

На правах рукописи



Кузнецов Виктор Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И
МАССООБМЕНА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Дектерев Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, лаборатория моделирования процессов тепломассопереноса, исполняющий обязанности руководителя, г. Томск

Шевырёв Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра «Теплоэнергетика», доцент, г. Кемерово

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью
«ЗиО – КОТЭС», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 26 апреля 2019 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан « » февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

 О.В. Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Уголь является наиболее распространенным видом топлива. По оценкам, запасов угля в мире хватит на 200-250 лет. Электростанции на угольном топливе производят почти 40% мировой электроэнергии. Однако по данным Международного энергетического агентства (*IEA*) спрос на уголь в энергетике в последние годы падает. По прогнозам специалистов, к 2040 г. доля угля в производстве электроэнергии снизится до 31%, хотя и будет по-прежнему занимать ведущее место. Основной причиной снижения интереса к углю является тот факт, что уголь считается самым неэкологичным энергоносителем на всех технологических этапах его использования: добыча, приготовление, сжигание.

Таким образом, на энергетическом фронте всего мира возникают противоречия, где сталкиваются экономические и экологические проблемы, связанные с использованием в энергетике угля. Единственным выходом из этого противоречия является совершенствование технологии добычи и применения угля. Энергетика на данном этапе требует применения инновационных, энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий переработки угольного топлива. Основными путями обеспечения масштабного экологически чистого вовлечения угля в энергетике могут быть технологии газификации и капельно-факельного сжигания в виде водоугольной суспензии (*ВУС*), или водоугольного топлива (*ВУТ*).

Проблемами газификации угольного топлива занимались в разные периоды времени многие отечественные исследователи: Сучков С.И., Рыжков А.Ф., Ноздренко Г.В., Заворин А.С., Клер А.М., Степанов С.Г., Исламов С.Р., Тюрина Э.А., Мингалеева Г.Р., Николаев Ю.Е., и др. Исследования вышеперечисленных авторов в основном посвящены эксперименту либо моделированию на основе узконаправленных одномерных математических моделей без учета гидродинамических эффектов. На мировом уровне лидирующие позиции в разработке оригинальных технологий газификаций занимает Китай (*ESCUST, TPRI, Tsinghua* и др.).

В 1959 г. Делягин Геннадий Николаевич стал первым в СССР, кто предложил использовать водоугольную суспензию не просто для транспортировки угля, но и для его сжигания. Основной вклад в развитие технологии сжигания водоугольного топлива внесен отечественными учеными и исследователями: Делягиным Г.Н., Саломатовым В.В., Бурдуковым А.П., Овчинниковым Ю.В., Бойко А.И., Мурко В.И., Луценко С.В., Хренковой Т.М., Кузнецовым Г.В., Стрижаком П.А., Цепенком А.И., Кулагиной Т.А., Барановой М.П., Сеначин П.К., Кисляк С.М. и др., а также предприятиями и организациями: ИТ СО РАН, СибВТИ, ИГИ, НГТУ, НИ ТПУ, НоТЭП, ЗАО «Корпорация ПРОТЭН», ЗАО НПП «Сибэкотехника», НПО «Росток», ЗАО «ЗиО-КОТЭС-наука», КОМПОМАШ-ТЭК. В Европе

Австрийская компания *Effective Energy Technology GmbH (EET)* успешно построила установки для производства и сжигания водоугольного топлива.

Математическое моделирование теплоэнергетических устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об их аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене. Большое разнообразие углей и сложные химические процессы, происходящие при горении и газификации угольного топлива, не позволяют создать универсальные математические модели. Поэтому остается актуальной задача создания новых моделей отдельных физико-химических процессов, на основе существующих экспериментальных данных, и развития на их основе комплексной модели для расчета топочных камер и поточных реакторов термохимической конверсии углей, позволяющей наиболее точно описать процессы горения и газификации пылеугольного топлива в топочно-горелочных устройствах.

Целью работы является развитие методов математического моделирования процессов при газификации и горении распыленного угольного топлива. Расчетное исследование и оптимизация тепломассообмена в перспективных энергетических устройствах для газификации пылеугольного топлива и сжигания ВУТ.

Задачи работы:

1. Анализ перспективных технологий энергетического использования угольного топлива.
2. Разработка методов математического моделирования процессов газификации и горения измельченного угольного топлива для перспективных нетрадиционных схем переработки.
3. Тестирование и адаптация математической модели на задачах расчета горения пылеугольного топлива, ВУТ и газификации угольного топлива в потоке.
4. Моделирование и оптимизация процессов газификации измельченного угольного топлива в газификаторе поточного типа. Исследование влияния конструктивных и режимных параметров на состав и химический КПД генераторного газа.
5. Численное исследование процессов при сжигании ВУТ в промышленном водогрейном котле в режимах твердого и жидкого шлакоудаления. Анализ влияния температуры и расхода воздуха на режимы горения, теплообмен и величину образования выбросов *NOx*.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые разработана математическая модель и метод расчета физико-химических процессов при горении и газификации измельченного угольного топлива в потоке для перспективных нетрадиционных схем энергетического использования угля.

Впервые получены результаты численного исследования и оптимизации перспективного двухстадийного реактора конверсии твердого топлива для угольной ПГУ, основанного на технологии *EAGLE* с использованием

Кузнецкого угля, воздушного дутья, присадки водяного пара и производительностью до 1700 т/день.

Установлены зависимости процессов аэродинамики, тепло - и массопереноса, газификации угольной пыли в реакторе-газификаторе от условий подачи пылеугольного потока.

Впервые, на основе численного моделирования, исследован процесс сжигания водоугольного топлива в топке перспективного водогрейного котла малой мощности.

Определены основные параметры процесса сжигания ВУТ в топочной камере, обеспечивающие стабильность его работы и низкий уровень образования оксидов азота.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенная математическая модель пространственных двухфазных турбулентных реагирующих течений при сжигании и газификации угольного топлива может быть использована для исследования влияния режимных и конструктивных параметров на физико-химические процессы в проектируемых перспективных энергетических устройствах. Использование результатов математического моделирования позволит сократить затраты при создании энергоустановок.

Результаты численных исследований использовались в практической деятельности ЗАО «Корпорация ПРОТЭН» при расчете конструктивных изменений и способов организации топочного процесса в котле на водоугольном топливе.

Результаты исследований могут использоваться при подготовке специалистов ВУЗов энергетических и теплофизических специальностей. В настоящее время результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Тепловые электрические станции» Уральского энергетического института Уральского федерального университета и кафедре «Теплофизика» Сибирского федерального университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель и метод расчета процессов горения и газификации измельченного угольного топлива для нетрадиционных схем переработки, основанная на: *RANS* моделях турбулентности; многоступенчатых механизмах химического реагирования; моделях сложного теплообмена; Лагранжевом описании движения и реагирования частиц угля и капель ВУТ.
2. Результаты численного исследования и оптимизации двухстадийного реактора конверсии твердого топлива: увеличение α угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов приводит к повышению химического КПД с 84.7 до 86 %; увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг.пара/кг.угля приводит к увеличению химического КПД процесса газификации с 83 до 87 % и снижению температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К; снижение доли угольной пыли в нижний ярус камеры газификации с 25

до 15 % от общего количества позволяет уменьшить область высокотемпературного горения при незначительном изменении состава газов и химического КПД.

3. Результаты численного исследования процесса сжигания водоугольного топлива в топке перспективного котла. Концентрация оксидов азота в дымовых газах уменьшается на 30% при снижении средней температуры в объеме топочной камеры с 1400 до 1200°С при $\alpha=1.25$ для режима жидкого шлакоудаления и с 1200 до 1100°С при $\alpha=1.7$ для режима твердого шлакоудаления. При сжигании ВУТ концентрация NO_x уменьшается в 2.5–10 раз по сравнению с традиционным факельным способом сжигания угля. На основе результатов численного исследования определены основные параметры процесса сжигания ВУТ в топочной камере, обеспечивающие стабильность его работы.

Методы исследования. Для численного исследования физико-химических процессов при горении и газификации измельченного угольного топлива в потоке разработана трехмерная математическая модель и метод расчета, основанные на: RANS моделях турбулентности; многоступенчатых механизмах химического реагирования; моделях сложного теплообмена; Лагранжевом описании движения и реагирования частиц угля и капель ВУТ.

Достоверность результатов обеспечивается: использованием автором программных комплексов протестированных для широкого круга задач; проведением тестирования математической модели на задачах расчета горения и газификации измельченного угольного топлива в потоке; сравнением результатов расчётов с литературными экспериментальными данными и результатами испытаний действующих котлов.

Личный вклад автора заключается в верификации численных методов, проведении расчётов задач горения и газификации угольного топлива, в сравнительном анализе результатов расчета с экспериментальными данными, в расчётном исследовании при оптимизации топочных процессов, участии в анализе результатов и подготовке публикаций.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск – 2014); международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: перспектив Свободный» (Красноярск – 2015, 2016); IV Всероссийской научно-практической конференции студентов «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург – 2015); XIII научной международной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта – 2015); VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск – 2016); Всероссийской научной конференции "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами

школы молодых ученых (Ялта – 2016); XIV всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск – 2016); XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург – 2017); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск – 2017, 2018).

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 3 научных статьи в журналах из перечня ВАК, 4 статьи в журналах, цитируемых в международной базе *Scopus*, 11 работ опубликованы в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований. Материал изложен на 125 страницах, содержит 56 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая формулировка проблем энергетического использования угольного топлива. Кратко изложены энергоэффективные, ресурсосберегающие и экологически чистые технологии переработки угольного топлива. Показана актуальность задачи создания новых математических моделей отдельных физико-химических процессов, на основе существующих экспериментальных данных, и развития на их основе комплексных моделей для расчета топочных камер и поточных реакторов термохимической конверсии углей, позволяющих наиболее точно описать процессы горения и газификации измельченного угольного топлива в топочно-горелочных устройствах.

В первой главе приводится обзор исследований, относящихся к проблеме использования угольного топлива в тепловой энергетике, в частности, технологии его переработки. Рассматриваются процессы при переработке угольного топлива традиционными способами, и сравниваются с нетрадиционными. Приводится описание перспективных технологий переработки угольного топлива. Перечисляются предлагаемые в различных работах эффективные и экологически безопасные технологии переработки угольного топлива.

Обзор рынка газификационных технологий и исследований в данной области показывает, что наиболее востребованными являются поточные газификаторы, их доля составляет около 80%. Анализ используемых в новых разработках газификаторов технических решений с точки зрения эффективности и экономичности их применения в твердотопливных ПГУ с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) показал, что использование

двухстадийного принципа организации процесса конверсии топлива является перспективным направлением. Одной из основных проблем использования технологии ПГУ-ВЦГ является эффективное использование различных видов угля. Угольное топливо имеет разное соотношение содержания летучих и твердого углеродного остатка, разную температуру плавления золы. Такие технологии как ПГУ-ВЦГ в будущем будут использоваться в качестве замены старых ветхих котлов. Таким образом, угольные газификаторы должны иметь возможность работать с различными типами угля. Исследование работы газификаторов типа *EAGLE* на российских углях является актуальной задачей.

В главе отмечены экологические преимущества технологии использования ВУТ и показаны проблемы его сжигания, которые заключаются в весьма нестабильном горении в объеме топки. Поэтому существует необходимость разрабатывать особые геометрии котлов и особые расположения подачи топлива и воздуха для обеспечения циркуляции горячих горючих газов в зоне воспламенения. Одним из основных инструментов для оптимизации котлов являются численные методы, позволяющие исследовать аэродинамику, процессы тепломассообмена и горения водоугольного топлива в топочной камере.

Во второй главе излагаются математическая модель и метод расчета, используемые в работе для описания процессов в топочной камере при поточной газификации угля и горения водоугольного топлива.

В обзоре было показано, что на основе как экспериментальных, так и теоретических работ, выделяют следующие основные стадии процесса газификации (горения) угольной частицы: испарение внутренней влаги из топлива; выход и горение летучих компонентов; гетерогенные реакции (газификация и горение коксового остатка). Последняя стадия занимает наибольшее время и составляет 90-95 % от времени жизни частицы.

В общем виде для математического описания аэродинамики топочных камер можно использовать систему дифференциальных уравнений сплошной среды. Согласно современным представлениям, достаточно реалистичная картина многомерных течений жидкости или газа может быть получена на основе решения системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. В работе уравнения Рейнольдса замыкались с помощью следующих двухпараметрических моделей турбулентности: стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности, $k-\omega$ SST модели Ментера и модели Рейнольдсовых напряжений (*RSM*). Математическое описание горения и газификации пылеугольного топлива включает в себя комплекс взаимосвязанных подмоделей, описывающих перенос тепловой энергии, лучистой энергии на основе метода дискретных ординат; модель движения капель/частиц на основе подхода Лагранжа; модель испарения влаги (определяется по разности концентраций около поверхности частицы и в объеме); модели выхода летучих веществ (одностадийное и двухстадийное приближение процесса, а также модель, основанная на структурной особенности строения угольного

вещества); модель горения в газовой фазе на основе гибридного подхода, сочетающего механизмы химического реагирования и турбулентного обмена; модель реагирования коксового остатка согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории. Для описания процессов газификации в математическую модель включены реакции паровоздушной конверсии угля.

В предложенной математической модели водоугольное топливо представляется дискретным набором капель, которые подаются в топочную камеру. Эти капли состоят из комплекса уголь плюс вода (внешняя влага). На первом этапе происходит испарение внешней влаги. Изменение массы капли (внешней влаги) в процессе испарения описывается следующим уравнением:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p \left[\rho_c D_c^b Sh_c \ln(1 + B_M) \right],$$

где Sh_c - Число Шервуда, B_M – коэффициент Сполдинга для массоотдачи.

После испарения внешней влаги ВУТ остаются угольные частицы. Далее происходит выгорание обычной угольной частицы по механизму и моделям, описанным выше (испарение внутренней влаги, выход и горение газовых веществ, горение твердого углерода).

В третьей главе рассматривается тестирование математической модели и метода расчёта на основе литературных и экспериментальных данных: горение пылеугольного факела при наличии закрутки на огневом стенде мощностью 2,4 МВт, конверсия угольной пыли в газификаторе поточного типа, сжигание водоугольного топлива на огневом стенде. Приводится анализ точности метода при моделировании процессов горения и газификации угольного топлива в потоке.

При рассмотрении вихревых горелочных устройств, топочных камер и поточных реакторов термохимической конверсии углей, где возникают закрученные потоки, важен выбор модели турбулентности, которая позволила бы достаточно точно описать усредненные поля и крупномасштабные пульсации закрученных течений. Первоначальной задачей являлось исследование влияния двухпараметрических моделей турбулентности $k-\varepsilon$ и $k-\omega SST$ модели Ментера, модели переноса рейнольдсовых напряжений (RSM) на результаты моделирования аэродинамики и переноса тепла при горении закрученного пылеугольного потока в топочной камере. Исследования проводились на программном пакете *Ansys Fluent* [*ANSYS Fluent 12.0 User's Guide*, 2009.]. На рисунке 1а и 1б представлены основные результаты исследований в виде компонент скорости, где показано, что результаты расчета полученные при использовании модели рейнольдсовых напряжений (RSM), модели $k-\omega SST$ Ментера и стандартная $k-\varepsilon$ модели турбулентности незначительно отличаются друг от друга. Из рисунка 1в видно, что модель RSM дает более низкий уровень пульсаций скорости и лучше согласуется с экспериментальными данными.

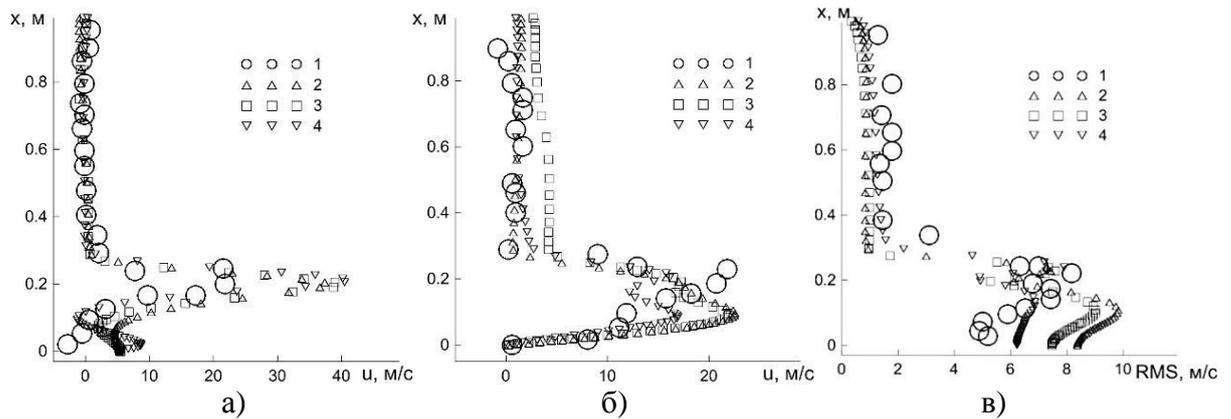


Рисунок 1 – Распределение характеристик потока в сечении $z = 0.25$ м: а) аксиальная компонента скорости, б) тангенциальная компонента скорости, в) пульсационная составляющая скорости. Эксперимент (1), $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

Так как модель выхода летучих веществ играет основную роль для правильной оценки процесса воспламенения угольной частицы, следующим этапом работы было тестирование наиболее широко используемых моделей выхода летучих веществ (одностадийное и двухстадийное приближение процесса, а также модель, основанная на структурной особенности строения угольного вещества). Сравнительный анализ влияния моделей выхода летучих веществ на процессы воспламенения и горения пылеугольного топлива в топочной камере с вихревой горелкой показал, что выбор данных моделей и эффективных кинетических констант может оказать существенное влияние на результаты расчетов.

Тестирование математической модели газификации пылеугольного потока было проведено на задаче моделирования угольного газогенератора поточного типа. Камера газификации имеет длину 180 см и внутренний диаметр 20 см, пылеугольное топливо подается в камеру газификации вместе со смесью газов (кислород, аргон и водяной пар) через центральный канал горелочного устройства. Вторичный поток, представляющий собой водяной пар, подается по кольцевому каналу. Задача решалась на программном пакете Ansys Fluent. Хорошее совпадение результатов расчета процесса газификации в поточном реакторе с результатами экспериментальных данных (рисунок 2,3) подтвердило корректность используемой модели газификации пылеугольного потока.

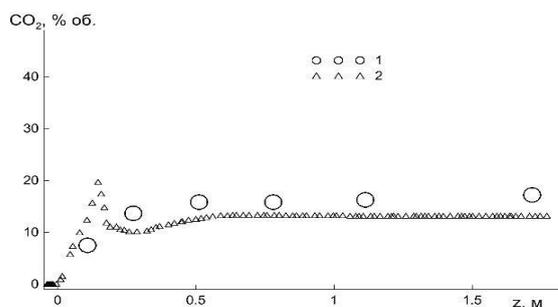


Рисунок 2 – Распределение оксида углерода по оси камеры газификации. Эксперимент (1), расчет (2).

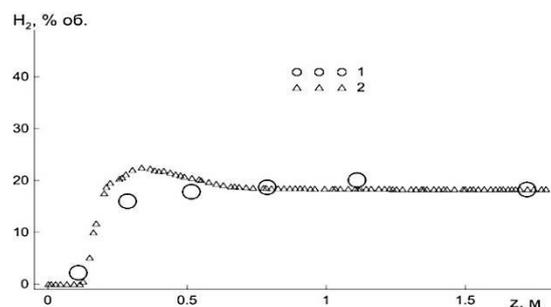


Рисунок 3 – Распределение водорода по оси камеры газификации. Эксперимент (1), расчет (2).

Для тестирования математической модели горения водоугольного топлива был выбран огневой стенд СибВТИ. К основным элементам огневого стенда относится вертикальная топочная камера диаметром 0,4 м и длиной 6 м. Испытания сжигания водоугольного топлива проводились на стендовой установке в условиях близких к адиабатическим. Результаты расчетов получены с использованием специализированной программы «*SigmaFlame*». Сравнение результатов моделирования процесса сжигания ВУТ Иршабородинского угля на огневом стенде с экспериментальными данными показало удовлетворительное совпадение (рисунок 4, 5).

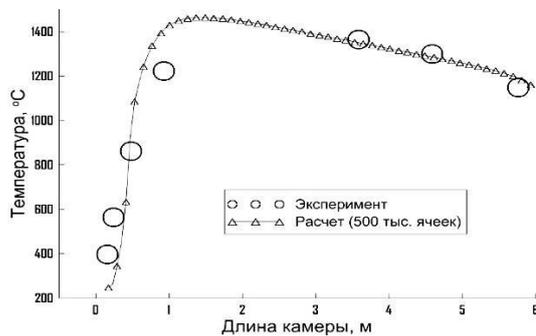


Рисунок 4 – Распределение температуры газов по оси камеры

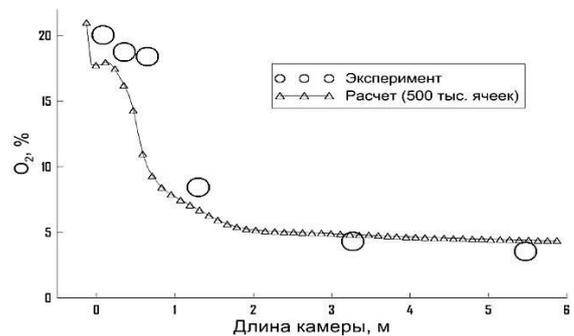


Рисунок 5 – Распределение объемной концентрации кислорода по оси камеры

Приведенные результаты тестирования математической модели и метода расчета показывают их пригодность для моделирования процессов горения и газификации угольного топлива при нетрадиционных способах переработки угля.

В четвертой главе приводятся результаты численного моделирования процессов горения и газификации угольного топлива при нетрадиционных способах переработки угля. Показаны пути усовершенствования перспективного поточного газогенератора, работающего на Кузнецком угле. Показаны результаты моделирования сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением. Представлено исследование влияния режимных параметров на процесс образования оксидов азота при сжигании ВУТ в топке котла.

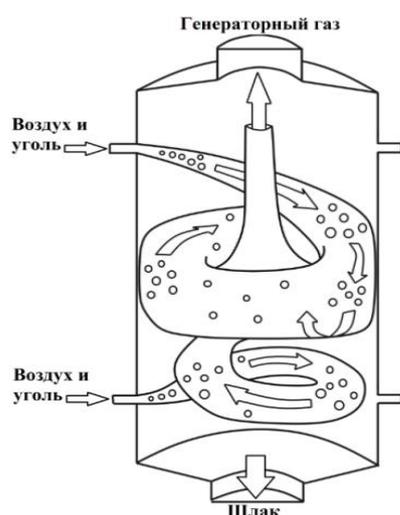


Рисунок 6 – Схема работы газификатора EAGLE

Модернизация двухстадийных газогенераторов направлена на повышение эффективности путем создания активных гидродинамических режимов с разделением сред и сочетанием спутно-реверсивных вихревых структур, что позволяет поднять градиенты температур, концентраций, давлений, интенсифицировать процессы теплообмена, минимизировать застойные зоны, повысить в целом удельные показатели работы реактора. Одним из примеров таких газификаторов является двухстадийный газификатор *EAGLE (Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity)* (рисунок 6).

Основные изменения, которые предлагается внести в технологию газификации *EAGLE*, это: использование Кузнецкого угля, воздушная двухстадийная газификация с присадкой водяного пара, увеличенная производительность по топливу – 1700 т/день. Предложены размеры реакторной зоны, которые составляют 9 (м) высота и 6 (м) диаметр. В таблице 1 представлены расходные характеристики. Расход воздуха для газификации был выбран исходя из предельного избытка воздуха 0.32. Задача решается в трёхмерной постановке. Расчетная сетка составляла 1,5 млн. ячеек со сгущением в области расположения горелок. Исследования проводились на программном пакете *Ansys Fluent*.

Таблица 1 – Расходные характеристики газификатора

	Нижний уровень	Верхний уровень
Расход угля, кг/с	4,92	14,76
Расход дутья, кг/с	30,38 (25% – O ₂)	12,76 (17% – O ₂ , 21% – H ₂ O)
Расход азота, кг/с	0,98	2,95
Температура дутья, °С	830	900 °С
Расход пара, кг/с	0	2,7 (0,137 кг пара/кг угля)

Для сравнительного анализа было рассмотрено влияние угла поворота верхних горелок в горизонтальной и вертикальной плоскости на тепло- и массообменные процессы в камере, а также на состав газов на выходе. Показано, что увеличение угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов приводит к повышению скорости нисходящих потоков газа вдоль стенок с 8 до 14 м/с (рисунок 7), что приводит к интенсификации процесса газификации. А различие в скорости восходящего или нисходящего потока приводит к различию в формировании высокотемпературной области в камере газификации.

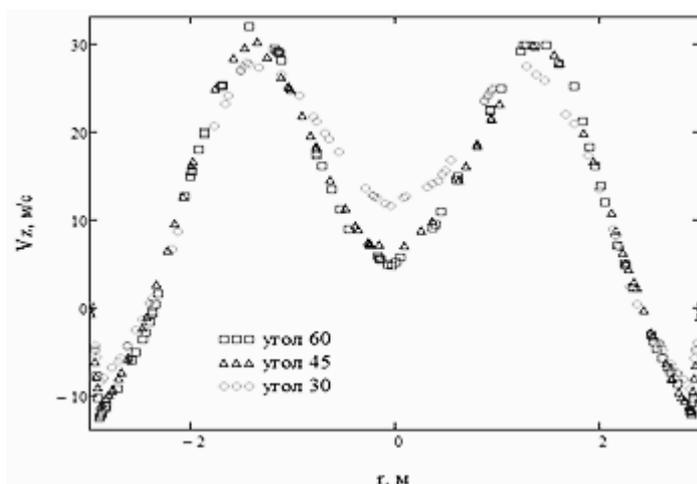


Рисунок 7 – Распределение аксиальной скорости в поперечном сечении газификатора на высоте от низа камеры 2.5 м.

приводит к изменению состава генераторного газа на выходе из камеры газификации – уменьшению доли CO и увеличению доли H₂. С увеличением доли H₂ растет химический КПД процесса до 87 % при расходе пара 9.8 кг/с.

Далее были проведены расчетные исследования влияния присадки водяного пара на процесс газификации угольной пыли. Как и в выше рассмотренных вариантах, пар подавался в верхние горелки с температурой 900°C. Расход пара варьировался от 0 до 9.8 кг/с. В таблице 2 приведены результаты моделирования, из которых следует, что увеличение количества горячего водяного пара

Таблица 2 – Состав генераторного газа

Расход водяного пара, кг/с	Хим. КПД η_x	CO+H ₂ +CH ₄ , об %	Расход генераторного газа, кг/с	t_p'' , K
9.8	87 %	20.73+20+0.9	69.74	1343
5.4	86 %	25.7+19.3+1.4	65.3	1372
2.7	86 %	28.5+16.6+2.3	62.65	1382
1.8	85%	29.8+16+2.3	61.7	1386
0.9	85 %	31.1+14.6+2.65	60.8	1398
0	83	31.5+13.8+2.8	59.9	1414

Были проведены исследования влияния перераспределения количества угольной пыли, подаваемой через нижний и верхний ярусы горелок, на

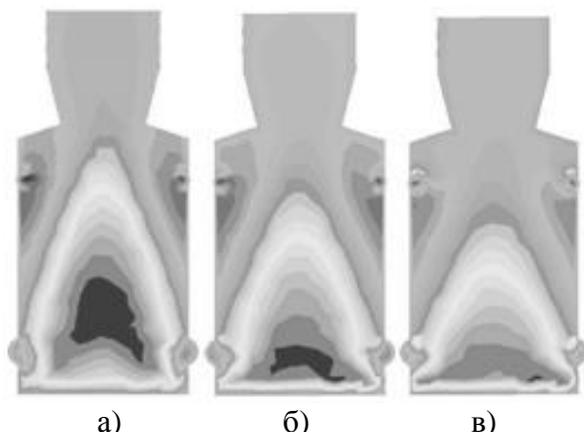


Рисунок 8 – Распределение температур в центральном сечении, K: а) 25 % нижний ярус; б) 20 % нижний ярус в) 15 % нижний ярус

процессы аэродинамики, тепло- и массопереноса, а также процесса газификации угольной пыли. На рисунке 8 представлено распределение температур в центральном сечении камеры при разном соотношении угля, подаваемого в ярусы горелок. Из рисунка видно, что уменьшение доли количества подаваемой угольной пыли в нижний ярус приводит к изменению границ высокотемпературной области горения. Наблюдается расширение

данной области в нижней части камеры и снижение ее высоты. Температура на выходе из камеры падает с 1382 К до 1332 К, изменение состава газов и химического КПД при этом незначительно.

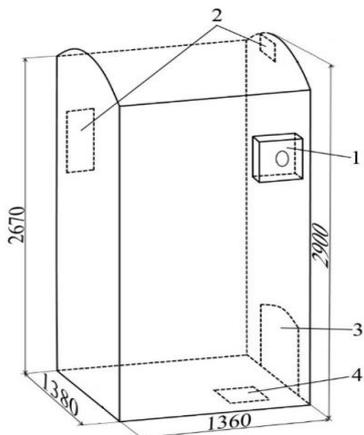


Рисунок 9 – Схема топки котла (размеры в мм). 1 – короб форсунки; 2 – окна для подачи воздуха; 3 – вывод дымовых газов; 4 –летка ШЗУ

Для численного исследования процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревом потоке был выбран действующий водогрейный котел с номинальной мощностью 1 МВт, разработанный ИТ СО РАН совместно с ЗАО «Корпорация ПРОТЭН», расположенный в Березовском городском округе Кемеровской области в поселке станции Барзас. Схема котла представлена на рисунке 9. Для обеспечения высоких экономических характеристик работы котла в его конструкции предусмотрено наличие воздухоподогревателя и системы жидкого шлакоудаления. Топливо в топку подается пневматической форсункой (поз. 1, рисунок 9), имеющей хорошие показатели эффективности и

надежности в работе. В топке имеются два окна для подачи дутьевого воздуха (поз. 2, рисунок 9), которые обеспечивают вихревое движение потока смеси топливо-окислитель и позволяют интенсифицировать тепло-массообменные процессы горения.

Для приготовления ВУТ использовались отходы (угольный кек) (таблица 3) обогатительной фабрики ОФ «Северная» (Кемеровская область, Россия), представляющие собой смесь угля марки «К» и воды с массовым соотношением 50/50.

Таблица 3 – Результаты технического и элементного анализа кека

Технический состав					
Топливо	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, ккал/кг	Q^r , ккал/кг
Кек «К», состав №1	50,86	22,41	28,86	6439	2778
Элементный состав					
Топливо	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	
Кек «К», состав №1	83.62	4.397	0.01	0.522	

Воздух подавался в топку через два дутьевых окна с одинаковым расходом. В работе исследовалось влияние количества и температуры подаваемого воздуха на процессы в топочной камере при сжигании водоугольного топлива. За основу взяли два основных режима работы котла, по которым имеются экспериментальные данные, – это режим твердого шлакоудаления (вариант №2: расход ВУТ 0,097 кг/с; коэф. избытка воздуха 1,7 (α), температура вторичного дутья 280 °С) и жидкого (вариант №2: расход

ВУТ 0,12 кг/с; коэф. избытка воздуха 1,25 (α), температура вторичного дутья 280 °С).

Для решения задачи использовался программный комплекс «*SigmaFlame*». Пространственная расчетная сетка составляла 864 тыс. ячеек, в области форсунки сетка строилась более дробной для того чтобы более детально описать процесс распыливания водоугольного топлива.

Для определения режима шлакоудаления в котле, по данным химического анализа зольного остатка, был представлен коэффициент плавления золы K_{pl} , который характеризует интегральную температуру плавления минеральных компонентов топлива. Кек, применяемый в качестве основного компонента ВУТ, имеет коэффициент плавления $K_{pl}=5,85$. Из этого следует, что температура начала жидкоплавкого состояния для минеральной части используемого ВУТ находится в пределах 1320–1350 °С. Таким образом, режим жидкого шлакоудаления возможен при температурах в топке выше 1330°С.

На рисунке 10 представлены результаты расчета в виде поля температур в центральном сечении топочной камеры, при разных режимах работы котла на водоугольном топливе. Можно видеть, что для режима твердого шлакоудаления (2-ой вариант) практически во всем объеме топочной камеры температура не превышает 1200°С. Для 7-го варианта в средней и нижней областях котла температура выше 1350°С и достигает 1450°С, что соответствует режиму жидкого шлакоудаления.

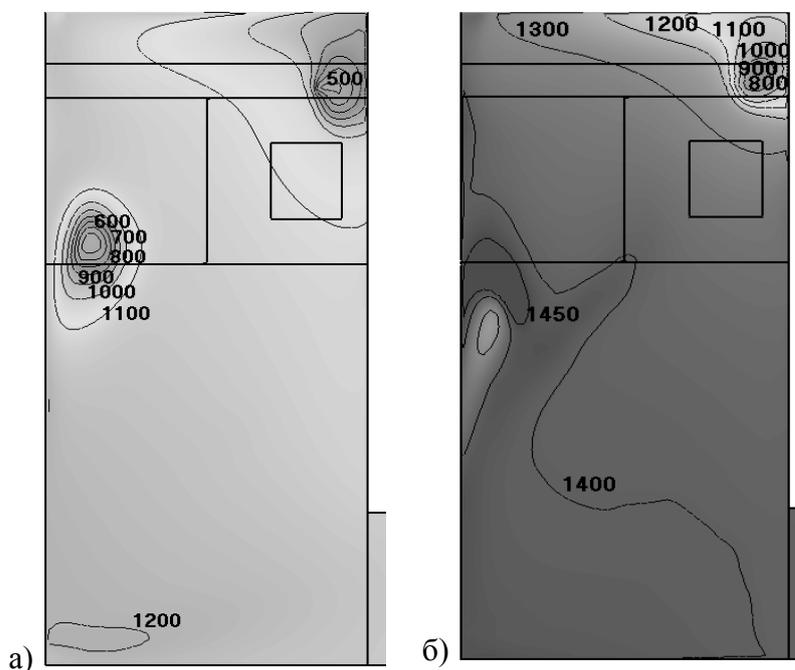


Рисунок 10 – Поле температуры (°С): а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунке 11 для режима твердого шлакоудаления (2-ой вариант) представлены графики распределения температуры вдоль котла на разном удалении от боковой стенки, $X = 0.0$ соответствует сечению в центре камеры, $X = 0.9$ расположено вблизи стенки. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с

экспериментальными данными.

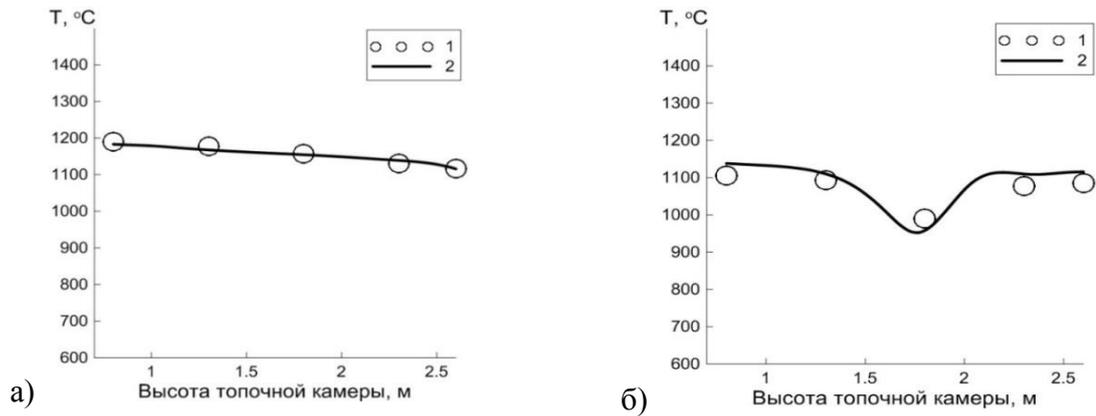


Рисунок 11 – Распределение температуры в топке котла: а) $X = 0.0$, б) $X = 0.9$. Эксперимент (1), расчет (2).

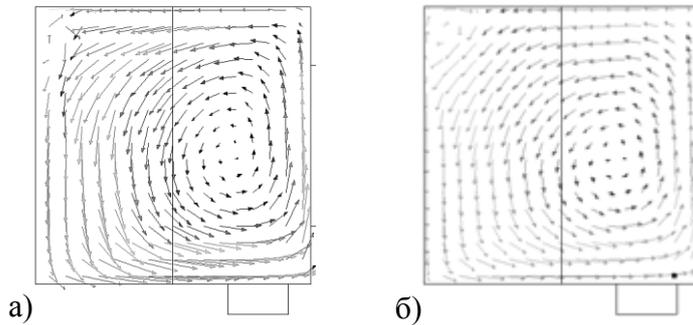


Рисунок 12 – Векторное поле скорости (м/с) в сечениях на высоте $z = 1.8$ м топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунке 12 показаны векторные поля скорости в поперечном сечении топочной камеры, для разных вариантов работы котла. Можно видеть, что образуется горизонтальное циркуляционное движение горючих газов. За счет вихревой структуры потока обеспечивается стабильное

воспламенение и горение органической массы водоугольного топлива, так как увеличивается время нахождения угольных частиц в объеме топочной камеры, что обеспечивает более полное выгорание. Данное течение соответствует обоим режимам горения водогрейного котла.

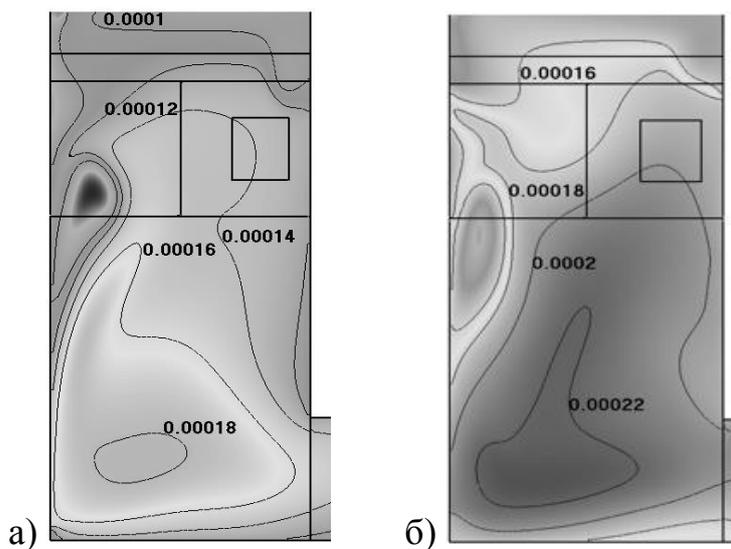


Рисунок 13 – Поле распределения концентрации NO (кг/кг) в центральном сечении топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунке 13 показаны концентрации оксидов азота в центральном сечении топочной камеры для двух режимов работы котла на водоугольном топливе. Как известно, термический оксид азота появляется в заметных количествах лишь при температуре в топочной камере равной $1300^{\circ}C$. В связи с этим, сравнивая два режима сжигания, мы наблюдаем высокие концентрации NO для режима жидкого

шлакоудаления (вариант 7) в сравнении с вариантом 2. Вклад термических оксидов для твердого режима шлакоудаления незначительный, т.к. температура в котле в среднем не превышает 1200°C . Топливные оксиды азота появляются на начальном участке факела в период реакций превращений азотосодержащих летучих веществ при температуре более $650-750^{\circ}\text{C}$, а при температуре $1200-1400^{\circ}\text{C}$ их концентрация достигает максимального значения. Для обоих режимов работы котла вклад промотированных NO незначителен, так как температура в топочной камере не превышает 1500°C . Таким образом видно, что при повышении средней температуры газов с 1150 до 1400°C в топке котла происходит рост концентрации оксидов азота в основном за счет термического механизма образования NO_x .

Предложенная математическая модель и численный метод расчета горения водоугольного топлива позволяют определять основные параметры процессов, протекающих в топочной камере, с достаточной для инженерных целей точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данная работа посвящена численному исследованию физико-химических процессов при нетрадиционных способах переработки угольного топлива. Такое исследование, в дополнение к экспериментальным данным, позволяет получить большой объем детальной информации об аэродинамике, локальном и суммарном тепломассообмене, лучше понять топочные процессы и, соответственно, разработать способы оптимизации топочных устройств с целью увеличения эффективности и снижения вредных выбросов. Для численного моделирования были проведены апробация и верификация методов моделирования процессов горения и газификации угольного топлива в пространственных постановках и их адаптация к задачам моделирования.
2. Было проведено сопоставление различных моделей турбулентности для задачи горения угольной пыли в закрученном потоке. Как показали исследования, все модели турбулентности (стандартной $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST Ментера, RSM) дают схожие результаты основных параметров. Но при расчете пульсационной составляющей скорости модель RSM дает более низкий уровень пульсаций и лучше согласуется с экспериментальными данными. Это, в первую очередь, сказывается на расчете скорости горения летучих веществ, где используются турбулентные характеристики потока. Также при использовании модели RSM значения концентрации оксидов азота значительно ниже, чем при использовании двухпараметрических моделей турбулентности, и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Это объясняется разными значениями пульсаций как для скорости, так и для температуры. Скорость реакции образования топливных NO экспоненциально зависит от температуры.

3. По результатам тестирования комплексной математической модели процессов гидродинамики, тепломассообмена и кинетики термохимических превращений топлива при горении и газификации угля показано, что выбранная модель, основанная на *RANS* подходе, удовлетворительно описывает основные параметры процесса газификации.
4. Анализ результатов моделирования газификации угольного топлива показывает зависимость физико-химических процессов от аэродинамики. Установлена взаимосвязь между направлением подачи пылеугольного потока верхнего яруса поточного двухстадийного газификатора с аэродинамикой, тепло- и массопереносом, процессом газификации угольной пыли в камере газификации. Выявлено, что увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг пара на кг угля с температурой 1173 К приводит к увеличению химического КПД процесса газификации с 83 до 87 %, при снижении температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К при коэффициенте избытка воздуха 0.32.
5. Для топки действующего водогрейного котла показана возможность стабильной работы на ВУТ. Исследования влияния режимных параметров на работу котла показали, что концентрация оксидов азота в дымовых газах уменьшается на 30% при снижении средней температуры в объеме топочной камеры с 1400 до 1200°C ($\alpha=1.25$). При $\alpha=1.7$ снижение средней температуры с 1200 до 1100°C позволяет сократить концентрацию оксидов азота примерно на 32 %.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Бурдуков, А.П. Расчетное исследование 2-х ступенчатого безмазутного горелочного устройства на основе угля микропомола / А.П. Бурдуков, О.Л. Магдеева, **В.А. Кузнецов**, М.Ю. Чернецкий // Ползуновский вестник. – 2015. – Т.1, № 4. – С. 162-167.
2. Чернецкий, М.Ю. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока / М.Ю. Чернецкий, **В.А. Кузнецов**, А.А. Дектерев, Н.А. Абаймов, А.Ф. Рыжков // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т.23, №4. – С. 615-626.
3. **Кузнецов, В.А.** Расчетное исследование влияния моделей выхода летучих веществ на процессы горения пылеугольного топлива при закрутке поток / В.А. Кузнецов, А.А. Дектерев, А.В. Сентябов, М.Ю. Чернецкий // Журнал сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – Т.9, №1. – С. 15-23.

Публикации в рецензируемых журналах:

4. **Kuznetsov V.** Comparative analysis of the influence of turbulence models on the description of the nitrogen oxides formation during the combustion of swirling pulverized coal flow / V. Kuznetsov, N. Chernetskaya, M. Chernetskiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754. – DOI:10.1088/1742-6596/754/11/112006.
5. **Kuznetsov V.** Study of the two-stage gasification process of pulverized coal at the hydrodynamic flow separation / V. Kuznetsov, M. Chernetskiy, A. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754. – DOI:10.1088/1742-6596/754/11/112007.

6. **Kuznetsov V.** Study of the two-stage gasification process of pulverized coal with a combined countercurrent and concurrent flow system / V. Kuznetsov, M. Chernetskiy, N. Abaimov, A. Ryzhkov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – DOI: 10.1051/mateconf/201711503008.
7. **Kuznetsov V.** Numerical investigation of the influence of operating conditions on the formation of nitrogen oxides in the combustion chamber of a low-power boiler during the combustion of coal-water fuel / V. Kuznetsov, L. Maltsev, A. Dekterev, M. Chernetskiy, // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. Vol. 1105. – DOI:10.1088/1742-6596/1105/1/012042.

Монографии:

8. Рыжков, А.Ф. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля: монография / А.Ф. Рыжков, **В.А. Кузнецов** (гл. 6). – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2016. – 564 с.

Другие публикации:

9. **Кузнецов, В.А.** Расчетное исследование процессов тепломассобмена и горения пылеугольного топлива в топочной камере с вихровой горелкой на основе RANS подхода / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий // Молодежь и наука: проспект Свободный: мат-лы междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. (Красноярск, 15-25 апреля 2015г.). – Красноярск, 2015. – С.35-38.
10. **Кузнецов, В.А.** Исследование влияния моделей турбулентности на результаты моделирования процессов тепломассопереноса и горения угольной пыли в закрученном потоке / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докладов IV Всерос. науч.-практ. конф. студентов. (Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.). – Екатеринбург, 2015. – С.62-67.
11. **Кузнецов, В.А.** Исследование влияния моделей турбулентности и выхода летучих веществ на процессы воспламенения и горения пылеугольного топлива / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий, А.А. Дектерев // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: мат-лы XIII науч. междунар. конф. (Алушта, 21-27 сентября 2015 г.). – Алушта, 2015. – С.149-152.
12. **Кузнецов, В.А.** Исследование процесса газификации пылеугольного топлива в газификаторе EAGLE / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий // Молодежь и наука: проспект Свободный: мат-лы междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. (Красноярск, 15-22 апреля 2016 г.). – Красноярск, 2016.
13. **Кузнецов, В.А.** Исследование процесса двухстадийной газификации пылеугольного топлива при гидродинамическом разделении потоков / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий, А.Ф. Рыжков // Теплофизика и физическая гидродинамика: тез. докладов всерос. науч. конф. (Ялта 19-25 сентября 2016 г.). – Ялта, 2016. – С.66.
14. **Кузнецов, В.А.** Численное исследование сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий, Л.И. Мальцев // Теплофизические основы энергетических технологий: мат-лы VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием. (Томск, 26-28 октября 2016 г.). – Томск, 2016.
15. **Кузнецов, В.А.** Оптимизация сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением с использованием численного моделирования / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий, Л.И. Мальцев // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: мат-лы XIV Всерос. школы-конф. молодых ученых с междунар. участием. (Новосибирск, 22-25 ноября 2016 г.). – Новосибирск, 2016.
16. **Кузнецов, В.А.** Численное исследование процессов тепломассообмена при горении пылеугольного топлива в топочной камере с вихревой горелкой на основе вихреразрешающих методов моделирования турбулентности / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: тез. докладов XXI Школы-семинар молодых ученых и специалистов под

руководством академика РАН А.И. Леонтьева. (Санкт-Петербург, 22-26 мая 2017 г.). – Санкт-Петербург, 2017. – С.36-37.

17. **Кузнецов, В.А.** Исследование процесса двухстадийной газификации пылеугольного топлива с комбинированной противоточно-прямоточной схемой / В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий, А.Ф. Рыжков // XXXIII Сибирский теплофизический семинар: сб. мат-лов Всерос. конф. с элементами научной школы для молодых ученых. (Новосибирск, 6-8 июня 2017 г.). – Новосибирск, 2017. – С.123.
18. **Кузнецов, В.А.** Численное исследование влияния режимных параметров на образование NOx в топочной камере котла малой мощности при сжигании водоугольного топлива / В.А. Кузнецов, Л.И. Мальцев, А.А. Дектерев, М.Ю. Чернецкий // XXXIV Сибирского теплофизического семинара: тез. докладов всерос. конф. (Новосибирск, 27-30 августа 2018 г.). – Новосибирск, 2018. – С.76.

Подписано в печать 15.02.2019. Печать плоская
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,25
Тираж 100 экз. Заказ № 7765

Отпечатано в Библиотечно-издательском комплексе
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kra.ru