. Анализ показал, что процесс тепловыделения у биоуглерода имеет вид более равномерного набора энергии и такого же его снижения (по сравнению с тепловыделением биомассы). Такая же тенденция наблюдается по убыли массы, биомасса теряет массу более интенсивно, по сравнению с биоуглеродом в низком диапазоне температур.

Сравнение технических характеристик биомассы и углерода, полученного из нее, показало несущественное отличие по энергетическим характеристикам, за счет удаления из биомассы летучих компонент и получения чуть более энергоёмкого биоуглерода, применение которого может рассматриваться как для энергетических целей, так и для электроники, солнечных панелей, сорбентов и т.д.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2021-0008.

Список литературы

1. Okolie J. A. et al. Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: A comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes // Process Safety and Environmental Protection, vol. 159, pp. 323–344, 2022.

2. Dikshit P. K., Jun H. B., Kim B. S. Biological conversion of lignin and its derivatives to fuels and chemicals // Korean Journal of Chemical Engineering, vol. 37, no. 3, pp. 387–401, 2020.

3. Макаревич Е. А., Папин А. В., Черкасова Е. В., Игнатова А. Ю. Применение твердого углеродного остатка пиролиза автошин в качестве адсорбента для очистки вод от органических веществ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. Ч. 132, № 2 (132). С. 96–100.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО СЖИГАНИЯ

А. А. Михеева*, Ю. А. Нифонтов *

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
**yundikovaanastasia@yandex.ru*

В работе рассматривается возможность применения водоугольного топлива в судовой энергетике. Проводится аналитическое исследование имеющихся результатов и учитываются особенности внедрения водоугольного топлива вместо обычного судового топлива для выполнения новых требований МАРПОЛ 73/78 по экологичности топлива в отдельных районах плавания судов.

В настоящее время вопрос использования водоугольного топлива (ВУТ) в судовых энергетических установках носит двоякий характер, так как такое топливо по совокупности свойств потенциально способно заменить не только мазут для вспомогательных котлов, но и тяжелое моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания. Это позволит выполнить новые требования МАРПОЛ 73/78 по экологичности топлива в отдельных районах плавания судов.

При любом применении топлива его теплотворная способность, а также удаление продуктов сгорания являются приоритетными параметрами. Анализ имеющихся данных [1] показывает, что средняя удельная теплота сгорания прототипа топлива, которая зависит от массовой доли угля и его гранулированного состава, колеблется от 16 750 до 20 300 кДж/кг. Аналогичные показатели для дизельного топлива значительно выше для судовых мазутов и достигают 41 050 кДж/кг [2–5]. В случае с углем и водоугольной суспензией основные энергетические показатели более чем в два раза ниже, но в то же время нет сомнений в возможной целесообразности их использования вместо традиционно используемого топлива.

Прежде всего, было проведено несколько исследований по технико-экономическому обоснованию возможности замены обычных видов судового топлива. Полученный результат [6] очень интересный, рекомендуется использовать ВУТ не только как альтернативу дизельному топливу, но и как альтернативу тяжелому мазуту в низкооборотных двигателях внутреннего сгорания.

Следует также отметить экономическую сторону использования ВУТ: несмотря на низкие энергетические показатели, соотношение его стоимости к теплотворной способности выше, чем у обычного тяжелого мазута или моторного топлива [7, 8].

С экологической точки зрения также рекомендуется провести сравнительный анализ характеристик используемого топлива с использованием показателей, аналогичных топливу, используемому традиционно, принимая во внимание не только процесс сжигания топлива, но и другие процессы, связанные с добычей, производством, транспортировкой, которые оказывают комплексное воздействие на окружающую среду.

Использование ВУТ снижает выбросы газов примерно на 25 % по сравнению с мазутом, а при использовании различных присадок выбросы снижаются до 33 % (по данным Пенсильванского института). Сокращение выбросов оксидов азота по сравнению с мазутом составляет не менее 30 %, а выбросы серы практически исключены. Также отсутствуют опасные полимерные соединения [7, 9].

Использование ВУТ во вспомогательных судовых энергоустановках, включая различные котлы и т. д., ограничено в основном из-за более низкой теплотворной способности по сравнению с мазутом, но разница в других характеристиках этих видов топлива не имеет весомого значения в техническом или экономическом аспекте.

Перевод судовых энергоустановок с дизельного топлива или мазута на уголь требует комплексного решения ряда технических проблем, в т. ч.:

получение высоких энергетических характеристик, которые могут конкурировать с обычным топливом;

достаточное обеспечение физико-химических и других свойств топливной суспензии.

Учитывая, что добиться значительного увеличения определенной теплотворной способности практически невозможно, необходимо учитывать увеличение количество топлива и окисляющих веществ при сгорании, которые не требуют дополнительных исследований. Достижение физико-химических, реологических свойств водных суспензий угля было серьезной проблемой в течение последних нескольких лет. Одним из предложений является внесение в технологию приготовления топлива изменения, где используются добавки пластификаторов как наиболее доступный и недорогой материал [1, 8, 10].

Сложностью перехода на ВУТ состоит в том, что необходимо изменить конструкцию топливной системы силовой установки, изменить параметры технического процесса и обеспечить необходимые физико-химические параметры.

Практическая реализация идеи использования ВУТ вместо обычного судового топлива связана с решением основной технической проблемы, а именно удалением продуктов сгорания и обеспечением диспергирования топлива в камере сгорания, что возможно с использованием новейших разработок. Использование угля и водного топлива в арктической морской энергетике имеет особое значение в соответствии с требованиями МАРПОЛ 73/78 от 1 января 2020.

Список литературы

1. Цепенюк А. И., Луценко С. В., Серант Ф. А., Карпов Е. Г. Приготовление и сжигание водоугольного топлива в различных топочных устройствах // Материалы международной конференции по теплоэнергетике и ее устойчивому развитию. Углжевик, 2010. С. 61–66.

2. Грибиниченко М. В. Судовые энергетические установки. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010.

3. Овсянников М. К., Петухов В. А. Судовые автоматизированные энергетические установки. М.: Транспорт, 1989.

4. Зайденварг В. Е., Трубецкой К. Н., Мурко В. И., Нехороший И. Х. Производство и использование водоугольного топлива. М.: Академия горных наук, 2001.

5. Морозов А. Г., Мосин С. И., Мурко В. И. ВУТ в теплоэнергетике // Энергия: экономика, техника, экология. 2007. № 4. С. 29–33.

6. Леонов А. М., Данилов О. С. Обоснование возможности эффективного использования водоугольных суспензий в котлах средней и малой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Вып. 12, Т. 10. С. 409–416.

7. Делягин Г. Н., Корнилов В. В., Кузнецов Ю. Д., Чернегов Ю. А. Совершенствование водоугольного топлива и перспектива его применения // Приложение к научно-техническому журналу «Экономика топливно-энергетического комплекса России». М., ВНИИОЭНГ, 1993.

8. Листратов И. В., Делягин Г. Н., Кондратьев А. С., Сараф Б. А. Опыт промышленного внедрения чистой угольной технологии кипящего слоя на водоугольном топливе // Новости теплоснабжения. 2005. № 5(49). С. 26–29.

9. Мурко В. И., Федяев В. А., Хамляйнен В. А. Физико-технические основы водоугольного топлива. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2009.

10. Мурко В. И., Федяев В. И., Дзюба Д. А., Сейбель В. Я., Столяров Н. А. Опыт использования водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. 2006. № 4(68). С. 31–36.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ВЛАГОУДАЛЕНИЯ ПРИ СУШКЕ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ВЕТОК ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ

Н. А. Нигай*, С. В. Сыродой *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
*nai5@tpu.ru

Установлены закономерности процессов дегидратации типичных лесных горючих материалов, проанализировано влияние вида биомассы на интегральные характеристики в условиях радиационно-конвективного нагрева. Сформулирована гипотеза о механизме процесса влагоудаления из веток лиственных деревьев.

В последние десятилетия значимость изучения процессов тепломассопереноса, протекающих при сушке древесной биомассы, существенно возросла. Это обусловлено перспективами использования древесины в энергетике в качестве основного топлива или добавки к углю [1, 2]. Одним из наиболее оптимальных вариантов энергетического использования биомассы является сжигание типичных отходов жизнедеятельности леса или лесного горючего материала (ЛГМ – листовой и хвойный опад, сухостой, сухая трава, ветки и др.) в топках паровых и водогрейных котлов ТЭС. Кроме того, жёсткая экологическая политика ведущих мировых держав создает предпосылки для все более активного использования биомассы в производстве тепловой и электрической энергии [3].

Целью данной работы является установление по результатам эксперимента закономерностей процессов дегидратации типичных лесных горючих материалов (ветки липы, берёзы и тополя) и анализ влияния вида биомассы на интегральные характеристики в условиях радиационно-конвективного нагрева.

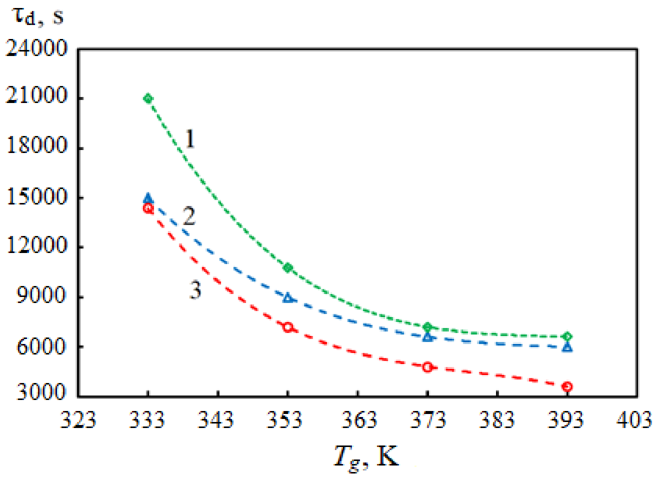


Рис. 1. Зависимости времён дегидратации древесной биомассы от температуры окружающей среды для трёх исследовавшихся видов древесины: 1 – ветки берёзы; 2 – ветки липы; 3 – ветки тополя

На рис. 1 приведены зависимости времен сушки веток различных пород древесины от температуры внешней среды. Можно отметить существенно нелинейный (экс-

---

поненциальный) характер зависимостей $\tau_d(T_g)$. Это обусловлено значимым влиянием процесса испарения влаги на динамику влагоудаления.

Анализ зависимостей (рис. 1) показывает, что времена сушки веток берёзы больше аналогичных времен других исследовавшихся видов древесной биомассы. Это, скорее всего, связано с низкой температуропроводностью берёзы по сравнению с тополем и липой. В результате ветки берёзы прогреваются значительно медленнее других видов древесной биомассы. Это приводит к торможению всего процесса дегидратации.

Установленные по результатам выполненных экспериментов закономерности дают основания для вывода о том, что в условиях низкотемпературного нагрева влажной древесной биомассы механизм влагоудаления существенно отличается от общепринятых закономерностей процесса сушки. По результатам проведенных экспериментов сформулирована гипотеза (существенно отличающаяся от известных) о механизме процесса влагоудаления из веток лиственных деревьев.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015-П).

Список литературы

1. Shen D. K., Gu S., Luo K. H., Bridgewater A. V. Analysis of wood structural changes under thermal radiation // Energy Fuel, vol. 23, pp. 1081–1088, 2009.

2. Saidur R., Abdelaziz E. A., Demirbas A., Hossain M. S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers // Renew. Sustain. Energy Rev. vol. 15, pp. 2262–2289, 2011.

3. Braimakis K., Magiri-Skouloudi D., Grimekis D., Karellas S. Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cooling // Renewable Energy, vol. 154, pp. 252–269, 2020.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ БИОТОПЛИВ

Р. М. Федоренко*, Д. В. Антонов, П. А. Стрижак *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
**vfedrm@gmail.com*

Представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших определить количество и размеры вторичных фрагментов, образующихся при микровзрыве и других режимах фрагментации капель биотоплив. Исследованы родительские капли на основе воды и растительных масел (рапсовое, оливковое, подсолнечное, льняное, кунжутное, арахисовое, таловое, кукурузное). Комплексно изучено влияние группы факторов на характеристики вторичных фрагментов (температура нагрева, начальный размер исходных капель, концентрации компонентов). Получены аппроксимационные выражения в виде зависимостей ключевых характеристик от входных параметров.

Добавки и примеси растительного происхождения к жидким, твердым и композиционным топливам все чаще применяются в транспортном и энергетическом секторах по ряду причин. Основная причина связана с пониженными антропогенными выбросами при частичной замене углеводородов на растительные компоненты [1]. Одним из наиболее актуальных направлений развития топливных технологий является повышение эффективности их распыления за счет эффектов вторичного измельчения. Среди известных способов вторичного измельчения микровзрывная фрагментация считается наиболее продуктивной вследствие существенно большего роста площади поверхности жидкости в единицу времени [2].

В настоящей работе в качестве компонентов исходных капель использовалась вода и растительные масла: рапсовое, оливковое, подсолнечное, льняное, кунжутное, арахисовое, таловое, кукурузное. Методика генерации исходных капель, схема экспериментального стенда и методика проведения экспериментов, аналогична приведенной в работе [3]. Анализ количества и размеров вторичных фрагментов осуществлялся с помощью метода SP, для этого применялся код, разработанный в системе Matlab. На основании полученных данных строились распределения по размерам вторичных фрагментов.

При анализе характеристик вторичных фрагментов установлены составы, позволяющие получить максимальную эффективность вторичного измельчения. Для объективной оценки эффективности микровзрывной фрагментации капель биотоплив вычислены значения относительных коэффициентов, учитывающих критические условия и последствия измельчения.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-10008, https://rscf.ru/project/21-71-10008).

Список литературы

1. Forsberg C. W., Dale B. E., Jones D. S., Hossain T., Morais A. R. C., Wendt L. M. Replacing liquid fossil fuels and hydrocarbon chemical feedstocks with liquid biofuels from large-scale nuclear biorefineries // Appl. Energy., vol. 298, pp. 1–8, 2021.

2. Antonov D. V., Fedorenko R. M., Strizhak P. A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // Energies, vol. 15, pp. 1–19, 2022.

3. Antonov D. V., Fedorenko R. M., Strizhak P. A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng., vol. 164, pp. 1–14, 2020.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ БИОМАССЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО ПИРОЛИЗА

А. С. Швец*, П. А. Стрижак,
Г. С. Няшина, К. В. Виногродский *

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634028, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30
**ass74@tpu.ru*

Биомасса считается одним из самых перспективных источников экологической энергии. Микроволновый пиролиз – относительно новый и перспективный способ переработки биомассы. В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования микроволнового пиролиза биомассы и смесей на ее основе. Исследованы экологические и энергетические характеристики биомассы при микроволновом нагреве. Установлено, что при пиролизе опилок средние концентрации CO, CH_4, H_2 на 40–50 % выше, чем у других видов биомассы. Также пиролиз опилок характеризовался наименьшим выходом зольного остатка. Древесина, зерновые, сельскохозяйственные и лесные отходы являются одними из основных доступных возобновляемых источников энергии. Обосновано, что изучение механизма и кинетики микроволнового пиролиза листьев, соломы и опилок является актуальным направлением в усовершенствовании рекуперации энергии и уменьшения выбросов CO_2.

Помимо производства энергии, биомасса используется для получения материалов и химикатов. Традиционные источники энергии, такие как нефть, уголь и природный газ, от которых зависят многие государства, истощаются. Они вызывают деградацию экологии, а именно загрязнение воздуха, разрушение озонового слоя и глобальное повышение температуры [1]. Настоящее исследование направлено на изучение влияния свойств и типа биомассы на условия и характеристики пиролиза и газификации при микроволновом нагреве. Биомасса – разновидность углеродно-нейтрального сырья, которое не увеличивает концентрацию углекислого газа на протяжении всего своего жизненного цикла [2]. Определение подходящего сырья является важным аспектом для производства бионефти высокого качества, чтобы заменить традиционные ископаемые виды топлива и смягчить глобальное потепление или другие экологические проблемы.

На рис. 1 представлен сконструированный для решения задач исследования экспериментальный стенд, который использовался при определении газового состава продуктов пиролиза биомассы. Основными элементами стенда являются микроволновый реактор, осуществляющий нагрев биомассы, и газоанализатор Тест 1, реализующий забор газовой пробы и определение концентраций компонентов газовой смеси.

Пиролиз биомассы осуществляется в микроволновом реакторе. В последний помещался глиняный тигель с образцом биомассы. Нагрев осуществлялся с помощью СВЧ-волн благодаря энергии, производимой магнетроном. Блок управления позволял регулировать мощность нагревателя в диапазоне от 200 до 800 Вт. После ввода топлива в реактор дверца последней герметично закрывалась. В дверцу вмонтирован газоотборный шланг. Для измерения концентрации газов применялся газоанализатор Тест 1. Основные элементы: модульный зонд, конденсатосборник, систему фильтрации пробы, вычислительный блок газоанализатора, внутри которого установлены побудитель расхода, капилляр, форкамера и измерительные электрохимические сенсоры O_2, CO, SO_2, NOx, NO_2, H_2S, HCl).

Рис. 1. Схема использованного стенда

В экспериментах с различными видами биомассы установлено, что в идентичных условиях нагрева при пиролизе опилок средние концентрации CO, CH_4, H_2 выше (на 25–85 %), чем у других видов биомассы. Пиролиз опилок характеризовался наименьшим выходом зольного остатка. Для композиционной биомассы также зафиксирован низкий показатель по количеству оставшейся золы. Причиной различия концентраций можно считать состав биомассы и ее характеристики. По сравнению с соломой опилки имеют большую теплоту сгорания и поглощающую способность, за счет чего при добавлении опилок к смеси биомассы из листьев и соломы концентрации генераторного газа CO увеличились в 4 раза, NO – в 2 раза, CO_2 – в 1,3 раза.

В экспериментах с разными видами опилок высокие показатели достигнуты при пиролизе смеси опилок, а также кедровых опилок меньшего размера. В сравнении с крупными кедровыми опилками средние концентрации CO для данных топлив оказались выше почти в 2 раза, H_2 – до 4 раз. Отличия концентраций газов обусловлены размером частиц биомассы. Более мелкие частицы (0,15–0,5 мм) при пиролизе и газификации способствуют более высокому общему выходу газа, за счет того, что в эксперименте мелкодисперсные частицы прогорели практически полностью, о чем говорит количество оставшейся золы. Установлено, что количество оставшейся золы при пиролизе кедровых опилок с меньшим размером частиц ниже в 3,5 раза по сравнению с крупными частицами. Более мелкие частицы быстрее нагреваются, при их пиролизе образуется больше газа, повышается его теплота сгорания и эффективность преобразования углерода. Кроме того, меньший размер частиц имеет большую площадь контакта, что приводит к более высоким скоростям химических реакций.

Исследование профинансировано Российским фондом фундаментальных исследований, Национальным советом Бразилии по научно-техническому развитию и Министерством науки и технологий (Правительство Индии) в соответствии с исследовательским проектом РФФИ БРИКС № 19-53-80019.

Список литературы

1. Prasad S., Venkatramanan V., Kumar S., Sheetal K. R. Biofuels: A Clean Technology for Environment Management, Sustainable Green Technologies for Environ. Manage. (2019), pp. 219–240.

2. Wenfei Cai, Zhongyang Luo, Jinsong Zhou, Qinhui Wang. A review on the selection of raw materials and reactors for biomass fast pyrolysis in China. Fuel Processing Technology.Volume 221, October 2021, 106919.

Круглый стол
«Проблемы подготовки кадров теплофизического профиля»

ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ ТЕПЛОФИЗИКОВ ПО ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ СТАНДАРТАМ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

М. С. Лобасова *

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

Рассмотрены изменения в образовательных стандартах высшего образования для специальностей и направлений подготовки студентов теплофизического профиля от первого до третьего поколений. В связи с тем, что теплофизика всегда позиционировалась как междисциплинарная научно-техническая специальность, в настоящий момент значительно снизились возможности подготовки таких специалистов. В стандартах третьего поколения отсутствуют как специальность, так и самостоятельное направление подготовки «Теплофизика». В профессиональных стандартах – ключевом факторе, определяющем в ближайшем будущем взаимодействие рынка труда и системы образования, – отсутствуют область профессиональной деятельности, связанная с теплофизикой, и достаточное количество утвержденных профессиональных стандартов.

Подготовка специалистов теплофизического профиля многие годы осуществлялась по двум траекториям: как специализация специальности «Физика» и как самостоятельная наукоемкая инженерная специальность «Теплофизика». В 1990-е гг., в дополнение к специалитету, в стране была введена двухуровневая система высшего профессионального образования (бакалавриат и магистратура), что привело к возникновению направлений подготовки бакалавров и магистров «Физика» и «Техническая физика». После четырех лет подготовки в бакалавриате можно было два года обучаться в одноименной магистратуре. Кроме того, в течение одного – полутора лет бакалавры этих направлений могли продолжить обучение по десятку специальностей, среди которых были «Теплофизика» и «Физика» с соответствующей (обязательной) специализацией. ГОС ВПО первого поколения магистратуры обязательно содержал аннотированный перечень магистерских программ. Для направления «Техническая физика» такой программой была «Теплофизика и молекулярная физика». Вообще, «Техническая физика» в этом стандарте была определена как «исследовательское направление, в котором реализована идея объединения университетского и технического образования».

ГОС ВПО по специальности «Теплофизика» (1995), отнесенной к междисциплинарным естественно-техническим специальностям, определяет, что теплофизика – это область науки и техники, включающая совокупность средств, приемов, способов и методов для получения полной и достоверной информации о характере и количественных закономерностях протекания тепловых процессов в существующих и новых технических системах для энергетики, авиационной и космической техники, приборостроения и других отраслей промышленности. А ГОС ВПО по направлению подготовки бакалавров «Техническая физика» (1994) определяет, что техническая физика – это область науки и техники, которая включает совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, направленных на использование результатов фундаментальных физических исследований в технике, а также на создание и применение в науке и технике новых физических методов исследования, технологий, приборов и устройств.

Стандарты второго поколения были приняты в основном в 2000 г. В них группы родственных специальностей были объединены в направления с общим перечнем общепрофессиональных дисциплин. Так, в направление «Техническая физика» были объединены три специальности – «Техника и физика низких температур»; «Теплофизика»; «Атомные электрические станции и установки». При этом направление специальностей «Техническая физика» обозначено как область техники, включающая совокупность средств, способов и методов человеческой деятельности, связанных с разработкой, созданием и эксплуатацией аппаратов и установок, преобразующих и использующих *тепловую* энергию. В остальном возможности бакалавров продолжить обучение в специалитете остались такими же, только теперь в стандартах были указаны не отдельные специальности, а соответствующие направления. Магистратура была дополнена возможностью продолжения обучения в ней бакалавров не только одноименного направления, но и 2-3 родственных, перечень которых тоже был указан в соответствующем стандарте. Аннотированный список программ магистратуры был сохранен.

В то же время начались процессы, связанные с разработкой нового закона об образовании. Пересматривался перечень направлений и специальностей, в том числе появлялись новые (например, инноватика и нанотехнологии). Обсуждались проблемы аккредитации образовательных программ. Происходил переход от «знаниевой» модели выпускника к компетентностной. Одним из элементов таких преобразований стала отмена в 2008 г. аннотированного перечня магистерских программ и разрешение обучаться в магистратуре всем, кто имеет любое высшее образование.

Стандарты третьего поколения (ФГОС ВПО) в основном были утверждены в 2009 г. Было увеличено количество укрупненных групп, направление подготовки бакалавров и магистров «Техническая физика» разделено на два («Техническая физика» и «Ядерная энергетика и теплофизика») в разных УГСН. Значительно сократилось количество специальностей, в том числе исчезли и «Физика», и «Теплофизика». При этом остальные две специальности направления «Техническая физика» были преобразованы в отдельные направления бакалавров, которые вошли вместе с «Технической физикой» в одну УГСН «Физико-технические науки и технологии». ФГОС ВПО содержал как требования к результатам освоения программ в виде групп компетенций, так и требования к структуре программ в виде перечня дисциплин. Компетенции были объединены в две группы – ОК (общекультурные) и ПК (профессиональные). Среди ПК для направления «Ядерная энергетика и теплофизика» были установлены компетенции научно-исследовательской деятельности, связанные с готовностью выпускника к исследованиям и испытаниям оборудования атомных электростанций. В соответствии с этим стандартом оказалось, что теплофизика без ядерной энергетики существовать не может, что значительно ограничило возможности разработки образовательных программ этого направления, как бакалавриата, так и магистратуры.

После того, как в 2012 г. был принят Федеральный закон № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», оказалось, что принятые в 2009 г. образовательные стандарты ему не полностью соответствуют. Законом было установлено, что высшее образование может быть только профессиональным, поэтому новые стандарты поколения 3+ теперь обозначаются как ФГОС ВО. Из требований к структуре программ почти полностью исчез перечень дисциплин. В перечне компетенций появились общепрофессиональные (ОПК), которые были выделены из соответствующего раздела ПК. Но самое главное, произошли изменения в правилах выделения бюджетных мест – значительно сократилось их количество для группы направлений, в которую входит «Техническая физика», и совсем ограниченным стало число мест для бакалавров группы, в которую входит «Ядерная энергетика и теплофизика».

В это же время началась разработка профессиональных стандартов (ПС), которые должны были определить требования к образованию работников, а также к выполняемым ими на соответствующей должности трудовым функциям, включая знания и умения. Профессиональная деятельность была разделена на области, для которых и должны были разрабатываться ПС, как правило, специалистами ведущих предприятий отрасли, совместно отраслевыми советами по профессиональным квалификациям. В результате была проведена еще одна модификация образовательных стандартов (ФГОС ВО 3++), в которых области профессиональной деятельности выпускников и ПК были согласованы с ПС. Основная проблема в этом случае заключается в том, что утвержденные ПС, в которых упоминаются направления подготовки теплофизиков, существуют в единичном количестве только для двух областей: 24 Атомная промышленность и 25 Ракетно-космическая промышленность.

Школьная секция

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ – ГЛАВНАЯ ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ БУДУЩЕГО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ю. М. Горобец*

Физико-математическая школа Сибирского федерального университета
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Борисова, 5
gorobets.yuri2005@mail.ru

Научный руководитель: Е. Н. Шляхтич, канд. физ.-мат. наук,
Сибирский федеральный университет

Работа посвящена несомненно актуальной энергетической проблеме современного человечества и рассмотрению возможных способов её решения. Индивидуальный проект «Термоядерный синтез – главная перспектива развития будущего ядерной энергетики» является научно-популярным трудом, адресованным широкому кругу читателей.

В ходе работы освоен теоретический материал, посвящённый расчётам энергии связи и энерговыделению реакций, проведено сравнение возможных способов получения энергии. Проведён хороший качественный обзор современных достижений в области разработки термоядерных реакторов. При этом выявились проблемы в реализации и недостатки термоядерных реакторов, о которых не было подозрений до исследования.

Был обнаружен альтернативный метод решения энергетического кризиса человеческой цивилизации – реакторы, работающие на реакции распада, но использующие МОКС-топливо – смесь оксидов плутония и природного урана, то есть отработанные ядерные отходы от реакторов предыдущих поколений.

Проведены расчёты, показывающие энергетическое преимущество реакций термоядерного синтеза по сравнению с реакциями распада. Так, из всех электростанций, которые дают людям энергию, с точки зрения выделения энергии наиболее выгодными считаются атомные станции, которые работают за счёт реакции распада урана-235.

$${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3 \cdot {}^{1}_{0}\mathrm{n}\ , [1]$$

$$Q = 200\ \text{МэВ}\ (199,\ 8\ \text{МэВ}).$$

Энергия на нуклон

$$q_1 = \frac{200\ \text{МэВ}}{236} = 0{,}85\,\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$$

$$E=\Delta m \times c^2\ [1],$$

где Δm – дефект масс, с – скорость света в вакууме.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_я\ [2]$$

Но запасов урана хватит на 80–100 лет, поэтому нужно искать новый источник энергии.

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – синтез более тяжёлых атомных ядер из более лёгких с целью получения энергии.

$$ {}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n \ [1] $$

m_1 (дейтерий) = 2,0141 а. е. м. m_2(тритий) = 3,01605 а. е. м. m_3 (нейтрон) = = 1.00866 а. е. м. m_4 (гелий) = 4,002602 а. е. м.

$$ \Delta m = m_1 + m_2 - m_3 - m_4 $$

$$ \Delta m = 0{,}18888 \text{ а.е.м.} $$

$$ Q = \frac{0{,}18888 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\text{кг}}{1 \text{ а.е.м.} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{Кл} \cdot 10^{6}} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 17{,}6 \text{ МэВ.} $$

Энергия на нуклон

$$ q_2 = \frac{17{,}6 \text{ МэВ}}{5} = 3{,}52 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}} $$

Так как энергии на нуклон выделяется больше в реакции синтеза, она энергетически выгоднее реакции деления урана [4].

Доступ к дейтерию неограничен (содержится в водах Мирового океана), а тритий добывают из лития. Поэтому термоядерный синтез – перспективный способ получения энергии.

Но есть проблемы, которые мешают реализовать идею. Необходимо преодолеть силы кулоновского отталкивания между изотопами водорода, для чего необходимо затратить большое количество энергии.

$$ U_{\text{кул}} = 9 \cdot 10^9 \frac{1{,}6^2 \cdot 10^{-38}}{4 \cdot 10^{-15} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 3 \cdot 10^5 \text{эВ. [2]} $$

Из формулы $E = \frac{3}{2} k^{*} T$ [2] следует, что температура равняется $2{,}3 \cdot 10^9$К. При такой температуре вещество находится в состоянии плазмы.

Ещё одной проблемой становится строительство реакторов, так как необходимо подобрать такой материал, который не будет разрушаться под воздействием горячей плазмы. В настоящее время используют самый тугоплавкий металл в мире – вольфрам.

В ходе исследования проблемы было выяснено, что процессе протекания реакции плазма загрязняется материалами первой стенки, что приводит к накоплению пыли, которая может представлять опасность для окружающей среды. Это значит, что гипотеза об экологической безопасности синтеза не подтвердилась [3].

Реакторы имеют название ТОКАМАК (Тороидальная камера с магнитными катушками). Ученые и инженеры добились огромных успехов в удержании плазмы на реакторе EAST. Сейчас идёт строительство самого большого реактора ITER, работа которого должна стать основой создания термоядерных электростанций. Это международный проект, в котором одну из ведущих ролей играет Россия.

Оказалось, что есть другой способ решения проблемы. МОКС-топливо – смесь оксидов плутония и природного урана. Отработанное ядерное топливо можно вновь использовать в реакторах и получать энергию. Реакторы на таком топливе уже дают людям электроэнергию. В сентябре 2022 г. реактор БН-800 на МОКС-топливе был впервые загружен на 100 % на Белоярской АЭС. [5]

Это великое российское достижение, которое позволит создать замкнутый топливный цикл и предотвратить энергетический кризис.

В работе доказано, что термоядерный синтез выгоднее в плане получения энергии, чем реакция распада, путём расчётов количества энергии на нуклон. Обнаружен альтернативный метод решения энергетического кризиса человеческой цивилизации – реакторы, использующие МОКС-топливо. Следовательно, термоядерный синтез и МОКС-топливо – главные перспективы развития ядерной энергетики.

Список литературы

1. Воронцова Н. И., Делов М. И. Ядерная физика 10–11 классы: учеб. пособие для общеобразовательных организаций; под ред. Ю. А. Панебратцева, Г. В. Тихомирова. – М. : Просвещение, 2019. – 159 с.

2. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник: в 3 т. Т. 1. Физика атомного ядра. СПб.: Лань, 2009. 383 с.

3. Садовский Я. Как удержать Солнце: материалы для термоядерных реакторов, и причем здесь пыль.

4. Пёрышкин А. В. Физика. 9 класс: онлайн-учебник. Термоядерная реакция. Режим доступа: http://лена24.рф/Физика_9_класс_Перышкин/62.html

5. https://ru.wikipedia.org/wiki/МОКС-топливо

ПЕРЕРАБОТКА НЕКОНДИЦИОННЫХ УГЛЕЙ И УГЛЕШЛАМОВ

А. В. Екатеринчев *

МАОУ «Лицей № 7 имени Героя Советского Союза Б. К. Чернышева»
660001, Российская Федерация, Красноярск, ул. Менжинского, 15
marina60@mail.ru

Научный руководитель: М. П. Баранова, д-р техн. наук, профессор,
Сибирский федеральный университет

Рассмотрена технология ожижения органической массы некондиционных углей и углешламов. В частности, выполнены теоретические и экспериментальные исследования по влиянию кавитационного, силового ультразвукового, микроволнового и электроимпульсного воздействия на структурно-реологические характеристики водоугольных суспензий из этих материалов.

В настоящее время использование некондиционных углей и углешламов затруднительно. Например, фильтр-кек с крупностью частиц 0–1000 мкм при содержании класса 0–100 мкм до 90 %, влажностью 30–45 % и зольностью 23–62 % не может быть добавлен к товарному продукту, не используется как самостоятельный продукт и направляется в отвал вместе с крупной породой. В результате существенно загрязняется окружающая среда и теряется значительная доля перерабатываемого угля (до 10–12 %). Кроме того, оборотная вода насыщается остаточными реагентами, отделяющими примеси (флокулянтами), которые нарушают технологический процесс обогащения угля [1–3]. Для решения проблем использования низкосортных углей и утилизации отходов углеобогащения создана установка по ожижению органической массы.

Цель работы – повышение эффективности процесса деструкции органических соединений угольного сырья и механической надежности применяемого оборудования.

Все экспериментальные работы были проведены на оборудовании кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Политехнического института Сибирского федерального института. Определена технологическая и техническая возможность глубокой переработки угля путем его ожижения с использованием методов экстремальных механохимических и физических воздействий [1, 4]. Был проведен процесс ожижения органической массы угля путем воздействия на исходную смесь экстремальными физическими воздействиями. Процессы необходимы для глубокой переработки угля. Полученная углемасляная суспензия накапливалась в емкости и затем последовательно пропускалась через роторно-пульсационный аппарат (РПА), ультразвуковой аппарат ИЗАП-1/22-ОП и генератор высокочастотных электромагнитных разрядов. Обработка углемасляной суспензии таким образом производилась в течение 20 минут. После указанной обработки полученная жидкость анализировалась на выход жидких фракций. Надо отметить, что перед ожижением уголь обеззоливали. В табл. 1 представлен выход полученных фракций. Данные показывают увеличение количества жидких фракций при применении механохимического воздействия на обрабатываемую смесь.

Ультразвуковое и электроимпульсное воздействия. На данном этапе исследований определена технологическая и техническая возможность снижения структурно-реологических характеристик ожиженного угольного материала применением ультразвукового и электроимпульсного воздействия. Органическая часть твердой массы, приготовленной углемасляной суспензии, которая превратилась в относительно тяжелую органическую жидкость, обладает высокой вязкостью и плотностью, повышенным содержанием высокомолекулярных компонентов, что может повлиять на возможности распыла при сжигании. Полученная смесь углеводородов была обработана физическими полями. Эффективное использование указанных выше веществ позволит получить не только экономический, но и существенный экологический эффект [1, 4].

Таблица 1

Выход фракций

Компоненты	Переработка, массовая доля %	Результат ожижения, массовая доля %
Нефтепродукт (170–364 °C)	16,8	33,5
Нефтепродукт (свыше 364 °C)	30,7	27,6
ВСЕГО	47,5	61,1

В работе использовали насос-кавитатор типа РПА. Это вертикальный аппарат, в котором ряды неподвижных лопаток статора чередуются с вращающимися лопатками ротора. При вращении ротора в аппарате происходят акустические колебания и дополнительно присутствует механическое воздействие. Установлен положительный эффект при применении аппарата для снижения вязкости системы. Показано, что вязкость ее снижается в пределах от 18 до 35 % в зависимости от времени обработки ожиженной массы в аппарате (1, 3, 6, 9 минут). Понижение вязкости связано с разрывом молекул углеводородов и изменением состава жидкой фазы. Пониженная вязкость сохраняется как минимум в течение 20 суток.

Микроволновое поле. При акустическом воздействии возникают кавитационные эффекты, роль которых заключается в препятствии образованию крупных ассоциатов и диспегировании уже существующих до более мелких образований. Совместная обработка ожиженной массы угля микроволновым полем и ультразвуком позволяет существенно снижать ее вязкость, от 20 до 30 %.

Ожижение органической массы угля сопровождается расщеплением структур макромолекул органических веществ угля на ароматические фрагменты с меньшей молекулярной массой, содержащие функциональные группы [3].

Следует отметить, что такая технология позволит решить проблему повышения ценности конечной угольной продукции, в т. ч. за счет вовлечения в оборот неиспользуемых тонких угольных шламов.

Список литературы

1. Murko V. I., Baranova M., Grishina I. Deep Processing Of Organic Mass Of Finely Dispersed Coal Waste // E3S Web of Conferences. VIth International Innovative Mining Symposium. 2021. С. 02014.

2. Хренкова Т. М. Механохимическая активация углей. М.: Недра, 1993.

3. Екатеринчев А. В., Баранова М. П. Значение физико-химических процессов в энерготехнологиях // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы XXX международной научно-практической конференции, 19–20 сентября, Bengaluru, India. 2022 г. С. 88–92.

4. Baranova M. P., Qian Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, V.A. Kulagin, D. Likhachev Utilization slurry coal-water fuel. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 7 (2014 4) 474-480.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ НА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

А. К. Литвинцева *

Красноярский краевой Дворец пионеров
660037, Российская Федерация, Красноярск, ул. Московская, 20а
anay.litvintseva@gmail.com

Научный консультант: К. Ю. Литвинцев, канд. физ.-мат. наук., ИТ СО РАН

В данной работе рассматриваются шесть сценариев пожара первого этажа МБОУ «Средняя школа № 94» Ленинского района г. Красноярска с помощью программного комплекса «СИГМА ПБ». Описана зависимость рисков гибели людей от готовности школы к пожару (состояние эвакуационных выходов, степень обученности персонала и учащихся организованной эвакуации) и места возгорания. В результате анализа рассмотренных сценариев эвакуации был сделан вывод о том, что в случае неорганизованной эвакуации риск гибели людей определяется в первую очередь условиями протекания пожара, а при организованной эвакуации риск гибели людей в целом минимален.

С давних пор люди стремились уменьшить материальный и социальный ущерб от пожаров. Правила пожарной безопасности формировались сначала опытным путем, позже – с применением научных подходов. Одним из важных инструментов повышения уровня пожарной безопасности является численное моделирование физических процессов. Численное моделирование, реализованное в рамках программных комплексов, позволяет с той или иной степенью достоверности прогнозировать протекание пожаров и эвакуацию людей. Использование программных инструментов, предназначенных для моделирования развития пожара и эвакуации, позволяет прогнозировать распространение опасных факторов пожара (ОФП), выявлять узкие места при организации/планировании эвакуации. Одним из таких программных комплексов является «СИГМА ПБ». [1, 2], позволяющий численно моделировать эвакуацию при пожарах и тем самым снизить риски гибели людей.

Внедрение инструментов прогнозирования пожаров и эвакуаций, основанных на современных численных подходах, в образовательных учреждениях для целей снижения рисков гибели людей и повышения грамотности в области пожарной безопасности учащихся является важной задачей [3].

В данной работе на ограниченном наборе сценариев продемонстрировано влияние режима функционирования школы при пожаре и места возгорания на эвакуацию. Под режимом функционирования школы подразумевается ее готовность к пожару, выражающаяся в состоянии эвакуационных выходов и степени обученности персонала и учащихся организованной эвакуации. В качестве объекта исследования было выбрано здание МБОУ «Средняя школа № 94» Ленинского района г. Красноярска. Для достижения цели работы геометрия школы была упрощена – рассматривался только первый этаж. Это позволило упростить построение расчетной области и провести более наглядную демонстрацию влияния готовности школы к действиям при возникновении пожара (режима функционирования школы в чрезвычайной ситуации). Расчетная область для моделирования развития пожара и эвакуации строились на основе плана эвакуации только первого этажа (рис. 1, *а*).

На рис. 1, *б* представлены последствия неорганизованной эвакуации при пожаре, когда задымление блокирует большое число учащихся и сотрудников школы. Общее время эвакуации составило 240 с (рис. 1, *в*), что почти в три раза превышает время организованной эвакуации. Люди в данном сценарии попадают в область критических значений ОФП уже через 125 с (рис. 1, *б*). К этому времени в здании еще оставалось 202 человека из 344. Также можно отметить, что к 45-й секунде вблизи выхода сформировалось скопление людей в количестве около 90 человек, которое практически не изменялось в течение 40 с, так как приток людей из других помещений был ограничен числом людей, выходящих наружу.

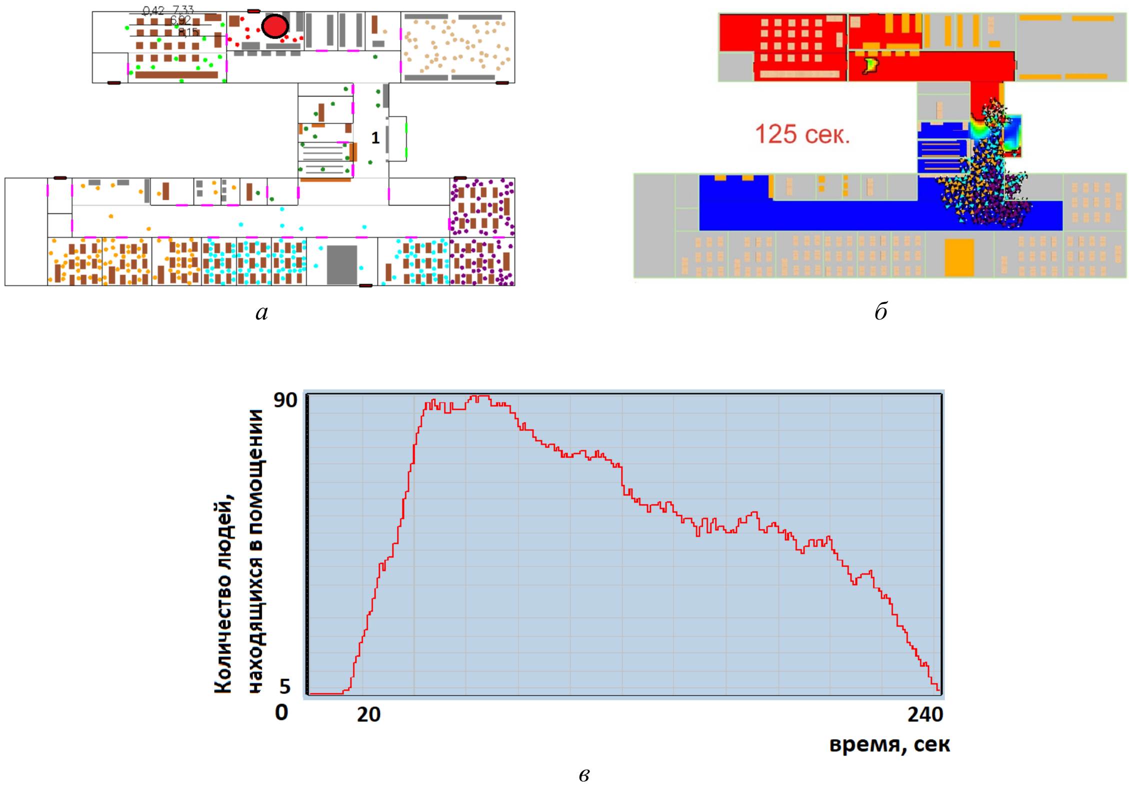


Рис. 1. Моделирование сценария пожара при неорганизованной эвакуации:
а – схема здания, открытый выход обозначен цифрой 1, очаг пожара – красным кругом;
б – эвакуация людей на 125 с; *в* – график динамики количества людей,
находящихся в помещении прилегающего к выходу

В целом из анализа рассмотренных сценариев эвакуации можно сделать вывод о том, что в случае неорганизованной эвакуации риск гибели людей определяется в первую очередь условиями протекания пожара (место возгорание, доступность и загроможденность эвакуационных путей и другие возможные факторы), а при организованной эвакуации риск гибели людей в целом минимален.

Список литературы

1. Литвинцев К. Ю., Кирик Е. С., Дектерев А. А. [и др.] Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 51–59.

2. Kirik E., Litvintsev K., Dekterev A., Khasanov I., Gavrilov A., Malyshev A., Harlamov E., Popel E. Simulations of Fire Evacuations in “Sigma FS” Software as a Fire Safety

Training Instrument // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 21-26 April, St. Petersburg. Vol. 2. pp. 1281–1292, 2019.

3. Литвинцев К. Ю., Кирик Е. С., Ягодка Е. А. Проблемы применения численного моделирования при определении расчетных величин пожарного риска // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 4. С. 56–69.

ОЦЕНКА БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО КОМФОРТА ГОРОДСКОГО КВАРТАЛА

С. А. Петрухина *

МАОУ «КУГ № 1 “Универс”»
660001, Российская Федерация, Красноярск, ул. Корнеева, 50

Научные руководители: А. С. Грачёв, канд. физ.-мат. наук,
МАОУ «КУГ №1 Универс»;
В. Д. Мешкова, канд. техн. наук,
Сибирский федеральный университет;
С. А. Филимонов, канд. техн. наук,
ИТ СО РАН

В работе представлено исследование биоклиматического комфорта городского квартала Красноярска по критерию эквивалентно-эффективная температура. Для проведения исследования было выполнено районирование города Красноярска на основании данных с автоматизированных постов наблюдения по рассматриваемому критерию. Однако выбранный квартал находится в Железнодорожном районе, по которому нет данных, поэтому было проведено численное моделирование аэрационного и теплового режима городского квартала для определения уровня комфорта в нем.

Плохая экология и специфическое расположение зданий в микрорайоне могут привести к формированию потенциально опасных зон, в которых будет происходить накопление высокой концентрации загрязняющих веществ вследствие плохой экологии и низкой продуваемости из-за образования зон с низкими скоростями ветра. Дабы дать какую-либо оценку, необходимо изучить аэродинамическую обстановку, складывающуюся в жилых кварталах.

Сегодня по уровню воздействия на компоненты природной среды Красноярский край занимает одно из лидирующих мест в стране [1]. Одна из основных проблем в сфере окружающей среды и экологической безопасности – загрязнение воздуха, и город Красноярск она не обошла стороной. Ветер является определяющим параметром, который отвечает за процессы рассеивания загрязняющих веществ в приземной атмосфере, а также за формирование микроклимата территории. Стоит отметить, что температурный режим и уровень влаги в атмосфере играют не менее важную роль в создании климата. В связи с этим возникает интерес в изучении основополагающих природных факторов, формирующих микроклимат в городской среде, а также изучение механизмов формирования уровня ветрового комфорта в условиях жилой застройки.

Для исследования был выбран строящийся жилой квартал, состоящий из двух микрорайонов – «Новоостровский» и «Бограда, 109».

Первый этап исследования – определение расположения исследуемых кварталов в городе относительно комфортности. Для этого на основании данных с автоматизированных постов наблюдения было построена карта комфортности в городе по районам для двух сезонов (зима/лето) по критерию «эквивалентно-эффективная температура» (ЭЭТ) [2], который позволяет учитывать комплексное влияние на человека температуры, ветра и влажности. Результат районирования представлен в табл. 1.

Таблица 1

Районирование города Красноярска по критерию ЭЭТ

Район	Зима	Лето
Октябрьский	холодно	тепло
Советский	очень холодно	тепло
Свердловский	*нет данных*	тепло
Центральный	начинается угроза обморожения	умеренно тепло
Ленинский	холодно	умеренно тепло
Кировский	*нет данных*	тепло
Железнодорожный	*нет данных*	*нет данных*
Пос. Берёзовка	очень холодно	умеренно тепло

Однако исследуемые кварталы располагаются в Железнодорожном районе города, по которому нет данных, поэтому было проведено численное моделирование аэрационного и теплового режима кварталов для определения уровня комфорта в нем. Численное исследование было выполнено в программном комплексе SigmaFlow, предназначенном для моделирования широкого класса задач тепломассообмена [3]. Для расчёта требовалось ввести начальные условия (табл. 2), которые задавались на высоте 10 м.

Таблица 2

Параметры начальных условий для расчёта

Параметр	Значение
Температура окружающей среды	–20 °С
Скорость набегающего потока (ветра)	2 м/с
Температура реки Енисей	4 °С
Температура зданий	20 °С
Длина расчётной области	3 км
Ширина расчётной области	2,5 км
Высота расчётной области	1 км

Результаты численного исследования представлены на рис. 1 в виде распределения поля эквивалентно-эффективной температуры на высоте 2 м, в зоне пребывания людей.

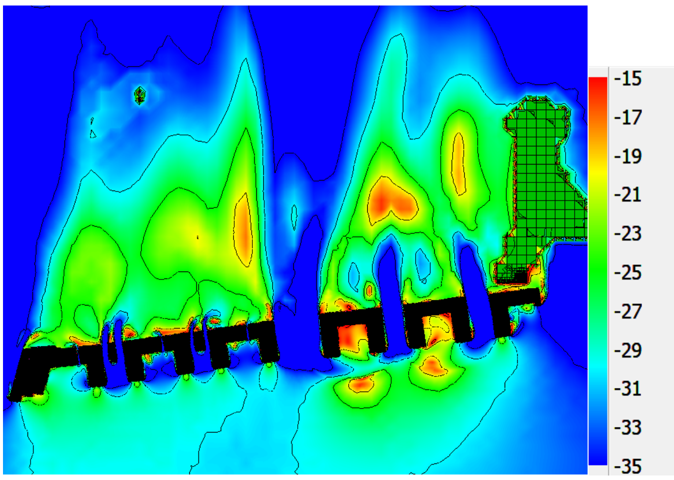


Рис. 1. Поле ЭЭТ на высоте 2 м

Анализируя полученные результаты, можно выделить наименее комфортные зоны кварталов – это проходы между зданиями, тогда как с подветренной стороны наблюдаются более комфортные условия. Во дворах кварталов заметно сильное различие по комфортности, это может быть связано как с рельефом местности, так и влиянием реки Енисей. Понимание влияния этих факторов на комфортность внутридворовых территорий – тема дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Процессы урбанизации в Центральной России и Сибири: сб. статей / под ред. В. А. Скубневского. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2005. 321 с.

2. Головина Е. Г., Трубина М. А. Методика расчетов биометеорологических параметров (индексов). СПб., 1997. 110 с.

3. Meshkova V. D. и др. SigmaFlow as a Tool for Studying Wind Comfort in Urban Environment // J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol. 2022. Vol. 15. N 4. P. 490–504.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ФИЗИКЕ «ИЗУЧЕНИЕ ПИННИНГА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ РАЗНОГО СОСТАВА»

А. С. Попкова

*МАОУ «Гимназия № 13 "Академ"»**
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Академгородок, 17г
popkovaanna5@gmail.com

Научный консультант: С. И. Попков, канд. физ.-мат. наук, доцент, ООО «Сибинфософт»

Вот уже многие годы человечество знакомо с эффектом сверхпроводимости. Проведено огромное количество экспериментов, разработано множество теорий и моделей, но вопрос о природе высокотемпературной сверхпроводимости пока остается открытым. Мы решили провести эксперимент по изучению пиннинга высокотемпературных сверхпроводников разного состава. Определяя силу левитации образцов с одинаковой геометрией и при равных условиях измерения, можно косвенно измерить изменения их критического тока и потенциала пиннинга, провести их качественное сравнение. Полученные данные могут быть использованы в качестве материалов для лабораторной работы по физике для учащихся 11-х специализированных классов.

Явление сверхпроводимости, представляющее собой квантовый эффект на макроскопическом уровне, наблюдаемый у многих материалов при температурах ниже некоторой критической Тс и состоит в исчезновении электрического сопротивления постоянному току и в выталкивании магнитного поля из объема проводника

При охлаждении в постоянном и не очень сильном магнитном поле, при температуре сверхпроводящего перехода магнитное поле выталкивается из объема сверхпроводника. Физически это можно объяснить тем, что по поверхности образца начинает течь незатухающий ток, магнитное поле которого полностью компенсирует внешнее магнитное поле. Плотность незатухающего тока, экранирующего внешнее магнитное поле, приблизительно экспоненциально убывает от поверхности внутрь сверхпроводника. Соответственно магнитное поле уменьшается от некоторого значения на поверхности до нуля в глубине в сверхпроводниках 1-го рода и проникает в виде абрикосовских вихрей в сверхпроводники 2-го рода.

Прогресс в области получения и исследования функциональных неорганических материалов в значительной мере связан с химическим и структурным усложнением систем на различных уровнях организации материала. Одна из основных характеристик (помимо Тс) сверхпроводящих материалов – плотность критического тока (Jc), характеризующая максимальный электрический ток, который может протекать по проводнику без рассеяния энергии. Теоретический предел плотности сверхпроводящего тока для ВТСП составляет ~108 А·см-2. В реальных материалах значения Jc гораздо меньше. Это связано с тем, что плотность критического тока зависит от силы и энергии пиннинга (закрепления) магнитных вихрей, присутствующих в сверхпроводнике второго рода. Слабый пиннинг в ВТСП приводит к быстрому падению плотности критического тока по мере увеличения напряженности магнитного поля и повышения температуры. Поэтому, чтобы создать материал с высоким значением Jc, необходимо обеспечить эффективный пиннинг магнитных вихрей и хорошие межзеренные контакты. Пиннинг магнитных вихрей осуществляется на неоднородностях, таких как точечные и протяженные дефекты кристаллической решетки, включения посторонних фаз. Усиление пиннинга может быть достигнуто при формировании микро- и нанонеоднородного материала. Энергия вихря понижается, если его нормальная (с разрушенной сверхпроводимостью) сердцевина проходит через несверхпроводящую область включения. Вихрь закрепляется на таких частицах, для его отрыва и перемещения требуется некоторая сила – сила пиннинга. Отрыв и перемещение вихря сопровождается рассеянием энергии в сверхпроводнике. Центры пиннинга в сверхпроводящем материале можно создавать разными методами. Одним из таких методов является введение микро- и нановключений посторонних несверхпроводящих фаз или создание нанонеоднородностей, отличающихся по химическому составу и свойствам от матричной фазы.

Процесс измерения силы левитации сверхпроводящего образца на установке происходил так. Сверхпроводящий образец, помещенный в пенопластовый контейнер и прижатый ко дну немагнитным грузом, заливается жидким азотом. Необходимо выждать некоторое время, пока не прекратится интенсивное кипение и образец не достигнет температуры жидкого азота – 77K. Затем контейнер со сверхпроводником помещаем на измерительную шкалу и начинаем двигать к ПМ. При приближении сверхпроводника к ПМ между ними возникают силы отталкивания, которые и измеряются с помощью весов. После достижения предельно малого расстояния между ПМ и сверхпроводником, начинаем обратный ход. При это возникает интересный эффект – захват магнитного потока сверхпроводником. ПМ притягивается к сверхпроводнику и весы показывают отрицательное значение. По мере удаления сверхпроводника вес ПМ возвращается к нулевой отметке.

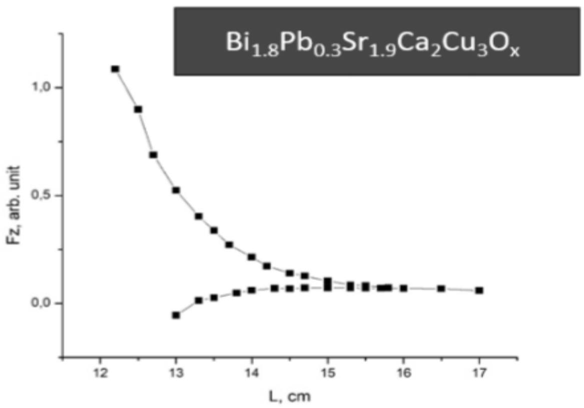


Рис. 1. Результаты измерения силы пиннинга от расстояния на образце $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$

Полученные в ходе измерения образцов: 1) $NdBa_2Cu_3O_7$; 2) $TmBa_2Cu_3O_7$; 3) $YBa_2Cu_3O_7$; 4) $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$ (рис. 1); 5) $Y_{0.39}Sm_{0.31}Ba_2Cu_3O_7$, зависимости имеют схожие черты. Так, при уменьшении расстояния между образцом и магнитной системой сила увеличивается, а при увеличении, когда магнитный поток захвачен сверхпроводником, сила становится отрицательной и уменьшается с расстоянием. Отрицательные значения показывают как раз силу закрепления магнитных вихрей на дефектах структуры образцов. Показательно, что наибольшая сила пиннинга наблюдается у чистого ВТСП на основе иттрия, затем идет ВТСП с Tm, потом ВТСП на основе Bi. ВТСП с Nd и с Sm показывают примерно одинаковый ход.

Основываясь на результатах данного исследования, можно проводить качественный анализ силы пиннинга реально полученных образцов.

Список литературы

1. Брандт Н. Б. Сверхпроводимость // СОЖ. 1996. № 1. С. 100–107.

2. Brandt E. H., Qin M. J., Li G., Liu H. K. Calculation of hysteretic force between a superconductor and magnet // Phys. Rev. 2004. 120 p.

3. Chen I. G., Hsu Jen-Chou, Janm G., Kuo C. Magnetic Levitation Force of Single Grained YBCO Materials // Chinese journal of physics. 1998. Vol. 36, N 2. P. 420–427.

4. Патент РФ 2 261 233 С1 Способ получения пористой высокотемпературной сверхпроводящей керамики на основе висмута / Петров М. И., Балаев Д. А., Шайхутдинов К. А., Попков С. И. и др.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ФИЗИКИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛЯГУШКИ И ЕЁ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Е. Е. Савкова *

Физико-математическая школа Сибирского федерального университета
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Борисова, 5
Blackbag05@mail.ru

Научный руководитель: Т. А. Попел,
Физико-математическая школа Сибирского федерального университета

В школьном курсе задач по физике в качестве физических тел в основном рассматриваются неживые организмы. В разрабатываемом сборнике будет рассматриваться живой организм – лягушка, имеющая свои особенности передвижения. Сборник задач по физике предназначен для тренировки умений в решении и рассмотрении задач с физическим телом, имеющим свои особенности. В сборнике представлены задачи, в которых рассматривается лягушка как материальная точка, а также задачи, в которых сделан упор на взаимодействие лягушек с окружающей средой. Приводится теоретическая сводка, в которой представлены основные законы, формулы и особенности лягушек, которые потребуются для решения задач.

Что такое сборник задач? Решение физических задач является одним из процессов обучения в школе. Задачи для решения выбраны из самых разных сборников, отличных друг от друга содержанием и годом редакции и издания. Также задачи были составлены только с опором на теорию, приведенную в теоретической сводке.

Сначала задачников как таковых не существовало. Были лишь пособия для решения задач по определенным разделам физики либо пособия для практических работ по физике. Пособием называют «учебно-теоретическое издание, содержащее подготовительный материал для создания учебника или материал, дополняющий уже имеющийся учебник».

Но что же такое сборник задач в настоящее время? Сборником задач считают «учебно-практическое издание, содержащее задачи и ответы к ним в объеме определенного курса (или его раздела). Может содержать также решения задач, методические рекомендации по ним или подсказки». Данное определение дает Самарский государственный социально – педагогический университет.

Как составить сборник задач? Выбрать сборники с проверенными временем задачами, имеющие регулярную редактуру. Например, сборники, авторами которых являются научные сотрудники МФТИ, МГУ, также составители сборников задач для ЕГЭ.

1. Из выбранных сборников сделать выборку прототипов задач.
2. На основе выбранных сборников составить содержание, в котором темы задач соответствуют физическому телу – лягушке.
3. Составить задачи повышенного и углубленного уровня сложности, прорешивание которых поможет укрепить знания в области школьной физики.
4. Оформить решение для каждой задачи, предложенной в сборнике.
5. Составить теоретическую сводку, которая поможет ученику в решении. В сводке представить теорию для решения задач с учетом особенностей лягушки.

С какими проблемами пришлось столкнуться в процессе создания сборника задач, и как они были решены.

1. Проблема с формулированием текста задач. Решение: просмотр видеоряда о жизни лягушек в окружающей среде, чтение статей и книг о жизни лягушки в естественной среде обитания.

2. Составление рисунков. Решение: составить схемы в тетради с подробным описанием схем для задач.

Заключение. По завершении работы сборник был представлен для ознакомления учителям физики и предложен ученикам школы ФМШ СФУ, в результате были получены отзывы о проекте. По окончании анализа отзывов были сделаны следующие выводы.

1. Что понравилось: понятные условия задач, пояснения каких-то моментов, удобные чертежи, удобство самопроверки, полезный теоретический материал.

2. С чем возникли сложности: у некоторых учеников возникли сложности при решении задач, так как часть задач из сборника предполагает решение олимпиадными методами. Кроме того, в сборнике представлены оригинальные задачи на влияние окружающей среды на лягушку, не имеющие аналогов.

3. Неоднозначные моменты: часть школьников склонилась к тому, что решение, приведённое в сборнике, недостаточно подробное, так как в процессе решения опущены некоторые математические преобразования, в то время как другая часть школьников высказалась о достаточности представленного решения.

Список литературы

1. Henry C. Astley and Thomas J. Roberts, the article: Evidence for a vertebrate catapult: elastic energy storage in the plantaris tendon during frog jumping/16 November 2011.

2. Dan A. Greenberg and Wendy J. Palen, the article: Hydrothermal physiology and climate vulnerability in amphibians/ 17 February 2021

3. Ландсберг Г. С. Элементарный учебник физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика / под ред. Г.С. Ландсберга. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 612 с.

4. Физика. Задачник-практикум для поступающих в вузы [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / В. А. Макаров, С. С. Чесноков. Эл. изд. Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf: 368 с.). М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2016. (ВМК МГУ – школе). ISBN 978-5-93208-207-2.

5. Сборник задач для подготовки к физическим олимпиадам [Электронный ресурс]: учеб. пособие / К. А. Гаврилов, А. С. Маякина; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Электрон. дан. Пермь, 2019. 461 Кб; 73 с.

СВЕРХГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ

В. В. Садовский*

Физико-математическая школа Сибирского федерального университета
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Борисова, 5
Victor.V.Sadovskiy@gmail.com

Научный руководитель: В. М. Садовский, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук,
Сибирский федеральный университет

В доступных источниках информации по сверхглубоким скважинам в качестве причины, почему в мире не существует скважин значительно глубже 12 километров, указывается высокая температура в забое (примерно 250 °С). При такой температуре происходит высыхание бурового раствора и выходит из строя электронная аппаратура, управляющая процессом бурения. В докладе рассматривается еще одна причина. Оказывается, современные высокопрочные стали, применяемые при изготовления бурильных труб в нефтегазовой промышленности, недостаточно прочны, чтобы удерживать на весу многокилометровую колонну при извлечении из скважины для замены сработанных бурильных шарошек.

Добыча углеводородных полезных ископаемых (нефти, газа и их производных), широко применяющихся практически во всех отраслях народного хозяйства, осуществляется через буровые скважины глубиной 2–3 км. Однако на Земле существует не менее десятка очень глубоких скважин, глубина которых значительно превышает глубину обычных скважин для газо- и нефтедобычи. В России наиболее известна Кольская сверхглубокая (с глубиной 12 км 262 м), пробуренная за полярным кругом, в Арктике [1, 2]. Еще две скважины в нашей стране – Сахалин-1 и Сахалин-2 являются мировыми рекордсменами, их глубины почти в полтора раза больше высоты Эвереста.

Цель работы состоит в выяснении вопросов – зачем нужны сверхглубокие скважины, с какой целью они были пробурены и почему глубина чуть более 12 км оказалась критической, т. е. почему при современном уровне развития технологии бурения нет более глубоких скважин. Ответ на эти вопросы состоит в том, что оборудование для глубинного бурения еще не достигло технического уровня, необходимого для бурения скважин, глубина которых значительно больше 12 км. Причина может быть в том, что на этой глубине достигаются очень высокие температуры, на которые не рассчитана бесперебойная работа бурового инструмента. Кроме того, происходит испарение (высыхание) раствора, который используется для снижения трения в бурильной колонне.

Задача исследования – с помощью уравнений теории упругости провести расчет механических напряжений в длинной висячей колонне, возникающих под действием собственного веса, и сравнить их с пределом прочности на разрыв для высококачественной бурильной стали. На основе проведенного расчета оценить предельную длину колонны, допускаемую условием прочности, а также рассчитать удлинение висячей колонны под действием собственного веса. Метод заключается в расчете напряженного состояния висячей колонны на основе математической модели растянутого упругого стержня. Объектом исследования является глубинное строение Земли вплоть до границы (так называемой поверхности Мохоровичича), разделяющей осадочные горные породы и мантию. Предмет исследования – специальная технология сверхглубокого бурения.

Бурение сверхглубоких преследовало, в основном, научные цели [2–4]. Чтобы достичь мантии и достать ее образцы, чтобы получить новые научные данные о глубинном строении Земли, проверить наличие углеводородов, редкоземельных металлов и других химических элементов в глубинных разрезах. Получаемые данные о глубинном строении могут изменить представления об устройстве нашей планеты, позволить по-новому взглянуть на сложные процессы, которые происходят внутри Земли. Это особенно важно для жителей Японии и Курильских островов, которые постоянно страдают от разрушительных стихийных бедствий, так как поможет более точно прогнозировать приближающиеся землетрясения, цунами и вулканические извержения. Кроме того, решение экстремальных проблем в науке и технике обычно приводит к разработке новых более прогрессивных технологий для повседневной практики. Поэтому на пути решения проблем глубинного бурения происходит совершенствование технологий добычи углеводородного сырья в нетрадиционных условиях (в береговой зоне и на шлейфе Северных морей, добычи тяжелой нефти и нефти баженовской свиты).

Гипотеза о том, что буровая колонна длиной значительно больше 12 км не может удерживаться на весу в скважине из-за предельно высоких механических напряжений в месте крепления колонны с буровым станком, обоснована приближенными расчетами по простейшим формулам теории упругости.

Рассматривается стальная колонна длиной H, свисающая в скважину. Для удержания в равновесии «хвоста колонны» длиной $H - x$ необходимо в поперечном сечении колонны S приложить силу, направленную вверх и равную весу «хвоста»: $F = \sigma S$, где $\sigma = \rho g(H - x)$ – растягивающее напряжение, ρ – плотность стали, g – ускорение свободного падения, ось x направлена вглубь Земли. Отрыв колонны в месте крепления произойдет, если $\rho g H = \sigma_s$ (σ_s – предел текучести). Из этого равенства вычисляется предельно возможная длина колонны. Рассчитан вес колонны предельной длины по формуле: $P = \rho g V$, где $V = SH$. С использованием закона Гука получено среднее значение деформации в середине буровой колонны (при $x = \frac{H}{2}$): $\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\rho g H}{2E} = \sigma_s/(2E)$. Найдено удлинение $\Delta H = \varepsilon_{\text{ср}} H$, на такую величину свободно висячая колонна растягивается за счет собственного веса. Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показали, что под действием собственного веса буровая колонна испытывает значительную деформацию, и что современные высокопрочные стали не способны выдерживать напряжение в месте крепления колонны, если ее длина значительно превышает достигнутые в настоящее время глубины при бурении известных в мире сверхглубоких скважин.

Таблица 1

Результаты расчетов

Предел текучести стали	Диаметр бурильных труб	Толщина стенки	Вес колонны	Предельная длина колонны	Средняя деформация	Удлинение колонны
σ_s = 1,1 ГПа	D = 79 мм	δ = 16 мм	P = 1964 т	H = 14284 м	$\varepsilon_{\text{ср}}$ = 0,26 %	ΔH = 37 м

Чтобы достичь бóльших глубин по сравнению с существующими самыми глубокими скважинами, необходимо использовать высокопрочные стали с более высокими пределами текучести для изготовления бурильных труб. Возможно, для этого будут разработаны композиционные материалы, легкие и не уступающие по прочностным характеристикам самым прочным сталям. Еще необходимо решить широкий круг проблем, связанных с безотказной работой механических приводов и электронной аппаратуры, управляющей буровым оборудованием в условиях повышенных температур.

Список литературы

1. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / ред. В. П. Орлов, Н. П. Лаверов. М.: Технонефтегаз, 1998. 260 с.
2. Структура, свойства, состояние пород и геодинамика в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) / ред. Ф. Ф. Горбацевича. СПб.: Наука, 2015. 366 с.
3. Super-Deep Continental Drilling and Deep Geophysical Sounding / eds. K. Fuchs, E.A. Kozlovsky, A.I. Krivtsov, M.D. Zoback. Ser.: Exploration of the Deep Continental Crust. Berlin – Heidelberg: Springer, 436 p., 1990.
4. Harms U., Tobin H. Deep Scientific Drilling. In: Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / ed. H.K. Gupta. Cham: Springer, pp. 115–127, 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ $CoFe_2O_4$ И $NiFe_2O_4$ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

С. А. Шкредов*

Физико-математическая школа Сибирского федерального университета
660074, Российская Федерация, Красноярск, ул. Борисова, 5
serpun2016@yandex.ru

Научный руководитель: О. А. Ли, канд. техн. наук,
Сибирский федеральный университет

В докладе представлены результаты исследования наночастиц феррита кобальта CoFe2O4 и феррита никеля NiFe2O4 с целью возможного применения их в магнитной гипертермической терапии. Определены средние размеры частиц: 40 нм для феррита никеля и 22,5 нм для феррита кобальта. Измерены зависимости температуры частиц от времени при поглощении энергии переменного электромагнитного поля при частоте 8,9 ГГц в приложенном перпендикулярно ему постоянном магнитном поле. Обнаружено, что наибольший нагрев частиц феррита никеля наблюдается при индукции постоянного поля B ~ 3 кГс, т. е. при резонансном поглощении энергии электромагнитного поля. Наибольший нагрев частиц феррита кобальта наблюдается в отсутствие приложенного постоянного магнитного поля.

Магнитные частицы в настоящее время представляют большей интерес в сфере медицины и биологии (например, в магнитном гипертермическом лечении). Магнитная гипертермия является перспективным методом лечении раковых заболеваний, используя эффект нагревания внешним переменным магнитным полем и рассеиванием тепла в окружающую среду. Лечебный эффект связан с тем, что опухолевые клетки более чувствительны к резким повышениям температуры, чем здоровые клетки. В данной работе рассматривается нагрев ферромагнитных наночастиц никелевого ($NiFe_2O_4$) и кобальтового ($CoFe_2O_4$) ферритов в режиме ферромагнитного резонанса в сравнении с нерезонансным поглощением энергии.

Наночастицы никелевого и кобальтового ферритов синтезированы методом химического осаждения в Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» [1].

Для практических приложений в медицине необходимо учитывать размер и форму частиц [2], поэтому в работе выполнена оценка среднего размера частиц по фотографиям, полученным на просвечивающем электронном микроскопе, и построены распределения частиц по размерам. Средний размер частиц $NiFe_2O_4$ составил 40 нм, частиц $CoFe_2O_4$ – 22,5 нм.

Для исследования изменения температуры ΔT частиц от времени в переменном магнитном поле измельченный порошок помещался в пробирке в волновод спектрометра электронного парамагнитного резонанса в пучность стоячей электромагнитной волны частотой 8,9 ГГц (диапазон сверхвысоких частот (СВЧ)). Перпендикулярно силовым линиям переменного магнитного поля прикладывалось постоянное магнитное поле различной величины B. На рис. 1 и 2 приведены результаты исследований. Для никелевого феррита (рис. 1) с ростом индукции приложенного постоянного поля увеличивается, нагрев частиц до максимального значения ΔT_{max} = 3,6 К при индукции поля B = 3,2 кГс, при дальнейшем увеличении индукции нагрев частиц уменьшается. С уменьшением амплитуды b, а значит и мощности переменного электромагнитного поля, наблюдаются меньшие температуры частиц. Максимум роста температуры в поле около 3 кГс можно объяснить тем, что вблизи этого значения индукции наблюдается резонансное поглощение электромагнитного поля при частоте 8,9 ГГц [3].

Для кобальтового феррита (рис. 2) наибольшее значение нагрева ΔT_{max} =11 К получено в отсутствие постоянного магнитного поля ($B = 0$), величина нагрева с ростом индукции постоянного магнитного поля падает. Наибольший рост температуры в отсутствие внешнего поля можно объяснить резонансным поглощением энергии переменного поля во внутреннем поле наночастиц [4].

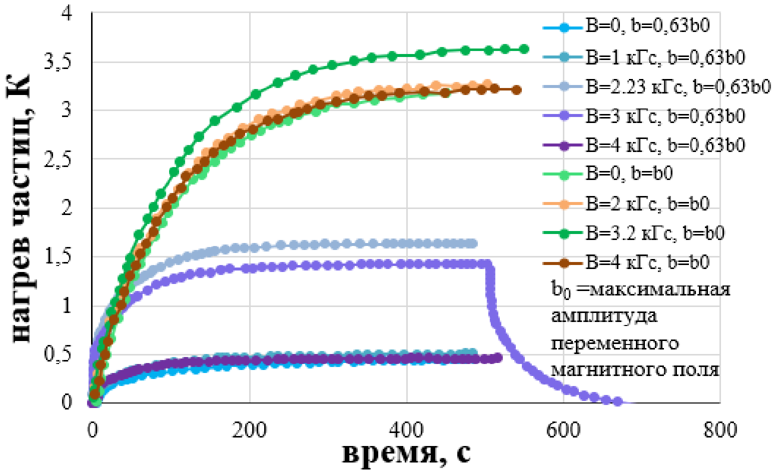


Рис. 1. График зависимости изменения температуры частиц $NiFe_2O_4$ от времени в поле СВЧ и проложенном перпендикулярно ему постоянном магнитном поле различной величины

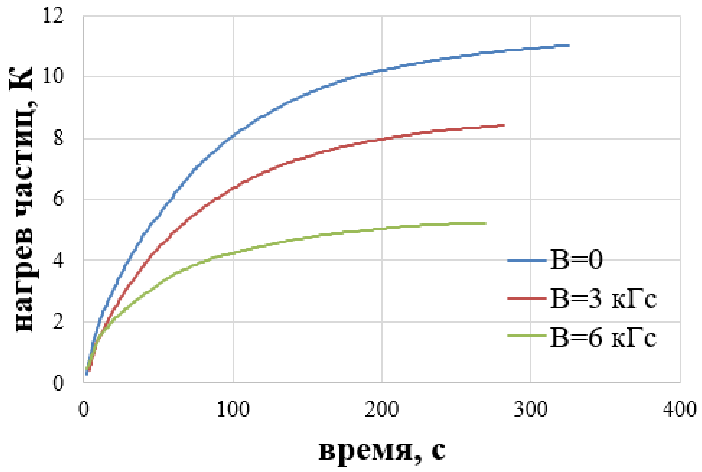


Рис. 2. График зависимости изменения температуры частиц $CoFe_2O_4$ от времени в поле СВЧ и проложенном перпендикулярно ему постоянном магнитном поле различной величины

Наблюдаемый эффект может найти практическое применение в осуществлении нагрева частиц в режиме ферромагнитного резонанса для магнитной гипертермии.

Список литературы

1. Столяр С. В., Ли О. А., Николаева Е. Д. и др. Эффективный способ магнитной гипертермии, основанный на явлении ферромагнитного резонанса // ФММ. 2023. Т. 124, № 2. С. 1–8.

2. Moghimi S. M., Hunter A. C., Murray J. C. Long-circulating and target-specific nanoparticles: theory to practice // Pharmacol Rev. 2001. Vol. 53, N 2. Pp. 283–318.

3. Lee J., Kim B., Kim Y., Kim S. Ultra-high rate of temperature increment from superparamagnetic nanoparticles for highly efficient hyperthermia // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, N 1. P. 49–69,

4. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Т. 2. М.: Мир, 1976. 504 с.