

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Воронцова Елена Сергеевна

**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ УГЛЯ ТАЛОВСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ В ТОПКАХ КОТЛОВ  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Заворин Александр Сергеевич**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой –  
руководитель научно-образовательного центра  
И.Н. Бутакова на правах кафедры Инженерной  
школы энергетики, ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский политехнический  
университет»

**Официальные оппоненты:**

**Богомолов Александр Романович**

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический университет имени  
Т.Ф. Горбачева»

**Тугов Андрей Николаевич**

д.т.н., заведующий отделением парогенераторов и  
топочных устройств, ОАО «Всероссийский дважды  
ордена Трудового Красного Знамени  
теплотехнический научно-исследовательский  
институт» (ОАО «ВТИ»)

Защита состоится 21 июня 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.20 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, Россия, г. Томск, ул. Усова 7, уч. корпус № 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС. ТПУ.20  
кандидат физико-математических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ольга'.

Высокоморная  
Ольга  
Валерьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Принцип равномерного использования всех освоенных видов энергии и топлива не подтверждает свою состоятельность поскольку нетрадиционная энергетика не способна в полной мере удовлетворять потребности производства с его мощностью и требуемыми ресурсами. При 20%-ой доле атомной энергетики в мире (в целом) и в РФ в общем производстве электричества энергоблоки АЭС могут работать только на определенной, установленной проектом, мощности. Для обеспечения маневренности энергосистемы в случаях колебаний потребления электроэнергии, как правило, используются мощности тепловых электростанций (ТЭС). Таким образом, традиционная энергетика с ее энергетическими машинами выполняет основную роль в экономике практически любой страны. Так, общая доля тепловых электростанций в установленной мощности ЕЭС России на 01.02.2022 г. составила 66,14%, из них на угле – 16,07 %.

Дальнейшее развитие угольной генерации в России зависит от таких факторов, как: стоимость электроэнергии, произведенной с помощью угля и с помощью других источников энергии; влияние на окружающую среду; энергетическая безопасность – надежное и бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией; региональное экономическое развитие – с учетом влияния на смежные сферы деятельности; уровень состояния и развития технологий; отношение населения. А в числе приоритетных задач Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года наряду с достижением показателей экологичности определено рациональное использование местных топливно-энергетических ресурсов.

Томская область имеет свои особенности. С одной стороны, обширное по номенклатуре разнообразие топливно-энергетических ресурсов, способное удовлетворить нужды большой и промышленной энергетике, муниципальных и частных хозяйств, коммунально-бытового и агропромышленного комплексов. С другой стороны, низкая вовлеченность этих местных ресурсов в реальное использование и доминирование внешних источников энергоресурсов, которые являются проблемными факторами при рациональном формировании топливно-энергетического баланса.

С учетом вышеотмеченного, а также с точки зрения технической готовности теплоэнергетических объектов региона, а в дальнейшем и поддержания маневренности по условиям потребляемого топлива целесообразно рассматривать бурый уголь в качестве альтернативного топлива для обеспечения региональной энергетической безопасности. Одним из значимых проявлений бурого угля Томской области является Таловское месторождение, расположенное в густонаселенной части области

в 25 км от административного центра и в 10–15 км от других крупных потенциальных потребителей.

В настоящее время отсутствуют в полном объеме необходимые данные об условиях и параметрах процессов сжигания данного угля применительно к действующим в регионе энергетическим установкам, о возможных ограничениях в их работе, обусловленных качественными характеристиками топлива.

Изложенное выше свидетельствует об актуальности исследования аспектов использования угля Таловского месторождения как местного топлива с учетом его состояния перед сжиганием и возможностей действующего энергетического оборудования. Актуальность тематической направленности исследований подтверждается её соответствием приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (п.8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и критическим технологиям Российской Федерации (п. 27 «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе»).

**Цель диссертационной работы** – обоснование выбора наиболее эффективного способа вовлечения в энергетическое использование таловского угля как местного топлива с учетом вариантов предварительной подготовки.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ работ по исследованиям угля Таловского месторождения и по энергетическому сжиганию подобных топлив;
2. Провести численные исследования сжигания таловского угля в топочной камере пылеугольного котла исходя из условий его использования как местного топлива;
3. Дать оценку влияния параметров топлива на процессы, протекающие в топочной камере пылеугольного котла;
4. Провести сравнительную оценку технологических вариантов сжигания топлива применительно к топочным процессам исходя из минимизации затрат на реконструкцию;
5. Предложить рекомендации по использованию таловского угля в качестве энергетического топлива.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в части пункта 2 – «Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом

цикле производства электрической и тепловой энергии» и в части пункта 3 – «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок».

#### **Научная новизна:**

1. Впервые получены параметры процессов факельного сжигания таловского угля в широком диапазоне его теплотехнических характеристик и соотношений в составе топливных смесей.

2. Получены новые данные по качественным характеристикам таловского угля, допустимым по условиям топочных процессов в камерных топках с твердым шлакоудалением.

3. Получены новые данные, позволяющие рекомендовать долю таловского угля и его полукокса в смеси с кузнецким углем марки Д.

4. Выявлены прогнозируемые особенности формирования вредных выбросов с дымовыми газами при использовании таловского угля в исходном виде и в составе топливных композиций.

#### **Практическая значимость.**

Выполненные исследования дополняют информационную базу данных, необходимых для разработки проектных решений по использованию угля Таловского месторождения и подобных ему местных углей в энергетике.

Результаты численного моделирования топочных процессов котлов БКЗ-220-100-4 и БКЗ-210-140Ф могут быть использованы при наладке и управлении режимами работы котла с твердым шлакоудалением при сжигании таловского угля.

Установлены ограничения по условиям работы топочного устройства и возможного превышения нормативов вредных выбросов для всех технологических вариантов подготовки топлива.

Предложены рекомендации по использованию таловского угля в энергетической сфере региона, включая как объекты централизованной электро- и теплогенерации, так и источники распределённого теплоснабжения.

Методические подходы, примененные в исследованиях, используются в учебном процессе по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете (лабораторный практикум по дисциплине «Современные проблемы науки и производства в энергетическом машиностроении» и выполнение

выпускных квалификационных работ).

**Связь работы с научными программами и грантами.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-38-00775 «Исследование и совершенствование схем сжигания полидисперсных твердых топлив с наличием закрученных соосных двухфазных потоков» и проекта Национального исследовательского Томского политехнического университета № ПИШ-НИР-2023-011 «Комплексное развитие энергетических систем и технологий распределенной энергетики».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного моделирования топочных процессов котла Томской ГРЭС-2 при использовании угля Таловского месторождения в диапазоне влажности исходного рабочего состояния угля от 20 % до 50 % и его доли от 0,1 до 0,9 в составе выбранных к исследованию топливных смесей.

2. Прогнозная оценка выбросов с дымовыми газами оксидов азота, твердых частиц и оксида серы применительно к исследованным вариантам использования таловского угля.

3. Рекомендации по использованию таловского угля в условиях его использования в регионе как местного топлива: с ограничением по балластным составляющим в исходном виде и в доле до 0,3 в составе топливных композиций.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованностью с экспериментальными данными других авторов, а также с результатами расчетов, выполненных по нормативному методу теплового расчета котлов.

**Личный вклад** состоит в подготовке, планировании, проведении вычислительных экспериментов и расчетов, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, написании статей, подготовке докладов и выступлении на конференциях, формулировке защищаемых положений и выводов.

В постановке задачи исследований, обсуждении методики исследований и полученных результатов участвовал научный руководитель д.т.н. Заворин А.С., а также к.т.н. Гиль А.В. в вопросах методического обеспечения численных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях:

1. XIV Международный студенческий научно-технический семинар «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2012 г.);

2. XVIII Всероссийская научно-техническая конференция

«Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2012 г.);

3. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (г. Томск, 2014 г.);

4. III Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2015 г.);

5. XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2015 г.);

6. Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2015 г. и 2018 г.);

7. Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.);

8. XI Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2016 г.);

9. XI Международный форум по стратегическим технологиям IFOST (г. Новосибирск, 2016 г.);

10. Международная научно-техническая конференция «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (г. Москва, 2016 г.);

11. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г. Томск, 2018 г.);

12. Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.);

13. Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2021 г.);

14. Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию юбилею института Энергомашиностроения и механики МЭИ (г. Москва, 2023 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, в том числе 4 статьи в журналах, индексируемых базами данных Scopus, WoS и рекомендованных ВАК РФ: Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 15 работ в материалах конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, семи приложений и списка литературы, включающего 169 наименований. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 10 таблиц в основной части, 83 рисунка и 1 таблицу в приложениях.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, приведены сведения об апробации работы.

**Первая глава** содержит сведения о Таловском буроугольном месторождении, даны его геолого-географическая характеристика, теплотехнические и физико-химические свойства. Согласно проведенным исследованиям, бурый уголь Таловского месторождения в рабочем состоянии является низкокалорийным (низшая теплота сгорания – 5,0–13,250 МДж/кг), высоковлажным (влажность – 29,4–59,6 %, причем преобладает (до 90 %) влага в виде внешней составляющей, в аналитическом состоянии – не более 10 %), с широким диапазоном зольности (8,0–56,9 %), высокорекреационным (выход летучих из сухой беззольной массы – 58,3–70,9 %). Содержание элементов в сухой беззольной массе: углерода – 50,9–79,4 %; кислорода – 13,1–40,4 %; серы – 0,1–2 %; азота – 0,5–3 %; водорода – 1,2–7,3 %.

Приведен обзор разработок по технологиям использования низкосортного бурого угля: термическая конверсия в горючие газы, переработка в твердое композитное топливо и подземная газификация. Представлен российский опыт сжигания низкосортных твердых топлив от своего начала (20-х годов XX века) по настоящее время. Обоснована целесообразность проведения исследования для выявления, уточнения и конкретизации возможности энергетического использования таловского угля в агрегатах тепловых электростанций большой энергетики и на объектах малой энергетики.

Во **второй главе** изложены методические положения исследования. Описывается объект исследования, в качестве которого рассматривается котельный агрегат БКЗ-220-100-4, установленный на Томской ГРЭС-2 для сжигания угля Кузнецкого бассейна, с боковым расположением вихревых горелок по схеме «треугольником вершиной вниз» и твердым шлакоудалением. Для сравнительной оценки результатов исследований выбран котельный агрегат типа БКЗ-210-140Ф, спроектированный для пылевидного сжигания бурого угля Чихезского месторождения, с тангенциальной компоновкой прямоточных горелочных устройств.

Выполнен обзор наиболее распространенных программных продуктов, применяемых для исследования процессов при сжигании топлив. Для решения поставленных задач выбран специализированный программный продукт FIRE 3D, включающий пять приложений и позволяющий провести необходимый комплекс исследований. Выбор в пользу данного продукта также основывается на доступности и апробированности программы среди

студентов и сотрудников ТПУ и ТГУ, практическом интересе к возможности дальнейшего продвижения на новые объекты.

Для адаптации модели проведен сравнительный анализ результатов моделирования и теплового расчета с имеющимися данными режимно-наладочных испытаний. Также проведен численный эксперимент с целью проверки точности расчета посредством моделирования на сетках разной степени измельчения. В данном исследовании расчет производится на номинальную нагрузку, а для тестирования модели – на заданный состав кузнецкого угля марки Д. Визуализация основных результатов численного моделирования представлена на рисунках 1–2 в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях топки.

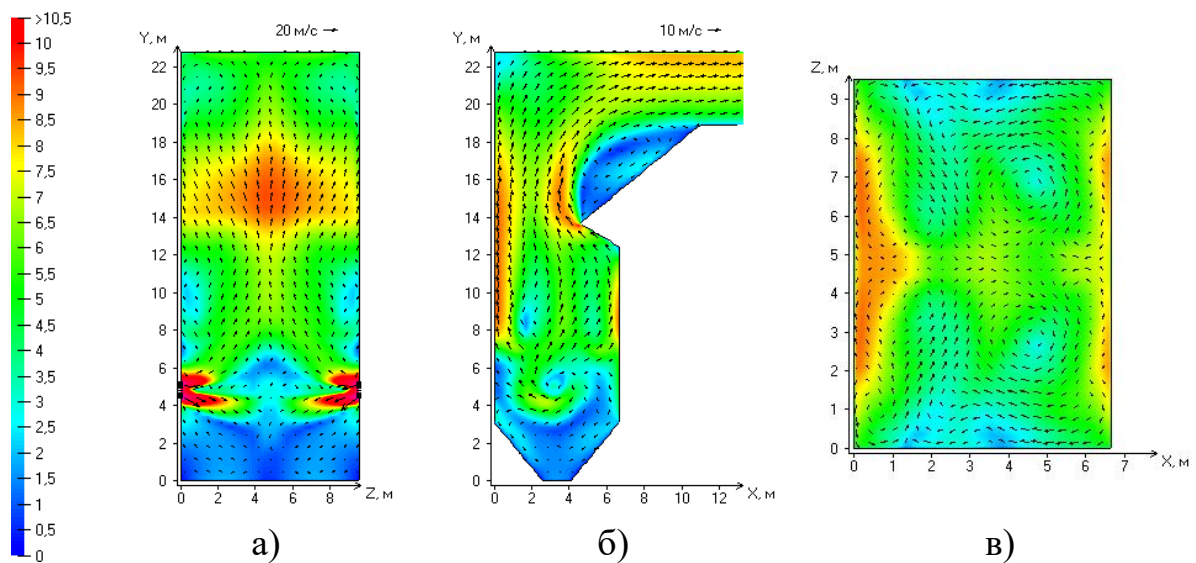


Рисунок 1 – Аэродинамическая структура потока (м/с)

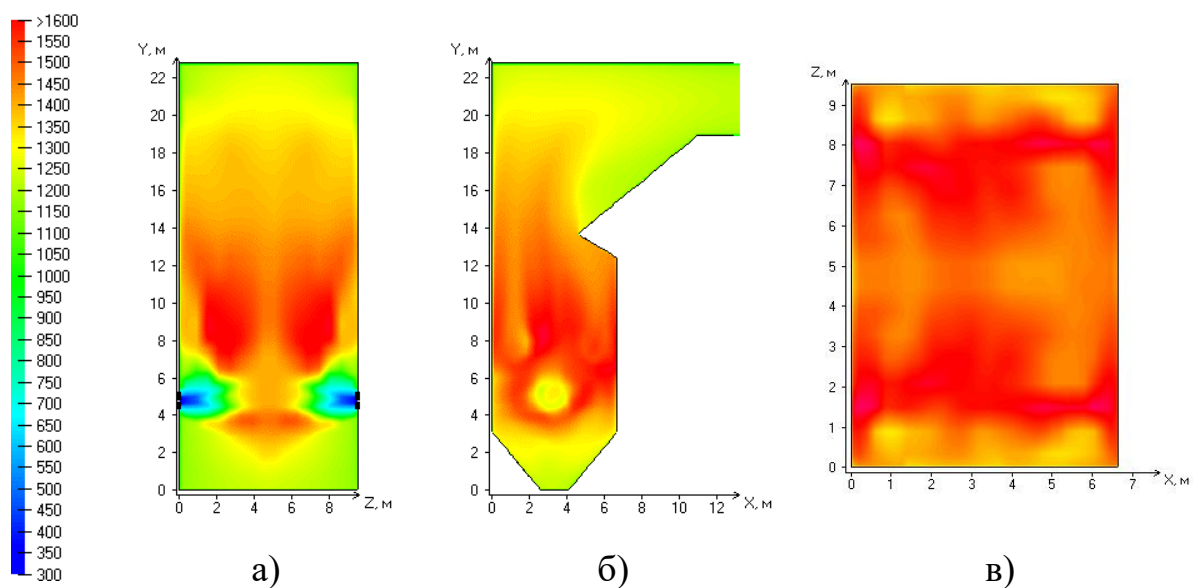


Рисунок 2 – Распределение температур (K)

Анализ показал достаточную сходимость полученных результатов расчетов с данными испытаний (табл. 1), а размер ячеек в пределах сетки с их количеством от 965420 до 31417038 не оказал значительного влияния на получаемые параметры процессов, протекающих в топочной камере.

Таблица 1 – Данные сравнительного анализа результатов

| Показатель      | Единицы измерения | Режимно-наладочные испытания | Поверочный тепловой расчет в программе TRAKT | Численное моделирование в FIRE 3D |
|-----------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| $Q_k$           | Гкал/ч            | 129,90                       | 130,82                                       | —                                 |
| $\eta$          | %                 | 90,67                        | 90,98                                        | —                                 |
| $B_p$           | т/ч               | 23,80                        | 24,74                                        | 23,76                             |
| $\vartheta_m''$ | °С                | 1199                         | 1159                                         | 1174                              |

Представленные результаты расчетов и численных экспериментов доказывают обоснованность использования FIRE 3D.

Для достижения поставленной цели и в рамках поставленных задач проведены исследования принятых к рассмотрению вариантов топлива согласно схеме, представленной на рисунке 3.

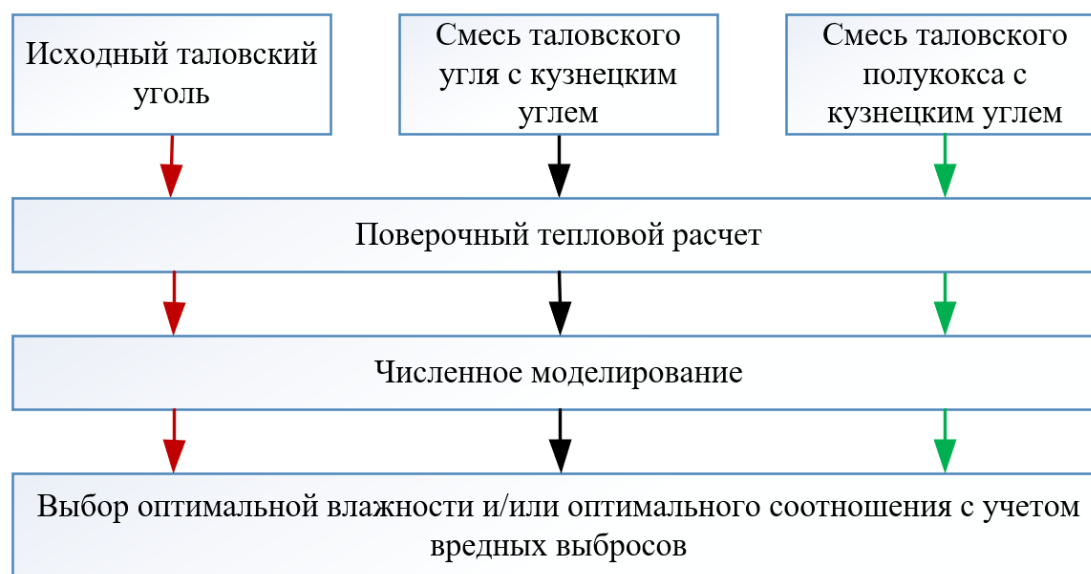


Рисунок 3 – Схема организации расчетного исследования

Исходный уголь рассматривается в диапазоне рабочей влажности от 20 % до 50 % с шагом в 5 %. Состав полукокса, полученного по технологии низкотемпературной паротепловой конверсии, взят с учетом внешней влаги.

Смеси топлив взяты в процентном соотношении от 10:90 до 90:10 для таловского угля с кузнецким углем, таловского полукокса с кузнецким углем.

Также для сравнительного анализа проведено исследование сжигания таловского угля в исходном виде в топке котла БКЗ-210-140Ф с угловым расположением прямооточных горелок. К этому расчету принимались два варианта с различным элементарным составом таловского угля.

При численном моделировании рассматриваемых вариантов процесс подачи топлива с воздухом через выходные сечения горелочных устройств в топку принят равномерным во времени. Энергия активации таловского угля и его полукокса в адекватных условиях экспериментально ранее не исследовалась, поэтому в численных экспериментах использовались опубликованные данные по схожим составам топлив. Учитывается также содержание влаги в частицах топлива (пыли) после работы системы пылеприготовления. Частицы нагреваются вследствие двух видов теплообмена – радиационного и конвективного, поэтому оставшаяся влага из топливных частиц выходит непосредственно в топке. Далее при повышении температуры в топочном объеме протекают процессы выхода летучих, воспламенения летучих, а также процесс горения.

В **третьей главе** представлены результаты исследований по итогам проведения серий экспериментов в пакете прикладных программ FIRE 3D, поверочного теплового расчета и расчета вредных выбросов.

По результатам численного моделирования получены визуализированные поля распределения основных параметров, характеризующих процессы в топочной камере котлов: распределения концентрации водяных паров, кислорода, температуры, дисперсных частиц и аэродинамическая структура потоков. На рисунках 4 и 5 представлено заполнение топки аэродинамическим потоком и распределение температур.

При исследовании сжигания таловского угля в исходном виде процессы воспламенения пылевоздушной смеси инициируется в области горелочного пояса. Вместе с тем здесь топливные частицы освобождаются от значительной части содержащейся в них влаги. Это сказывается на снижении температурного уровня и тепловых напряжений как в области горелок, так и за ее пределами по ходу факела. Движение факела влечет за собой увеличение концентрации водяных паров во всем объеме топки, и таким образом процесс горения затягивается. Распределение скоростей в топке имеют общие особенности, определяющие возникновение восходящего скоростного потока в центральной части топочного объема, интенсивность которого меняется с рабочей влажностью топлива. Распределение температуры имеет прямую зависимость от характеристик подаваемого в топку топлива – с увеличением его влажности общий

температурный уровень снижается. Визуализации концентрационных полей распределения дисперсных частиц в объеме топки обнаруживают закономерное влияние аэродинамики топочной среды. Максимальные концентрации частиц, естественно, имеют место в зоне горелочного пояса. Выше этого уровня при установившихся основных топочных процессах и выгорании угля концентрация частиц снижается.

Рассматривая сжигание таловского угля в смеси с кузнечным углем, отмечается явно выраженное увеличение скоростей в области аэродинамического выступа, а также в пристеночной области фронтальной стенки топочной камеры. Последнее формируется за счет столкновения завихренных потоков в центре объема топочной камеры в зоне активного горения. С увеличением доли таловского угля скорости в зоне активного горения снижаются. Столкновение потоков, исходящих из горелочных устройств, также формирует восхождение потока в пристеночных областях, но при этом общий скоростной уровень снижен. Распределение температур показывает, что единое ядро горения формируется на оси нижнего яруса горелок. В области холодной воронки наблюдается выраженная граница температурных полей. По мере увеличения доли таловского угля граница температурных полей в области холодной воронки меняется, как и значения температур, которые снижаются. Концентрационные поля распределения частиц соответствуют характеру аэродинамической структуры топочной среды. С увеличением доли таловского угля негативные сосредоточения наблюдаются в нижней части топочной камеры – в зоне холодной воронки.

В случае с топливом, представляющим смесь полукокса таловского угля и натурального кузнечного угля, аэродинамическая структура топочной среды для всего исследуемого диапазона соотношения компонентов смеси не имеет существенных отличий друг от друга. Формирование общего скоростного потока начинается на уровне нижнего яруса горелочных устройств, затем скоростные потоки сталкиваются в центре, а выше зоны активного горения образуют четыре вихря, циркулирующих в объеме топочной камеры. Общий температурный уровень среды является достаточно высоким. Горение топлива происходит активно почти по всей высоте топочной камеры. Отмечается также и плотное прилегание факела к фронтальной и тыльным стенам топочной камеры, что может негативно влияет на работу экранных поверхностей нагрева. С увеличением доли таловского полукокса в смеси увеличивается не только общий температурный уровень, но и концентрация частиц: видно, что наибольшая концентрация, естественно, наблюдается на выходе из горелок, далее сосредоточение частиц проявляется в области аэродинамического выступа, фронтальной стены на выходе из топочной камеры и потолка топочной камеры.

## Исходный таловский уголь

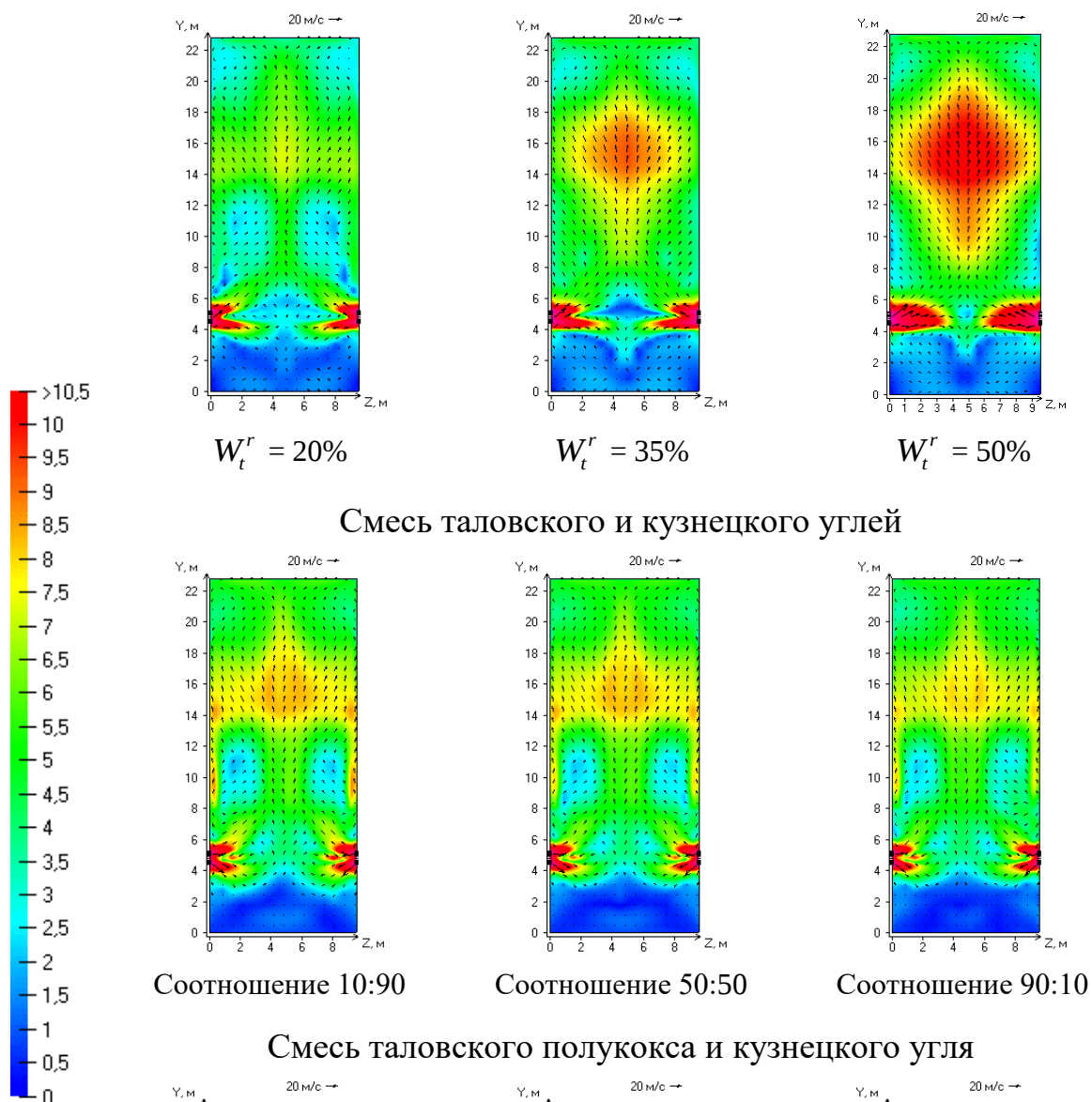
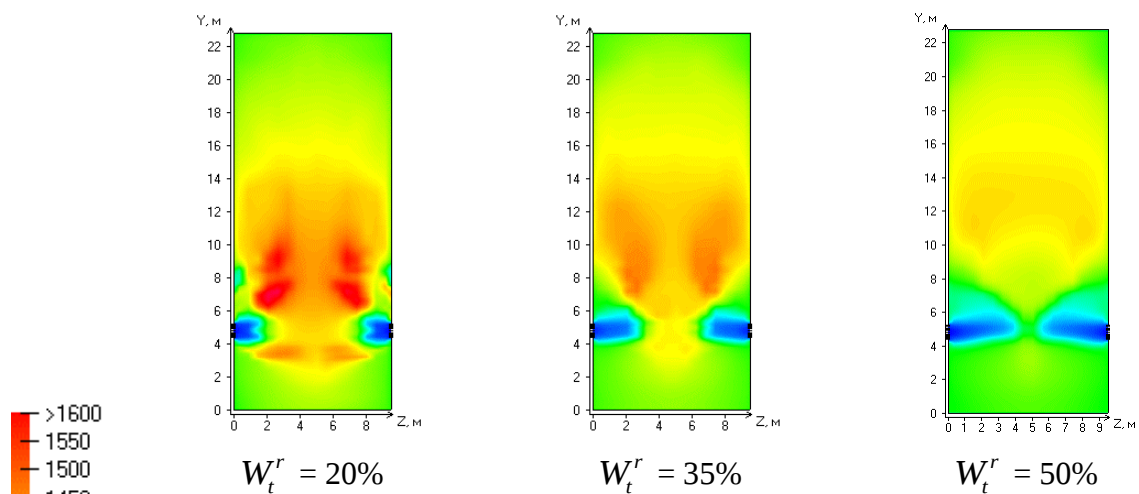
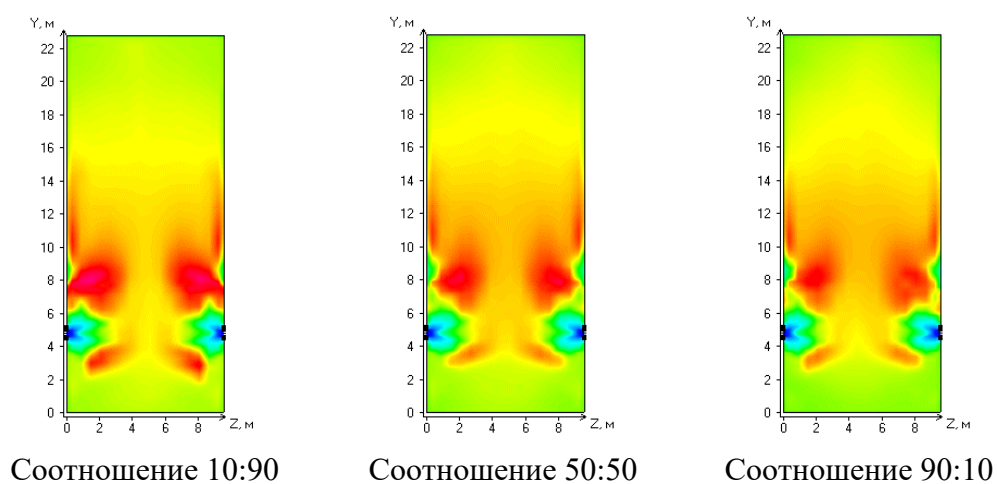


Рисунок 4 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном сечении топочной камеры

## Исходный таловский уголь



## Смесь таловского и кузнецкого углей



## Смесь таловского полукокса и кузнецкого угля

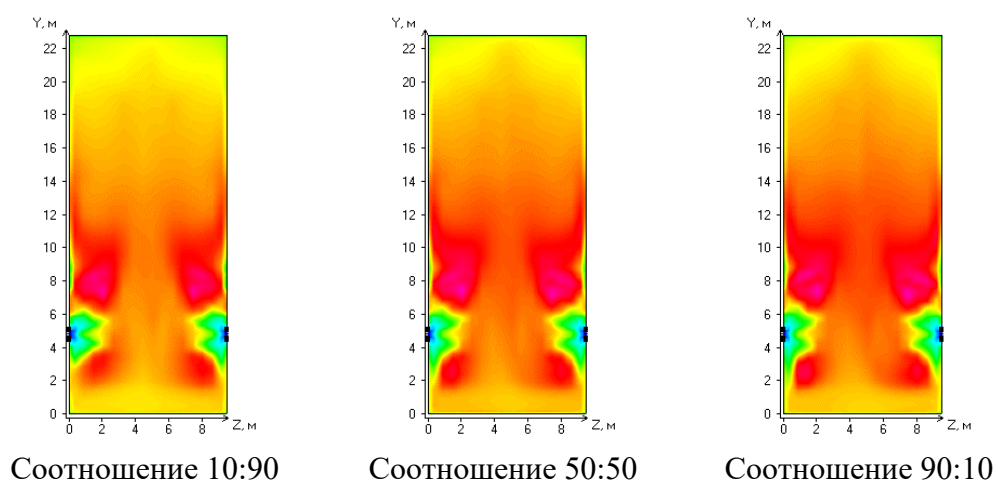


Рисунок 5 – Распределение температур (К) в поперечном сечении топочной камеры

Обобщением контурных полей с цветовой индексацией являются графики изменения по высоте топки среднеинтегральных (в горизонтальных сечениях) значений температуры (рис. 6).

Поверочный тепловой расчет выполнен в отраслевой программе ТРАКТ для всех представленных выше вариантов. По результатам расчетов сравнивались следующие параметры: температура на выходе из топочной камеры, полученная при расчете в программе ТРАКТ и FIRE 3D; расход топлива; объем продуктов сгорания; удельное тепловое напряжения топочного объема; удельная тепловая нагрузка экранов топки.

Полученные при сжигании таловского угля в исходном состоянии результаты показали негативные тенденции изменения параметров работы топки при влажности таловского угля более 30 %. При сжигании смесей температура на выходе из топки снижается при увеличении доли таловского угля. Расход топлива увеличивается более, чем в 2 раза на исходном таловском угле, расход смеси увеличивается с 30,1 до 40,2 т/ч при возрастающей доле таловского угля. Объем газов снижается в 1,5 раза. В варианте с исходным таловским углем изменение в сторону увеличения удельного теплового напряжения топочного объема находится в пределах 0,01 МВт/м<sup>3</sup>, удельной тепловой нагрузки экранов топки – в пределах 0,15 МВт/м<sup>2</sup>, не превышая при этом допустимых значений, равных 0,18 МВт/м<sup>3</sup> и 5,5 МВт/м<sup>2</sup>, соответственно. В вариантах смесей данные параметры снижаются в пределах 0,003 МВт/м<sup>3</sup> и 0,04 МВт/м<sup>2</sup>, соответственно, и не превышают допустимых значений, указанных выше. Также стоит отметить, что при численном моделировании и расчетах в программе ТРАКТ коэффициент тепловой эффективности  $\psi$  принимался равным 0,45. Коэффициент полезного действия при использовании исследуемых вариантов топлива получен в пределах 90–92 %.

По итогам расчетов вредных выбросов получены зависимости параметров по выбросам на выходе из топки котла БКЗ-220-100-4 и с уходящими дымовыми газами: максимальный удельных выброс, г/МДж; концентрация, мг/м<sup>3</sup>; максимальный удельный выброс на тонну условного топлива, г/кг.

Анализируя зависимость выбросов оксида серы, отмечается отсутствие превышения нормативного значения во всех исследуемых вариантах. Выбросы оксидов азота отсутствуют при сжигании таловского угля в исходном виде, а при сжигании смесей снижаются по мере увеличения доли таловского угля в смеси начиная с 40 % и доли полукокса с 60 %. Выбросы твердых частиц превышают норму в случае использования исходного таловского угля, в смеси значение выбросов возрастает с доли таловского угля в смеси от 20 %. Норма выбросов оксидов азота в исследуемых смесях превышает максимально в 1,6 раза, выбросов твердых частиц – в 3 раза.

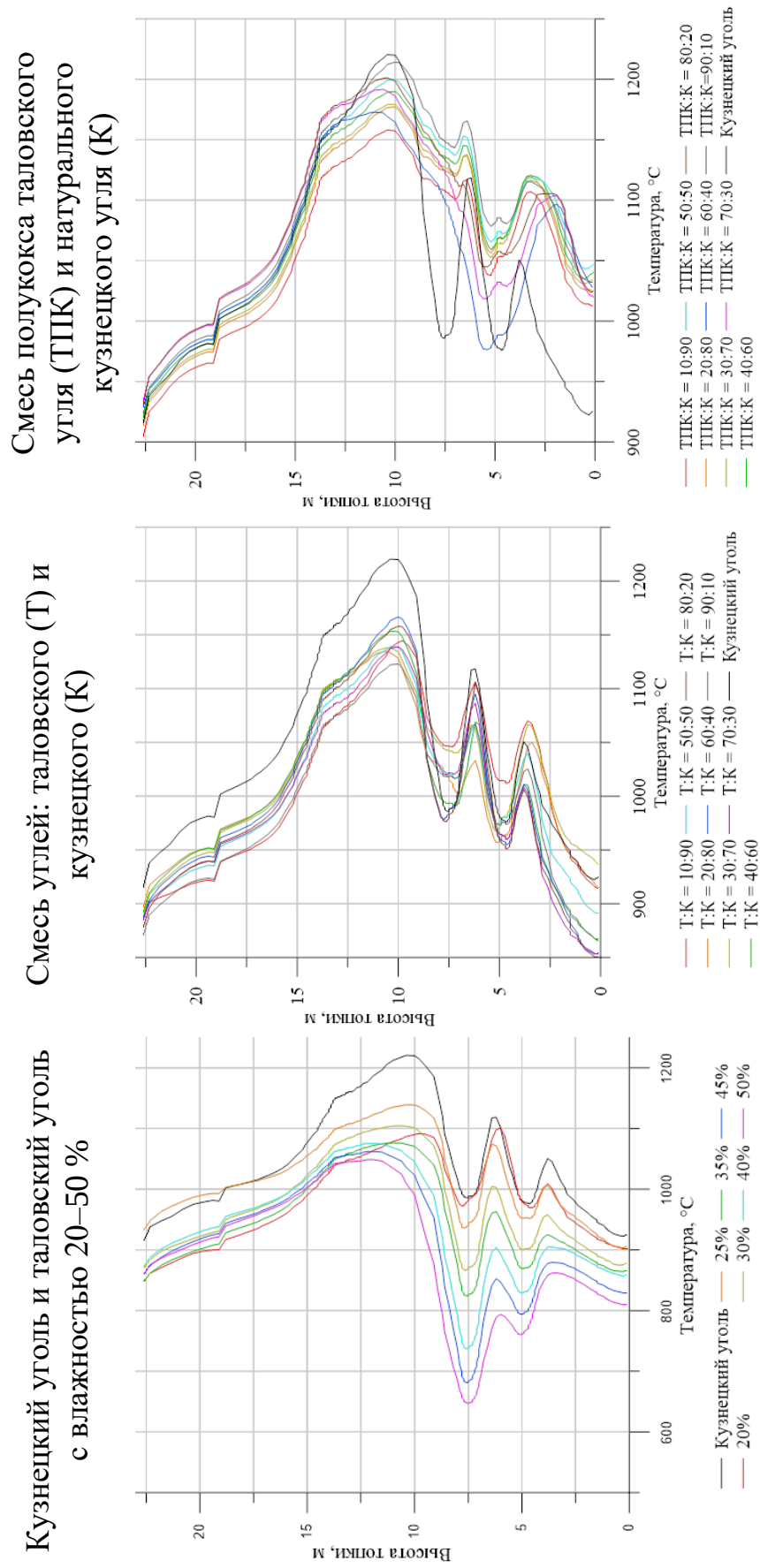


Рисунок 6 – Среднеинтегральные значения температуры на различных высотных отметках

**Четвертая глава** посвящена анализу полученных результатов и выработке рекомендаций по использованию угля Таловского месторождения.

При сжигании таловского угля в исходном виде в топке котла БКЗ-220-100-4, выделяются следующие особенности.

1. Процессы, протекающие в ходе горения исходного угля во всем диапазоне влажности, симметричны в сечениях топочной камеры котла.

2. Во всем исследованном диапазоне влажности ярко выраженная зона обратных токов не обнаружена.

3. Завихренные потоки воздуха, формирующиеся в угловых зонах топки, обеспечивают воспламенение закрученных струй, исходящих из горелочных устройств, при влажности таловского угля во всем её диапазоне.

4. Область холодной воронки занята смещенными к тыльным экранам потоками топочных газов, которые образуются вследствие изменения давления при соударении топливовоздушных горелочных струй, при этом в верхней части холодной воронки крупные вихри не наблюдаются, а движение среды становится линейным во всем диапазоне рассмотренной при моделировании влажности.

5. Максимальная скорость движения продуктов сгорания отмечается на высоте, где суммарный объемный расход воздуха достигнет максимума; другой всплеск фиксируется в области аэродинамического выступа в связи с уменьшением здесь проходного сечения для продуктов сгорания.

6. Зависимость температуры в ядре горения от влажности таловского угля является обратно пропорциональной.

7. Равномерное распределение тепловых потоков по экранам топки при влажности  $W_t^r = 25\text{--}30\%$ .

8. Наличие центрально ориентированного ядра горения в поперечном сечении топки во всем диапазоне влажности.

9. Тенденция к скоплению частиц на скате холодной воронки тыльной стороны топочной камеры.

10. Отсутствие превышения нормативных значений по выбросам оксидов азота и оксида серы.

11. Превышение нормативного значения выбросов твердых частиц.

Характеризуя процессы в топке котла БКЗ-210-140Ф, можно сделать заключение, что сжигание таловского угля с максимально высокой исходной влажностью  $W_t^r = 50,7\%$  в топке с прямоточными горелками и тангенциальной компоновкой нецелесообразно.

В соответствии с полученными результатами численного моделирования и расчетов выбросов в дальнейших исследованиях к расчету принимался таловский уголь с рабочей влажностью 25 %.

Анализируя полученные результаты при сжигании смеси таловского и кузнечного углей, отмечается следующее.

1. Характер аэродинамической структура потока идентичен при разных вариантах.

2. Скоростной режим среды снижается с увеличением доли таловского угля.

3. Столкновение потока со стенками топочной камеры и последующее увеличение значений скоростей может негативно сказаться на надежности работы экранных поверхностей нагрева приводя к абразивному износу стенок труб.

4. Формирование единого ядра горения происходит при всех исследуемых вариантах.

5. Значения температур находятся на достаточном уровне для обеспечения выгорания топлива.

6. Плотное прилегание факела просматривается при сжигании смеси каждого соотношения.

7. Распределение в потоке частиц соответствует аэродинамической структуре потока, при этом концентрация меняется с ростом доли таловского угля в сторону увеличения.

8. Скопление частиц на скатах холодной воронки наблюдается при преобладающей доле таловского угля.

9. Отсутствие превышения нормативного значения по выбросам оксида серы.

10. Превышение нормативных значений по выбросам оксидов азота и твердых частиц, при этом с увеличением доли таловского угля в смеси концентрация оксидов азота снижается, но повышается концентрация твердых частиц.

Исходя из полученных результатов, наибольшую стабильность имеют процессы, протекающие при доле таловского угля 10–30 %.

При сжигании смеси полукокса таловского угля и кузнечного угля можно отметить следующее.

1. Аэродинамическая структура не имеет значительных отличий во всем исследуемом диапазоне.

2. В пристеночных областях топочной камеры наблюдается увеличение скорости потока.

3. Температурный уровень среды достаточно высокий и повышается с увеличением доли полукокса в смеси.

4. Плотное прилегание факела к стенам топочной камеры так же, как и при сжигании смеси углей, наблюдается во всем исследуемом диапазоне, но отмечаются более высокие значения температур, что может негативно сказаться на надежности работы поверхностей нагрева.

5. Концентрация частиц в объеме топочной камеры соответствует аэродинамической структуре, имеется пропорциональная зависимость от доли полукокса в смеси.

6. Локальное скопление частиц наблюдается при преобладающей доле полукокса таловского угля.

7. Отсутствие превышения нормативного значения по выбросам оксида серы.

8. Превышение нормативных значений по выбросам оксидов азота и твердых частиц, при этом с увеличением доли полукокса таловского угля в смеси концентрация оксидов азота снижается, но повышается концентрация твердых частиц.

По совокупности полученных результатов правомерно сделать вывод о том, что добавление полукокса таловского угля в смесь значительно изменяет параметры топочной среды вплоть до негативного характера влияния. Учитывая полученные результаты, доля полукокса в смеси должна составлять не более 30 %.

Исходя из вышеизложенного использование таловского угля на тепловых электростанциях в исходном виде определяется в основном содержанием балласта и его составляющих, поскольку для таловских углей характерен весьма широкий диапазон изменения величин зольности и влажности. Реализация сжигания в смеси связана с необходимостью расширения емкости топливного склада и выполнения операций подготовки угольных смесей. Относительно промышленных и отопительных котельных наиболее предпочтительным является вариант полукокса. Здесь определяющими факторами выступают территориальное расположение и квалификация персонала.

В **заключении** представлены основные выводы диссертационной работы и сформулированы соответствующие рекомендации.

В **приложении** приведены сведения о горючих полезных ископаемых на территории Томской области, основные технические данные котлоагрегатов, описание используемой математической модели и визуализированные результаты численного моделирования всех вариантов исследуемых топлив.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы и рекомендации.

1. Выполнен анализ ранее проведенных и опубликованных исследований, имеющих отношение к освоению Таловского бурого угольного месторождения, и на его основе уточнены направления и варианты для проработки вопроса о вовлечении таловского угля в энергетическое

использование как элемента энергетической безопасности региона.

2. С использованием численного моделирования и апробированных расчетных методик выполнен анализ параметров процессов сжигания таловского угля в объеме камерной топки применительно к действующему котлу Томской ГРЭС-2 в широком диапазоне теплотехнических характеристик исходного рабочего состояния угля и его соотношений в составе выбранных к исследованию топливных смесей, в результате которого выявлены ограничения по условиям работы топочного устройства и возможного превышения нормативов вредных выбросов.

3. Использование таловского угля в котлах тепловых электростанций при сжигании в камерных топках с твердым шлакоудалением допустимо по условиям топочных процессов в следующих вариантах:

- в исходном виде – с ограничением по балластным составляющим  $W_t^r \leq 25 \%$  и  $A^d \leq 25 \%$ ;
- в смеси с кузнецким углем марки Д в исходном виде и в виде полукокса – при доле не более 0,3.

При реализации этих вариантов в случае складирования таловского угля на ТЭС необходимо выполнение установленных нормативных требований по предотвращению самовозгорания.

4. Расчетные значения выбросов оксидов серы с дымовыми газами значительно ниже нормативных во всем диапазоне теплотехнических характеристик таловского угля и его соотношений с другими компонентами в составе топливных смесей

5. Выбросы оксидов азота расчетным путем прогнозируются в пределах нормативов при сжигании таловского угля как монотоплива. Превышение нормативных значений ожидаемо при сжигании смесей на основе кузнецкого угля: при доле таловского угля до 0,3 и во всем диапазоне соотношений с полукоксом таловского угля.

6. По выбросам твердых частиц с дымовыми газами имеет место тенденция к возрастанию и превышению нормативных значений при увеличении зольности таловского угля и его доли в смеси, в том числе в виде полукокса. Для исследованной котельной установки поддержание выбросов частиц ниже нормативного уровня возможно в смеси с кузнецким углем не более 0,3 и в виде полукокса при доле не более 0,2. Кардинальным решением для данной котельной установки является замена золоуловителей на более эффективные.

7. Наиболее перспективным путем вовлечения угля Таловского месторождения в энергетическое использование в регионе является получение транспортабельного твердого топлива по известным технологиям полукоксования и брикетирования для преимущественного использования в сфере распределенных источников теплоснабжения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Тайлашева Т. С., Красильникова Л. Г., **Воронцова Е. С.** Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 52–55 (Scopus и WoS, ВАК).
2. Тайлашева Т. С., Гиль А. В., **Воронцова Е. С.** Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 128–135 (Scopus и WoS, ВАК).
3. Gil A. V., **Vorontsova E. S.**, Tailasheva T. S., Starchenko A. V. Firing a coal with different moisture content in tangentially-fired pulverised coal furnace // 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 552–556 (Scopus).
4. Заворин А. С., **Воронцова Е. С.**, Гиль А. В., Долгих А. Ю., Казаков А. В., Кулеш Р. Н. Энергетическое использование местных низкосортных топлив на примере угля Таловского месторождения Томской области // Перспективы развития новых технологий в энергетике России: материалы юбилейной Международной научно-технической конференции, Москва, 27–28 октября 2016 года. – М.: ОАО «ВТИ», 2016. – С. 118–126.
5. **Vorontsova E.**, Gil A., Romanenko A. Research of parameters of the steam boiler BKZ-220-100 at joint burning of natural gas and low-grade fuel // MATEC Web of Conferences: 2018 Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. – 2018. – Vol. 194. – P. 01020 (Scopus).
6. Заворин А. С., **Воронцова Е. С.** Исследования направлений использования местного низкосортного топлива // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: сборник тезисов докладов X Всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 06–09 ноября 2018 года. – Новосибирск: Срочная полиграфия, 2018. – С. 46.
7. Заворин А. С., Тайлашева Т. С., Буваков К. В., Долгих А. Ю., **Воронцова Е. С.** Топливные ресурсы Томской области для альтернативного энергетического использования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 55–65 (Scopus и WoS, ВАК).
8. **Воронцова Е. С.**, Долгих А. Ю., Заворин А. С., Буваков К. В. Технологические подходы к энергетическому использованию местных низкосортных топлив // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – № 16(5). – С. 524–534 (Scopus и WoS, ВАК).