

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Воронцова Елена Сергеевна

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

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Заворин А.С.

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТАЛОВСКОЕ УГОЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	12
1.1 Таловское месторождение как объект угледобычи.....	12
1.2 Теплотехнические и физико-химические свойства угля Таловского месторождения как энергетического топлива.....	14
1.3 Обзор разработок по технологиям использования таловского угля	16
1.4 Опыт сжигания низкосортных углей в котлах электрических станций	21
1.5 Обоснование задач исследования.....	25
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	28
2.1 Характеристика объектов исследования	28
2.2 Выбор программного продукта.....	36
2.3 Апробация модели численного исследования	40
2.4 Определяющие принципы исследования	46
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	50
3.1 Топливо – таловский уголь в исходном виде	50
3.2 Топливо – смесь таловского и кузнецкого углей	65
3.3 Топливо – смесь полукокса таловского угля и натурального кузнецкого угля	72
3.4 Результаты тепловых поверочных расчетов.....	79
3.5 Генерация оксидов азота и выбросы с дымовыми газами	83
ГЛАВА 4. УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАЛОВСКОГО УГЛЯ	91
4.1 Сжигание в исходном (натуральном) виде.....	91
4.2 Сжигание в смеси с кузнецким углем.....	93
4.3 Сжигание полукокса в смеси с кузнецким углем.....	94
4.4 Рекомендации по использованию таловского угля.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
Приложение I. Распределение горючих полезных ископаемых на территории Томской области	129

Приложение II. Основные технические данные котлоагрегатов	130
Приложение III. Описание используемой математической модели	132
Приложение IV. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания таловского угля в исходном виде	143
Приложение V. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания смеси таловского и кузнецкого углей	153
Приложение VI. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания смеси полукокса таловского угля и кузнецкого угля	162
Приложение VII. Материалы по использованию результатов	171

ВВЕДЕНИЕ

Обсуждаемый как ориентир для современного технологического уклада [1, 2] принцип равномерного использования всех освоенных видов энергии и топлива не подтверждает свою состоятельность прежде всего потому, что нетрадиционная энергетика оказалась неспособной удовлетворять потребности производства с его мощностью и требуемыми ресурсами. При этом доля атомной энергетике в мире (в целом) и в РФ в общем производстве электричества не превышает 20 %, что связано с технологической сложностью строительства и обеспечением безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС), а также проблемами дальнейшего обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. Немаловажно то, что 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 [3, 4]. Так, общая доля тепловых электростанций в установленной мощности ЕЭС России на 01.02.2022 г. составила 66,14 %, из них на угле – 16,07 % [5], в то время как в Германии и США доля угольной генерации составляет 31 % и 37 % соответственно, в Китае и Индии – 67 % и 75 % [6]. Угли Кузнецкого, Канско-Ачинского и Экибастузского бассейнов составляют основную долю потребляемого на ТЭС России твердого топлива, при этом 90 % общей структуры потребления угля приходится на низкокачественные марки [7].

Утвердившиеся в современном периоде тренды глобальной трансформации развития энергетики, основанные на декарбонизации, децентрализации и цифровизации, ставят перед угольной генерацией новые вызовы. К таковым относятся: ужесточение экологических требований к выбросам (оксиды серы, оксиды азота, тяжелые металлы и др.) и снижение выбросов углекислого газа – так

называемого «углеродного следа» (как путь борьбы с изменением климата). Следствием этого является усиление межтопливной конкуренции с природным газом и устремление к возрастанию роли возобновляемых источников энергии. Однако реалии показывают, что эти надежды и прогнозы не оправдываются в полной мере – более существенное влияние имеет возможность использования собственных ресурсов традиционного, в том числе угольного топлива.

На сегодняшний день, по мнению экспертов [6], 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. В соответствии с Доктриной энергетической безопасности [8] и Энергетической стратегией Российской Федерации до 2035 года [9] в числе приоритетных задач наряду с достижением показателей экологичности определено рациональное использование местных топливно-энергетических ресурсов.

В свете этого Томская область имеет свои особенности. С одной стороны, обширное по номенклатуре разнообразие топливно-энергетических ресурсов, способное удовлетворить нужды большой и промышленной энергетики, 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.

Спектр топливных ресурсов Томской области, охватывая практически все виды как ископаемых, так и возобновляемых источников [10], превышает настоящие объемы потребления, а по разведанным и прогнозируемым запасам даже выходит за региональное значение. Тем не менее наиболее востребованным и масштабно используемым является привозной каменный уголь Кузнецкого

бассейна при наличии квотируемой для энергетики доли углеводородного сырья в виде природного газа.

Исходя из этого, определяющими факторами для энергетической безопасности региона являются взаимное территориальное расположение центров производства и потребления энергетических ресурсов, их транспортная доступность, а также альтернативы целевого использования и доля природного газа в топливно-энергетическом балансе.

С учетом изложенных соображений, а также с точки зрения технической готовности теплоэнергетических объектов региона, а в дальнейшем и поддержания маневренности по условиям потребляемого топлива целесообразно рассматривать томский бурый уголь в качестве альтернативного топлива для обеспечения региональной энергетической безопасности. Тем более, что на территории региона геологи выделяют более сотни локальных проявлений бурых углей. Среди них по ряду параметров выделяется бурый уголь Таловского месторождения, расположенного в густонаселенной части области в 25 км от административного центра и в 10–15 км от других крупных потенциальных потребителей.

В последние десятилетия различными вопросами изучения таловских углей, а именно определением технологических и теплотехнических свойств, прогнозами масштабов и направлений использования, оценками условий залегания угольных пластов и технологическими подходами к разработке месторождения занимались такие томские исследователи как Архипов В.С., Заворин А.С., Казаков А.В., Карякин С.К., Ласовская О.А., Маслов С.Г., Паровинчак М.С., Прокопенко П.Н. и другие. Ими создан существенный задел как база для дальнейших работ по освоению таловского угля. Тем не менее в настоящее время отсутствуют в полном объеме необходимые данные об условиях и параметрах процессов сжигания угля применительно к действующим в регионе энергетическим установкам, о возможных ограничениях в их работе, обусловленных качественными характеристиками топлива. Совокупность пока недостающих в этой части сведений позволит выработать подходы к энергетическому использованию таловского угля в регионе, исключая значительные и затратные технические

мероприятия с установленным оборудованием, что соответствует концепции энергетической безопасности.

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 в 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:

выполнить анализ работ по исследованиям угля Таловского месторождения и по энергетическому сжиганию подобных топлив;

провести численные исследования сжигания таловского угля в топочной камере пылеугольного котла исходя из условий его использования как местного топлива;

дать оценку влияния параметров топлива на процессы, протекающие в топочной камере пылеугольного котла;

провести сравнительную оценку технологических вариантов сжигания топлива применительно к топочным процессам исходя из минимизации затрат на реконструкцию;

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 20 работах, в том числе 4 статьи в журналах, индексируемых базой «Scopus» 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.

ГЛАВА 1. ТАЛОВСКОЕ УГОЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

1.1 Таловское месторождение как объект угледобычи

На сегодняшний день ресурсный потенциал Томской области оценивается, в первую очередь, запасами углеводородного сырья. Благодаря этому область имеет статус ресурсодобывающей, а добыча углеводородов обеспечивает пополнение бюджета и приток инвестиций.

Между тем, на территории области сосредоточено множество месторождений твердых полезных ископаемых [11, 12], являющихся стратегическим резервом. Одним из таких резервов является бурый уголь, который в масштабах Российской Федерации составляет более половины всех запасов угля [13], а в Томской области представляет 5 % от запасов природных ресурсов [14].

К настоящему времени среди установленных на территории региона значатся более 100 проявлений и месторождений бурого угля, сгруппированные в 7 угленосных районов по своему географо-экономическому положению (рис. 1.1) [15–17].

Достаточно крупным и выгодно расположенным в регионе является Таловское месторождение бурого угля. Месторождение расположено в густонаселенном и промышленно развитом районе Томской области – к западу от поселка Наумовка на левобережье реки Самуськи, 25 км от г. Томска и 10–15 км от основных потенциальных потребителей (приложение I, рис. I.1).

Согласно [18] общие прогнозные ресурсы месторождения составляют 3 млрд 625,6 млн тонн, средняя мощность угольных пластов – 3,9 м. Участки Надеждинский и Наумовский, ресурсы которых составляют 154 млн тонн и 51 млн тонн соответственно, являются наиболее перспективными. По оценке геологов, годовая добыча может составить 7,5–15 млн. тонн из общего объема разведанных запасов.

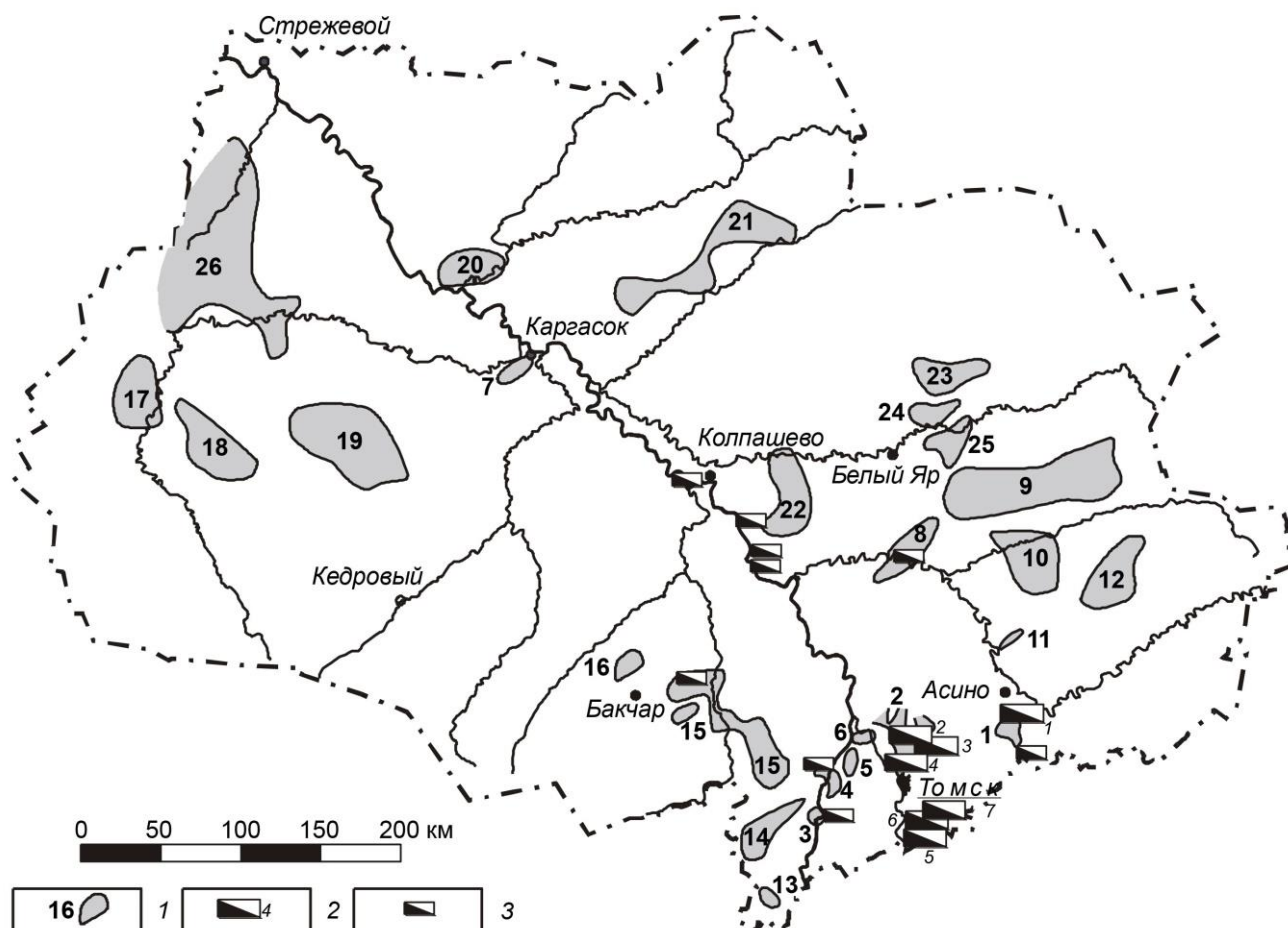


Рисунок 1.1 – Угленосные площади Томской области с месторождениями и проявлениями бурого угля [19]

1 – угленосные площади в пределах угленосных районов: Томского или Южного (1 – Яйская, 2 – Таловская), Долинного (3 – Киреевская, 4 – Мельниковская, 5 – Половинкинская, 6 – Орловская, 7 – Нюрольская), Чулымского (8 – Батуринская, 9 – Уткинская, 10 – Улуюльская, 11 – Сергеевская, 12 – Чичкаюльская), Бакчаро-Чаинского (13 – Чилинская, 14 – Баксинская, 15 – Бакчарская, 16 – Хуторская), Парабельского (площади не определены), Васюган-Тымского (17 – Волковская, 18 – Айкагальская, 19 – Чижапская, 20 – Тымская, 21 – Березовская, 22 – Сандровская, 23 – Орловская, 24 – Междуреченская, 25 – Клюквинская), Александровского (26 – Ларьеганская); 2 – месторождения бурого угля (1 – Яйское, 2 – Таловское, 3 – Туганское, 4 – Реженское, 5 – Ярское, 6 – Казанское, 7 – Вороновское, 8 – Бакчарское); 3 – проявления бурого угля.

Основой для исследований таловского угля послужили геолого-экономические показатели месторождения [20], позволяющие сделать предварительные выводы о перспективности добычи угля и его использования.

Месторождение имеет такие горно-геологические особенности как заболоченность и изрезанность поверхности долинами рек, локальная плавунность угленосных отложений [21]. Исходя из этого, добыча таловского угля возможна открытым (транспортная и бестранспортная вскрыши) и закрытым (скважинная гидродобыча и подземная газификация) способами [22].

Угли Таловского месторождения принадлежат к группе Б2 – второй по влажности, бурым витринитовым, гумусовым, ранней стадии углефикации, образованным в условиях заболоченных речных долин.

На северо-востоке от Таловского месторождения развиты от 1 до 4-х угольных пластов, образующих Таловскую углеперспективную площадь [23]. По составу и качеству данные угли подобны таловскому, их прогнозные ресурсы составляют 1100 млн. тонн.

1.2 Теплотехнические и физико-химические свойства угля Таловского месторождения как энергетического топлива

Согласно проведенным исследованиям [24], 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 C^{daf} – 50,9–79,4 %; кислорода O^{daf} – 13,1–40,4 %; серы S^{daf} – 0,1–2 %; азота N^{daf} – 0,5–3 %; водорода H^{daf} – 1,2–7,3 %.

Рассматривая элементный состав, можно отметить, что данный уголь по отдельным характеристикам близок к бурому углю Канско-Ачинского бассейна и, в частности, к Березовскому бурому углю, но существенно уступает ему по энергетическим характеристикам. Однако даже при этом себестоимость добычи, транспортировки, переработки и использования может оказаться ниже в 1,5–2 раза относительно привозных топлив [25].

Предварительные исследования теплотехнических и технологических свойств бурого угля положили начало исследованиям его минеральной части. Коллективом ученых ТПУ получены данные прогнозного характера о свойствах минеральной части в условиях сжигания в котельных установках, а также дана характеристика ожидаемого влияния на работу отдельных элементов трактов котла [26]. В [27, 28] приведены результаты исследования угля Таловского месторождения, включающие теплотехнические свойства, состав, характеристики плавкости и шлакуемости золы топлива, расчетные прогнозные характеристики камерных топок, а также рекомендуемые значения температуры на выходе из топочной камеры.

Полученные результаты показали, что несмотря на высокую влажность угля, теплота сгорания в пересчете на сухое беззольное состояние имеет приемлемые значения. Можно полагать, что повышение теплоты сгорания возможно обогащением угля физическими методами в совокупности со снижением влажности рабочей массы.

Зола имеет типичный кислый состав и невысокую тугоплавкость. Прогноз влияния минеральной части на работу котла [29], выполненный по методике УралВТИ [30–38], показывает, что во всем диапазоне зольности высока вероятность абразивного износа поверхностей нагрева, в диапазоне меньшей зольности – шлакования и образования прочных отложений.

Исходя из данных о плавкости золы, с учетом выхода летучих, высказывались предположения о предпочтительности сжигания угля в режиме твердого шлакоудаления, что может снизить темпы шлакования топочной камеры за счет более низкой температуры в зоне активного горения. Для предотвращения

шлакования температура дымовых газов должна быть ниже температуры начала деформации золы и иметь значения на выходе из топки на уровне 1115 °С, согласно предварительным расчетам [29]. Также можно рассматривать ввод в зону активного горения рециркулирующих газов, отбираемых из верхней части топочной камеры, что дополнительно обеспечит и сушку угля.

Повышенные допустимые значения температуры газов перед ширмовым и конвективным пароперегревателем объясняются свойствами рыхлого первичного слоя шлако-золовых отложений [29]. В связи с этим появилось мнение, что не требуется дополнительных мер по снижению температуры уходящих газов на выходе из топки [29].

1.3 Обзор разработок по технологиям использования таловского угля

По предварительным оценкам [26, 39], бурый уголь Таловского месторождения возможно использовать в нижеследующих вариантах:

1. энергетическое сырье (исходный и подсушенный для прямого сжигания, брикеты, полукокс, водоугольное топливо, горючий газ газифицированного угля);
2. химическое сырье (битумы, восковые смолы, гуматы, сорбенты);
3. сырье для гидрометаллургии (получение скандия, ванадия, церия, ниобия и др.);
4. сырье для строительных материалов.

В соответствии с возможными вариантами применения таловского угля, параллельно с исследованием его минеральной части рассматривались такие направления как термическая конверсия в горючие газы, переработка в твердое композитное топливо и подземная газификация.

Термическая конверсия [40–42], как способ получения горючих газов из твердого топлива с дальнейшим практическим применением, основана на

осуществлении принципа глубокой конверсии органической массы в условиях температур не более 500 °С.

Данный способ применяется для спектра низкосортных топлив, имеющих потенциал использования в малой энергетике, и апробирован в лабораторных условиях, в том числе, на углях Таловского месторождения [42]. Характеристики исходного бурого угля и полученного из него полукокса, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики исследуемых образцов [43]

Состав и свойства рабочего состояния	Исходный уголь	Полукокс
Влажность, %	40,7	0,78
Зольность, %	14,6	35,82
Содержание углерода, %	29,5	60,0
Содержание водорода, %	2,20	0,20
Содержание кислорода, %	12,2	3,00
Содержание серы, %	0,20	0,00
Содержание азота, %	0,60	0,10
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	10,8	20,1

Исходный уголь характеризуется высоким значением выхода летучих (до 59,8 %). Высокая влажность приводит к увеличению зольности до 26,4% в сухом беззольном состоянии. При этом отмечается повышение теплоты сгорания угля в сухом состоянии до 18,2 МДж/кг при зольности 24,6 %. Полукокс характеризуется почти полным отсутствием летучих (7,1 % на сухую беззольную массу) и влаги, высоким значением зольности. Теплота сгорания сухой беззольной массы составляет 31,7 МДж/кг.

В рамках выполненного исследования [42] органическая масса подвергается воздействию температур 300–450 °С с сопутствующим вводом каталитических присадок и пара в активную зону реагирования. Температура пара соответствует температуре процесса конверсии. Исследование проходит при атмосферном давлении, кислородсодержащее дутье отсутствует. Результатом применения

способа низкотемпературной конверсии является сначала полукокс, а затем горючий газ, насыщенный водородом.

В начальном режиме такого полукоксования 30–40 % энергоемкости приходится на твердый углеродистый остаток. При получении полукокса в обоих режимах (пиролиза и катализа) часть энергоемкости угля распределяется на смолы. Из исследуемого полукокса в режиме полукоксования выделяются лишь летучие продукты, а энергоемкость распределяется в равных долях между газом и углеродистым остатком. При каталитическом режиме вся органическая масса конвертируется в газ, таким образом вся энергоемкость полукокса переходит в теплоту сгорания газа [43].

К достоинствам данного способа относят возможность ведения процесса при относительно низких температурах, получение пиролизного газа с минимальным содержанием балластных составляющих, возможность его производства с преобладанием водорода в составе в автотермическом режиме, т.е. без подвода внешней теплоты [43]. К недостаткам способа относятся дополнительные затраты на генерацию пара требуемых параметров и невысокая интенсивность процесса. Ввод каталитической присадки в виде оксида железа ограничивает прямое масштабное применение, поэтому конверсия успешно реализуется в комбинированных схемах производства газа и углеродистого продукта, применимых на объектах малой энергетики [44].

Другим направлением переработки низкосортного угля в кондиционное топливо [45–48], пригодное для сжигания в слоевых топочных устройствах, рассматривается теплотехнология (рис. 1.2) [49, 50], которая включает в себя предварительную термическую переработку исходного сырья в углеродистый остаток и пиролизный конденсат, а затем последующее формирование стандартизированного топлива – твердого композитного топлива в виде брикетов и пеллет. Термическая обработка осуществляется путем пиролиза при температуре не более 450 °С. Побочным продуктом термической переработки является газ, который сжигается для покрытия собственных нужд технологии [51].



Рисунок 1.2 – Принципиальная схема технологии получения твердого композитного топлива [49]

Формование брикетного топлива осуществляют на основе смешения углеродистого остатка со связующим веществом – декстрином. Формованный сырец композитного топлива сушится при изготовлении брикетов с температурой от 20 до 40 °С, пеллет – от 20 до 80 °С [49].

Результаты апробации вышеописанной технологии на буром угле Таловского месторождения (табл. 1.2) показывают, что при переработке зольность твердого композитного топлива по сравнению с углем увеличилась. Влажность

изготовленного топлива обусловлена поглощением влаги из окружающей среды при достижении воздушно-сухого состояния и зависит от условий и длительности его хранения. Теплота сгорания в результате переработки увеличивается за счет повышения удельного содержания углерода и лимитируется приростом зольности.

Таблица 1.2 Характеристики таловского угля и композитного топлива, полученного на его основе [47]

Теплотехнические характеристики	Исходное сырье	Композитное топливо
Рабочая влажность W_t^r , %	51,0	менее 4
Зольность на сухую массу A^d , %	25,9	32,1
Выход летучих на сухую беззольную массу V^{daf} , %	63,2	10,6
Низшая теплота сгорания Q_i^r МДж/кг	8,6	18,0

За счет размера брикетов, превышающих проемы в колосниковой решетке, и их прочности наиболее эффективно применять данную технологию на объектах, эксплуатирующих котлы со слоевыми топками, и особенно эффективно при переработке угольного штыба (отходов при угледобыче).

Применительно к Таловскому месторождению привлекательной казалась также технология подземной газификации угля [52]. Несмотря на то, что данная технология до сих пор является редко применяемым способом разработки месторождений твердых горючих ископаемых, она открывает возможности для использования пластовых залежей малой мощности, а также при сложных горно-геологических условиях их залегания.

В исследовании представлена одна из практических схем [53]: в скважине, пробуренной через угольный пласт, размещается конструкция типа «труба в трубе» [52]. Через внутреннюю трубу к подошве пласта нагнетается паровоздушная смесь, нагретая до определенной температуры. Спустя некоторое время вблизи выходного торца трубы образуется локальная область угольного пласта, в которой развиваются химические процессы конверсии. Генерируемые газообразные

продукты через перфорации внешней трубы поступают в межтрубное кольцевое пространство и выводятся из-под земли на поверхность.

Методом математического моделирования для такой технологической схемы проанализирован состав газа в зависимости от параметров паровоздушного агента, нагнетаемого в угольный массив. Результатом такого исследования явилась зависимость концентрации горючих компонентов в получаемых продуктах газификации от температуры и соотношения компонентов в подаваемой в пласт паровоздушной смеси [54, 55]. За счет увеличения концентрации кислорода возможен прирост содержания оксида углерода в горючей смеси в 1,5 раза. При этом массовые концентрации остальных компонентов получаемого газа остаются практически мало изменяемыми [54].

В результате дальнейшего увеличения концентрации кислорода происходит смена режима и образуется область горения. Температура в этой области повышается даже при подаче в угольный пласт после зажигания относительно холодной паровоздушной смеси. Повышение температуры в угольном пласте приводит к увеличению концентрации горючих газов на выходе из скважины и в области максимальной температуры. Концентрация водорода тоже возрастает в 3-4 раза, а в области максимальной температуры в 9 раз. Концентрация метана при этом не изменяется и остается на одном уровне в области газификации [54].

Результаты, полученные по представленным направлениям, дают определенные основания для проведения расчетных исследований, нацеленных на рациональное использование таловского угля в энергетике.

1.4 Опыт сжигания низкосортных углей в котлах электрических станций

Вопросы совершенствования сжигания низкосортных видов топлива остаются актуальными, особенно в свете мировой тенденции на развитие и внедрение экологически чистых технологий на предприятиях топливно-энергетического комплекса.

Российский опыт сжигания низкосортных твердых топлив берет свое начало с 20-х гг. XX века, когда возникла необходимость освоения широкой номенклатуры разнообразных топлив для реализации плана ГОЭЛРО [56]. Все попытки максимально эффективно использовать местные топлива с низкой теплотворной способностью, высокими влажностью и зольностью в итоге обеспечивали превосходство СССР над зарубежным котлостроением.

Развитие котельной техники первой половины XX века в СССР было связано с участием конструкторских коллективов котлостроительных заводов и научно-исследовательских институтов, организованных в 20–30 годы. В числе известных и ныне Теплотехнический институт (ныне Всероссийский теплотехнический институт (ВТИ), г. Москва), Центральный котлотурбинный институт (НПО ЦКТИ, г. Санкт-Петербург). Эти институты совместно с Энергетическим институтом имени академика Г.М. Крижановского (ЭНИИ), Московским энергетическим институтом (МЭИ) проводили систематические научные исследования, обеспечившие прочную научную базу отечественного котлостроения по низкосортным твердым топливам. Не случайно уже тогда Советский Союз вышел на передовые позиции в мире по разработке и внедрению промышленного сжигания торфа в топках крупных для того времени паровых котлов.

В 1921 году на Шатурской электростанции впервые опробываются шахтно-цепные топки для сжигания кускового торфа, разработанные профессором Т.Ф. Макарьевым. В 1931 году Л.К. Рамзиным предлагается конструкция прямоточного безбарабанного парового котла, успешные испытания которого позволили спроектировать и построить крупнейший в мире прямоточный котлоагрегат на челябинском буром угле [57].

В те же годы Г.Ф. Кнорре разработана теория циклонного сжигания и создана циклонная топка для сжигания лузги и торфа [58]. При участии Г.Ф. Кнорре и других сотрудников ЦКТИ А.А. Шершнев создает первую циркуляционно-вихревую топку для сжигания фрезерного торфа во взвешенном состоянии без предварительной сушки и дробления [59, 60].

В дальнейшем было разработано множество разных модификаций топок [61]. Таким образом, большую известность в 60–70-е годы получают топки МЭИ с пересекающимися струями [62], гамма-топка ВТИ со встречно-наклонным расположением горелок [63], вихревая топка ЦКТИ [64] и топка с низкотемпературным вихрем ЛПИ [65].

Циклонные топки также широко применялись в США и ФРГ, где они значительно превышали по количеству использующихся в нашей стране. Тем не менее, к концу 70-х годов советские научные работы по модельным и стендовым исследованиям [66] уже не уступают зарубежным публикациям.

НТВ-сжигание изучается под руководством В.В. Померанцева с 1968 г., а в 1973 г. на этом принципе реализовывается сжигание бурых углей [67]. В начале 80-х гг. ведутся исследования прямоточно-вихревых топок МЭИ и кольцевой топки Сибтехэнерго. Наиболее перспективной разработкой, доведенной до реализации в виде головного котла, оказалась кольцевая топка Ф.А. Серанта [68–71].

Исследование вышеуказанных и других вихревых технологий сжигания углей разных марок применительно к реализации различных конструктивных подходов к организации топочного процесса представляют научный и практический интерес до настоящего времени [72–78].

С 70-х годов прошлого века в мировой теплоэнергетике широко применяются топочные устройства, реализующие технологию, базирующуюся на принципах псевдоожигенного слоя: топки со стационарным кипящим слоем, аэрофонтанные и с т.н. пульсирующим слоем, топки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Технология ЦКС успешно внедрена и активно применяется в США, Китае, Польше, Финляндии, Швеции и Германии.

В нашей стране известны работы 60-х годов по псевдоожигенному слою для химической промышленности и металлургии. Начиная с 1989 г., ОАО ВТИ при участии Института проблем энергосбережения АН Украины, КазНИИЭнергетики, Уральского политехнического института, Института теплофизики СО РАН проводит исследования по внедрению технологии ЦКС в российскую энергетику.

Многолетние наработки представлены в работе Г.А. Рябова [79], являющейся основой для проектирования отечественных котлов с ЦКС.

Монтаж первого в России котла с ЦКС ТКЗ «Красный котельщик» произведен в начале 2016 года на Новочеркасской ГРЭС, что может послужить отправной точкой широкого внедрения технологии ЦКС в нашей стране.

Эффективность факельного метода сжигания доказана ВТИ еще в 30-е годы и сегодня также имеет определённое развитие, в частности, по экологически чистым технологиям [80]. С учетом этого и всецелой распространенности использования пылевидное сжигание остается востребованным в энергетике страны.

В энергетике ряда стран распространены схемы двухступенчатого сжигания углей ухудшенного качества, в которых в первой ступени осуществляется термическая подготовка (чаще всего в кипящем слое), а во второй ступени – полное дожигание в факельном режиме (в основном в камерных или вихревых топках). Для низкорекреационных углей в первой ступени реализуется термическая обработка топлива, частичная газификация и сжигание, а во второй – пылевидное сжигание в камерной топке.

Также не стоит исключать из внимания известную с 50-х гг. прошлого столетия технологию водоугольного топлива (ВУТ). В настоящее время данная технология освоена в США, Канаде, Китае и других странах, где введены значительные мощности по реализации ВУТ. Наиболее масштабным и продуктивным опытом в России была транспортировка ВУТ из г. Белово и сжигание на Новосибирской ТЭЦ-5, но проект проработал совсем недолго. Тем не менее, исследования по получению искусственного композитного топлива на водоугольной основе продолжаются в ряде научных институтов и университетов [81–84].

В мировой практике, как и в России, имеется значительный опыт сжигания низкосортных топлив. Подобные топлива сжигают в топках энергетических котлов, оборудованных специальными системами приготовления, обеспечивающими необходимую сушку и измельчение. Так, в 1950-е гг. широкое

применение нашли схемы сжигания низкокалорийных и высоковлажных топлив с разделением пылегазового потока в пылеконцентраторах на высококонцентрированную пылевую взвесь и слабозапыленный сушильный агент. Среди известных данные схемы были применены в ФРГ, ГДР (ТЭС «Хаген-Вердер»), Греции (ТЭЦ «Птоломейс»), Австралии (ТЭС «Иеллорус»), Польше (ТЭС «Туров»), Венгрии (ТЭС «Дьендьеш»), Франции (ТЭС «Д'Ажюзан»), Румынии (ТЭС «Ровинари»), Югославии (ТЭС «Барановицы»). В СССР по подобным схемам сжигали башкирский бурый уголь (Кумертаунская ТЭЦ) и чихезский бурый уголь (Владивостокская ТЭЦ-2). Успешный опыт сжигания болгарских лигнитов (ТЭС «Марица-Восток-2») и бикинского бурого угля на Владивостокской ТЭЦ-2 послужил основой для оборудования схемами с пылеконцентраторами ТЭЦ «Марица-Восток-3» и Приморской ГРЭС [85].

50 лет назад отечественные тепловые станции отвечали мировым требованиям по надежности и экономичности работы. Отсутствие ввода новых мощностей, финансовая политика, а также ограниченная модернизация существующих мощностей способствуют отставанию России в разработке и внедрении высокотехнологичных и эффективных установок даже с учетом развития различных технологий угольной промышленности [86]. При этом, заострив внимание на данной проблеме, потребуются большие капитальные затраты на реконструкцию устаревшего оборудования. Минимализация затрат возможна при использовании имеющегося оборудования с оптимизацией основных процессов без масштабной реконструкции или замены.

1.5 Обоснование задач исследования

Современное понимание процесса «от идеи до воплощения» подразумевает такие этапы как: аналитические расчеты, математическое моделирование и/или численные эксперименты, стендовые/модельные испытания и практическое использование. Первые два этапа, благодаря достаточному уровню развития

вычислительной техники, реализуются в программных продуктах. В свою очередь, это удешевляет и сокращает время разработок, уменьшает объем экспериментальных исследований и позволяет совершенствовать разработку для более качественного достижения результата.

Обобщая вышеприведенный анализ, стоит констатировать, что имеется значительная база результатов исследований таловского угля, а также огромный опыт использования низкосортного топлива в энергетических котлах. А с учетом того, что таловский бурый уголь не имеет опыта промышленного освоения, но имеются данные о его качестве и составе, приоритетным способом исследования является численное моделирование.

Энергетическое использование топлив, подобных углю Таловского месторождения, возможно рассматривать как для установок малой и средней производительности в составе котельных промышленного и жилищно-бытового назначений, так и для котлов большой мощности тепловых электрических станций [10].

Как установлено ранее проведенными исследованиями, таловский уголь предположительно может быть доступен для энергетического использования в различных состояниях: от исходного после добычи до продуктов термической переработки. Учитывая целесообразность использования угля Таловского месторождения как местного топлива, на первый план выступают вопросы «привязки» к оборудованию, установленному на энергетических объектах региона. Из этих же соображений наибольший интерес представляет поиск вариантов использования таловского угля с минимальными затратами на реконструкцию основного и вспомогательного оборудования котельных установок. В круг вопросов также следует включить исследование по сжиганию таловского угля в смеси с уже принятыми к использованию на энергообъектах топливами. Изложенные соображения позволяют в соответствии с поставленной выше целью обозначить варианты монотоплив и топливных композиций, подлежащих исследованию. Таким образом, к рассмотрению принимаются следующие варианты: исходный уголь во всем диапазоне рабочей влажности; полукоксы,

полученный по технологии низкотемпературной паротепловой конверсии; смеси таловского угля с уже принятыми к сжиганию топливами в различных соотношениях.

С целью выявления, уточнения и конкретизации возможности энергетического использования таловского угля в агрегатах тепловых электростанций большой энергетики и на объектах малой энергетики сформулированы следующие задачи:

выполнить анализ работ по исследованию качественных характеристик угля Таловского месторождения и по энергетическому сжиганию подобных топлив;

провести численные исследования сжигания таловского угля в топочной камере пылеугольного котла исходя из условий его использования как местного топлива;

дать оценку влияния параметров топлива на процессы, протекающие в топочной камере пылеугольного котла;

провести сравнительную оценку технологических вариантов сжигания топлива применительно к топочным процессам исходя из минимизации затрат на реконструкцию;

предложить рекомендации по использованию таловского угля в качестве энергетического топлива.

ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика объектов исследования

Энергетические генерирующие мощности Томской области представлены объектами большой и малой энергетики. Суммарная установленная мощность энергосистемы Томской области по состоянию на 1 января 2022 года составляет 1036,4 МВт [87]. Основными энергоисточниками являются электростанции АО «СХК» (449 МВт – 43,3 % от суммарной установленной мощности) и АО «Томская генерация» (485,7 МВт – 46,9 % от суммарной установленной мощности): Томская ГРЭС-2 (установленная мощность 331 МВт), Томская ТЭЦ-3 (установленная мощность 140 МВт), Томская ТЭЦ-1 (установленная мощность 14,7 МВт). Остальные объекты суммарной мощностью 101,7 МВт представлены генерациями промышленных предприятий: ООО «Томскнефтехим», ОАО «Томскнефть» ВНК, ООО «Газпромнефть-Восток».

В промышленной теплоэнергетике представлены разнообразные котлы с преобладанием продукции Бийского котельного завода. Наиболее распространёнными котельными установками, эксплуатирующимися крупными объектами Томской области, являются котлы Барнаульского и Таганрогского котельных заводов паропроизводительностью 210–230 и 500 тонн пара в час.

Котельные агрегаты производства БКЗ занимали четверть рынка паровых котлов в РФ [88], поэтому в качестве объекта исследования выбран котельный агрегат стандартной серии котлов Барнаульского котельного завода (ныне ООО «Сибэнергомаш–БКЗ») [89] типа Е-220-100 (БКЗ-220-100-4), установленный на Томской ГРЭС-2 для сжигания угля Кузнецкого бассейна. Для сравнительной оценки результатов исследований выбран котельный агрегат типа Е-210-14 (БКЗ-210-140Ф), спроектированный для пылевидного сжигания бурого угля Чихезского месторождения с другой компоновкой и видом горелочных устройств, который

исследован ранее с использованием программного продукта FIRE 3D [90, 91]. Основные технические данные котлоагрегатов представлены в приложении II [92].

2.1.1 Котельный агрегат БКЗ-220-100-4

Котлоагрегат (рис.2.1, 2.2) с естественной циркуляцией и вертикально-водотрубным исполнением испарительных поверхностей нагрева, предназначен для пылеугольного (факельного) сжигания каменных углей с твердым шлакоудалением. Компоновка котлоагрегата выполнена по традиционной для отечественного котлостроения П-образной схеме.

Призматическая форма топочной камеры открытого типа образована четырьмя полностью экранированными стенами. Фронтальной и тыльной трубные экраны в своей нижней части переходят в скаты холодной воронки с углом наклона 50° . Боковые трубные экраны выполнены в одной плоскости по всей высоте топки и имеют проемы, образованные разводкой труб, для размещения выходных элементов горелочных устройств. Для уменьшения присосов воздуха в топку горелки подвешены к экранным трубам и при тепловых расширениях экранов перемещаются вместе с ними.

Всего в топке предусмотрено шесть круглых вихревых пылегазовых горелок, скомпонованных по схеме «треугольник вершиной вниз» по три штуки на каждой из боковых стен.

В верхней части топки трубами тыльного экрана образован выступ внутрь топочного объема в виде аэродинамического козырька, служащего для улучшения равномерности потока дымовых газов на выходе из топки при переходе в горизонтальный конвективный газоход и для частичного затенения ширм полурadiaционного пароперегревателя от прямого излучения из топки.

Над аэродинамическим выступом тыльный экран переходит в пароотводящие трубы, которые проходят сквозь газоход котла, создавая проход для выходящих из топки дымовых газов, и одновременно служат подвесками для тыльного экрана. Все остальные экранные блоки подвешены за верхние коллекторные камеры к потолочной раме каркаса котла. Благодаря подвешенному креплению экранов топочная камера при нагревании свободно расширяется вниз.

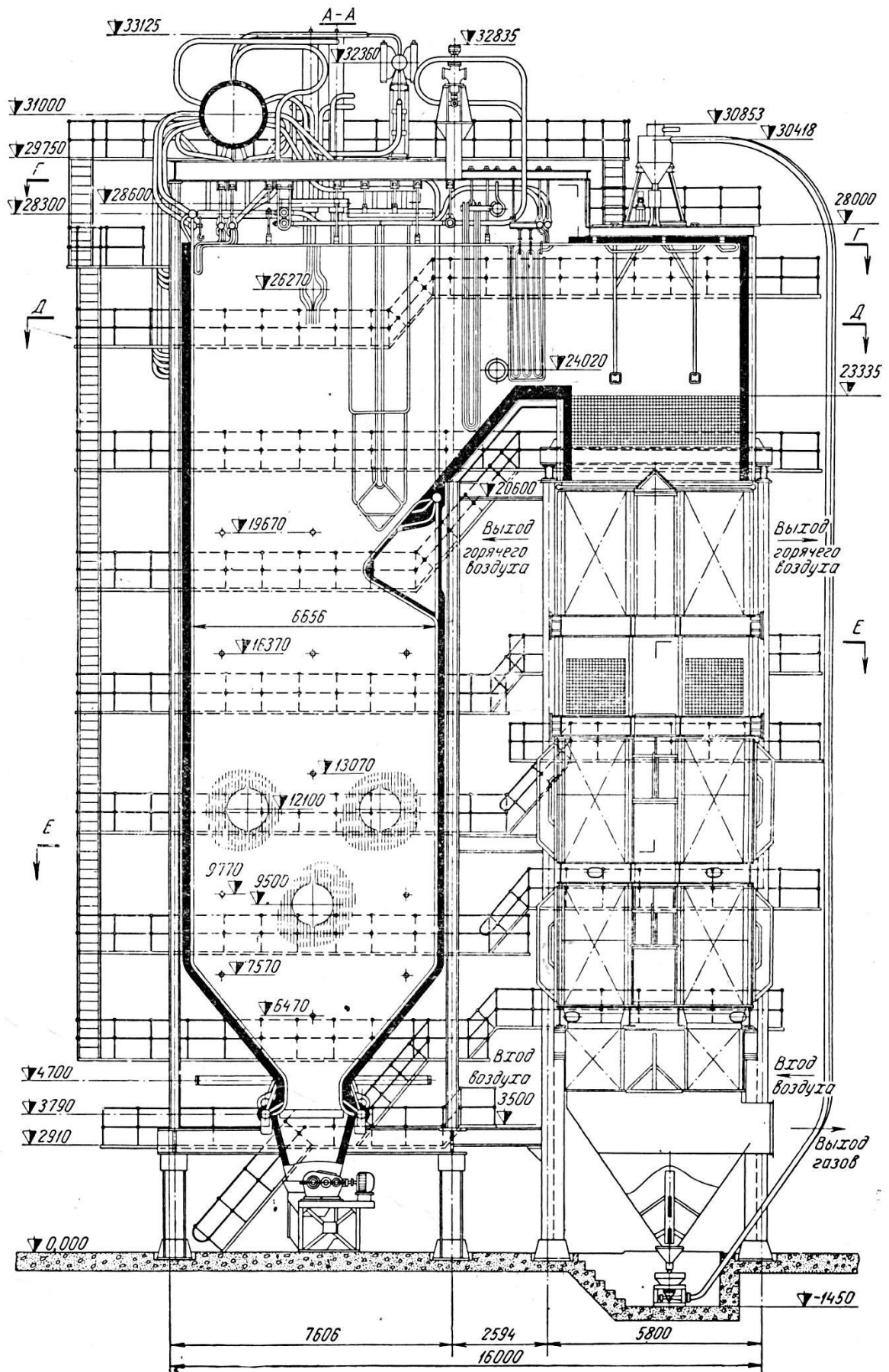


Рисунок 2.1 – Продольный разрез котла БКЗ-220-100-4

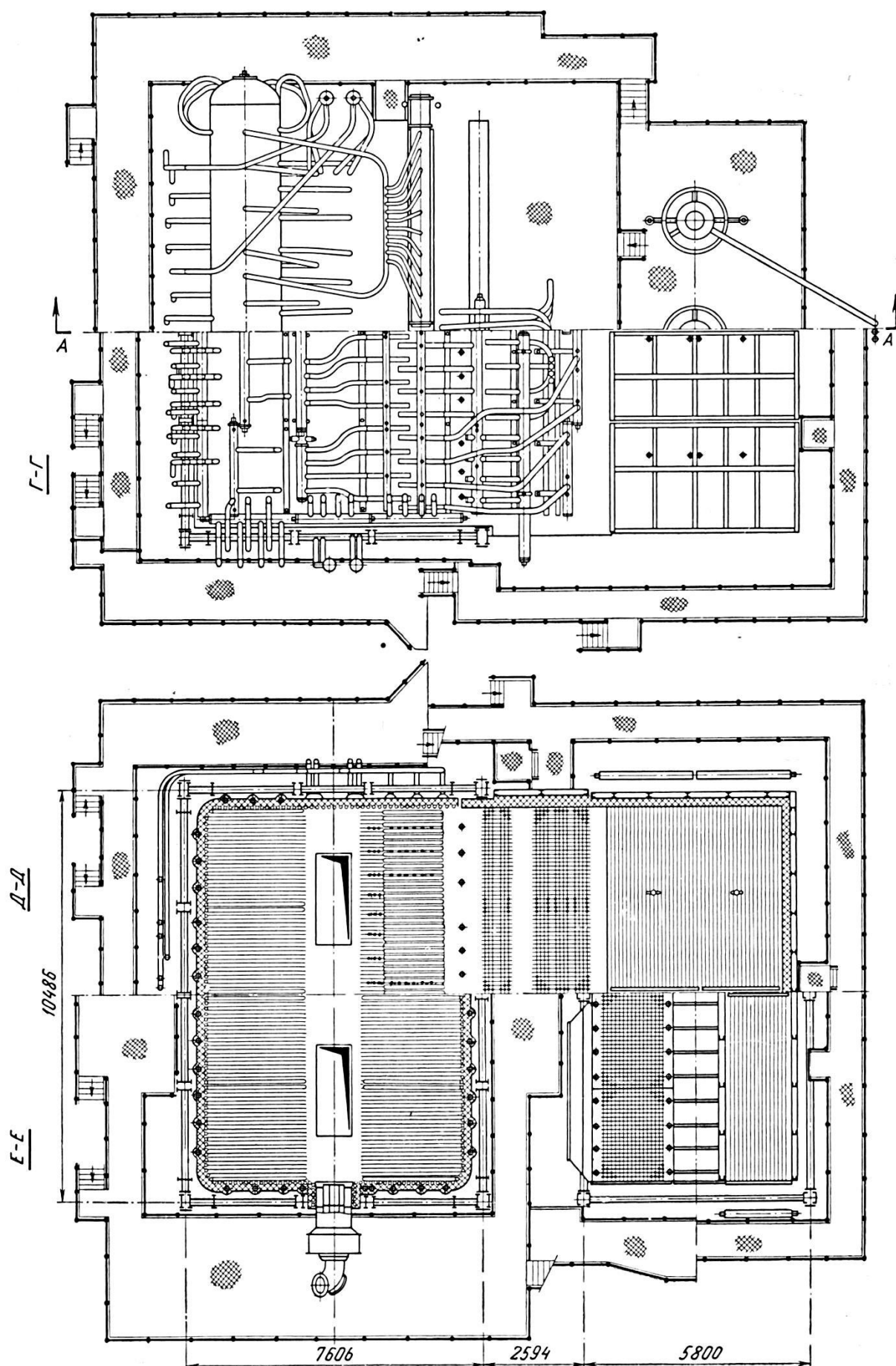


Рисунок 2.2 – Вид сверху и горизонтальные разрезы котла БКЗ-220-100-4

Пароперегреватель выполнен по типичной для котлов БКЗ схеме, по характеру тепловосприятия состоит из трех частей: радиационной, полурadiационной и конвективной. К радиационной части относится потолочный экран, занимающий верх топочной камеры и горизонтального конвективного газохода. Полурadiационную часть пароперегревателя составляют расположенные по ходу дымовых газов перед пароотводящими трубами тыльного экрана ширмы в количестве 16 штук. Конвективная часть пароперегревателя состоит из трех змеевиковых ступеней.

Температура перегретого пара регулируется путем впрыска в паровой тракт «собственного» конденсата, осуществляемого в двух ступенях пароохладителя. Первый впрыск производится «в рассечку» ширмовой ступени, а второй – перед выходной конвективной ступенью.

Опускной газоход или конвективная шахта, вмещает низкотемпературные поверхности нагрева: две ступени водяного экономайзера и две ступени воздухоподогревателя. При этом вторая по ходу воды ступень экономайзера занимает всю глубину конвективной шахты, которая после этого разделена на два параллельных газохода. В них находятся по ходу дымовых газов: вторая ступень воздухоподогревателя, первая ступень водяного экономайзера и первая ступень воздухоподогревателя.

Котел оборудован двумя индивидуальными замкнутыми системами пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) и промежуточным пылевым бункером.

В процессе эксплуатации котел был приспособлен к сжиганию природного газа. Для этого проектные вихревые горелки были реконструированы в пылегазовые, что позволяло нести нагрузку полностью на природном газе или при сжигании угольной пыли, а также при различном соотношении этих топлив.

2.1.2 Котельный агрегат БКЗ-210-140Ф

Котлоагрегат (рис. 2.3, 2.4.) с естественной циркуляцией предназначен для сжигания бурого угля в пылеугольном факеле. Проект котла характеризуется высокой степенью унификации с другими конструкциями котлов завода-

изготовителя, которая особенно проявляется в компоновочных решениях. Это предопределило высокую степень внешнего сходства с основным котлом БКЗ-220-100-4, исследуемым в настоящей работе. Отличия, обусловленные более высокими параметрами перегрева пара и другими свойствами бурого угля, проявляются в основном в габаритных характеристиках топки и конвективных газоходов, а также в конструктивном исполнении ступеней пароперегревателя.

Наиболее существенным отличием в свете поставленных задач данного исследования является тип горелочных устройств и их компоновка в зоне активного горения. На котле установлены прямоточные щелевые горелки с расположением их по углам топки по тангенциальной схеме, т.е. с направленностью осей горелок по касательной к условной окружности диаметром 900 мм в центре горизонтального сечения топки. Это предопределяет взаимодействие горелочных струй с созданием вращательного движения факела и является часто применяемым решением для организации внутритопочных процессов при сжигании высокорекреакционного угля.

Тракт дымовых газов котла выполнен по П-образной компоновочной схеме, в которой первым (восходящим) газоходом является топочная камера, к нему примыкает верхний горизонтальный газоход, который соединен с нисходящим газоходом конвективной шахты.

Топочная камера имеет призматическую форму с прямоугольным сечением, её стены полностью экранированы вертикально-водотрубными панелями, составляющими 14 независимых блоков. В нижней части фронтальной и тыльной экраны образуют скаты холодной воронки. В верхней части тыльного экрана из его труб образован аэродинамический выступ внутрь топки глубиной 0,25 от глубины топки с теми же функциями, что и в топке котла БКЗ-220-100-4.

При нагревании топочная камера свободно удлиняется вниз за счет подвешивания блоков фронтального и боковых экранов за верхние коллекторы к потолочной раме каркаса. Тыльный экран подвешен к пароотводящим трубам, которые проходят через горизонтальный газоход и таким

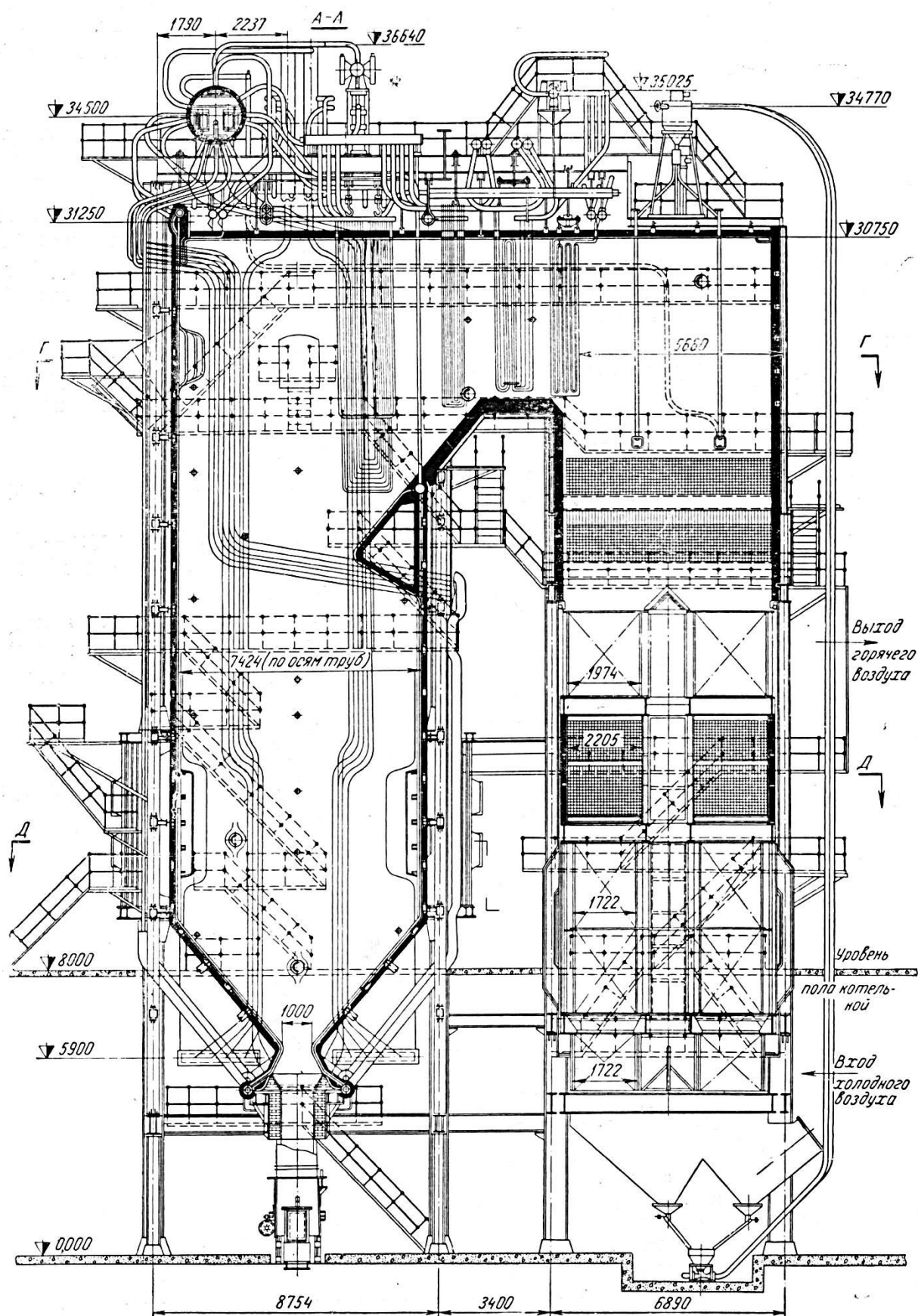


Рисунок 2.3 – Продольный разрез котла БКЗ-210-140Ф

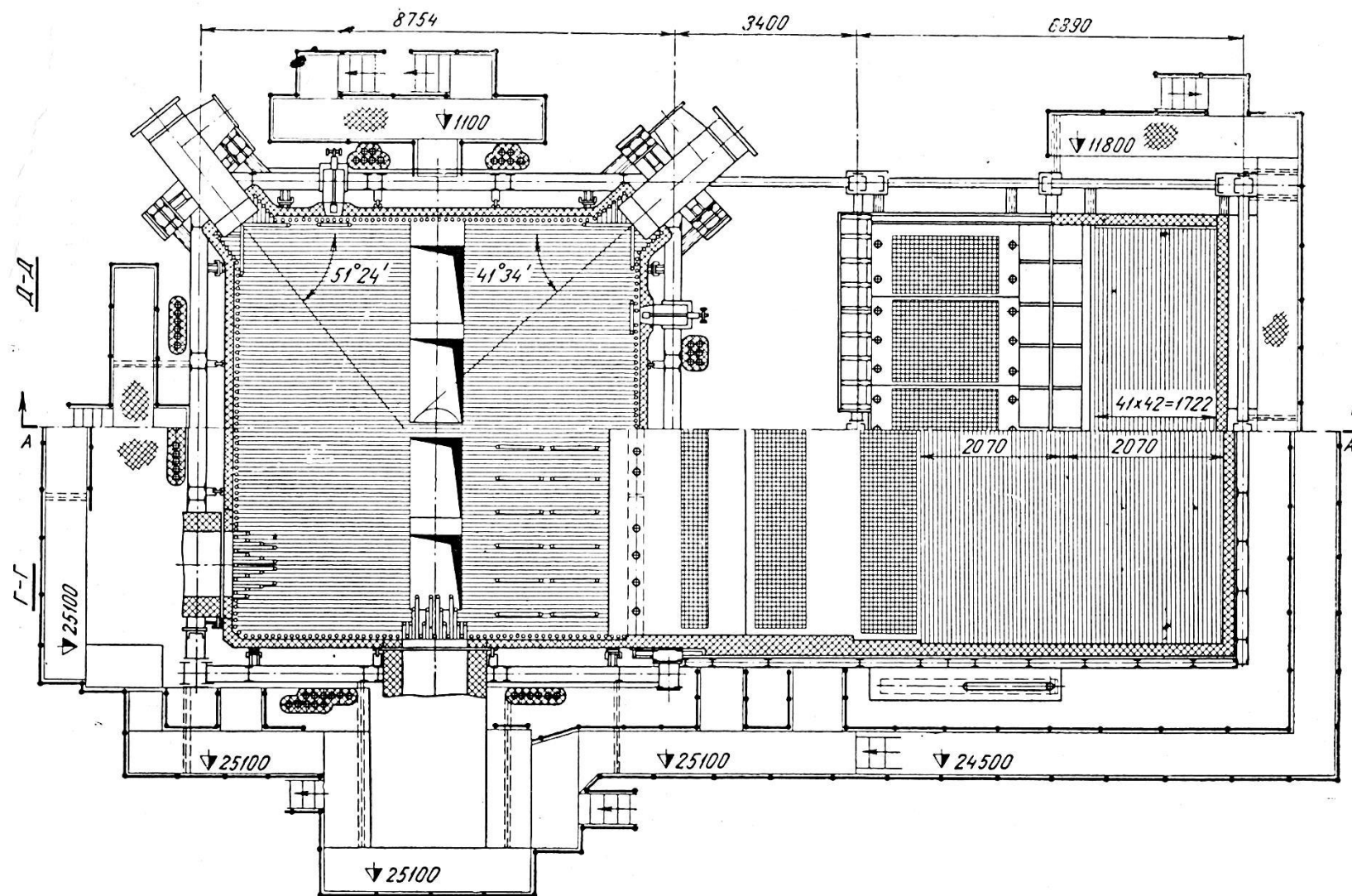


Рисунок 2.4 – Горизонтальные разрезы котла БКЗ-210-140Ф

образом создают проход для дымовых газов из топочной камеры.

Пароперегреватель состоит из четырех ступеней перегрева. Первая ступень – радиационная, состоит из потолочных труб. Вторая ступень – «холодный» конвективный пакет змеевиковых труб на выходе дымовых газов из горизонтального конвективного газохода. Третья ступень – полурadiационная, состоит из ширм на выходе дымовых газов из топки. Выходная по пару конвективная ступень расположена в горизонтальном газоходе и состоит из двух прямоточных змеевиковых пакетов. Для регулирования температуры перегретого пара установлен впрыскивающий пароохладитель, состоящий из двух ступеней: первая ступень – «в рассечку» ширмового пароперегревателя, вторая – перед выходной ступенью конвективного пароперегревателя.

Конвективная шахта представляет собой унифицированную для серийных котлов БКЗ конструкцию с двумя ступенями водяного экономайзера и двумя ступенями воздухоподогревателя, которая скомпонована таким образом, что позволяет всему опускающему газоходу свободно расширяться (удлиняться) вверх. Тепловое расширение воспринимается линзовым компенсатором. При этом входные по воздуху кубы воздухоподогревателя, как наиболее подверженные низкотемпературной серной коррозии, выполнены сменяемыми.

2.2 Выбор программного продукта

Современные научные исследования во многих областях уже не представляются без применения компьютерного математического моделирования, поскольку являют собой исследование объекта в виде математической модели с применением вычислительно-логических алгоритмов, отражающее особенности реального объекта, процесса или явления.

Математическое моделирование берет свое начало со времен появления точных наук, а некоторые методы вычислений носят имена таких знаменитых ученых, как Ньютон и Эйлер. Стремительное развитие моделирование получило в

середине XX века с появлением ЭВМ (компьютеров) и по «социальному заказу» – национальных программ СССР и США в период холодной войны [93]. Другими словами, компьютерное моделирование родилось от потребности изучения явлений и процессов, когда натурный эксперимент невозможен, слишком опасен или просто неосуществим [94].

На сегодняшний день широкое внедрение результатов математического моделирования обусловлено следующими основными факторами [95]:

повышение уровня сложности исследуемых задач, при изучении которых нередко требуется новое оборудование;

высокие экономические и энергетические затраты на работу и обслуживание экспериментальных установок и объектов;

необходимость решения проблем, с одной стороны, оптимизации эффективности работы оборудования, с другой, – отрицательного воздействия на окружающую среду;

сокращение временных затрат на проведение вариативных исследований и получение многовариантных результатов.

Современная вычислительная техника, применяемые методы численных исследований и наличие специализированных программ позволяют проводить сложные многопараметрические расчеты с получением согласующихся с экспериментами результатов и выполнением их визуализации. Тем самым обуславливается актуальность использования численного моделирования в теплоэнергетике как способа получения информации, в частности, об основных процессах, протекающих в топочной камере котлоагрегата. Такие данные необходимы при:

проектировании новых, реконструкции/модернизации существующих котлоагрегатов и совместно работающего оборудования;

экспертной оценке, разработке рекомендации для различных технических решений (при переводе на новый вид топлива или смесь, изменении технологии сжигания, режимов работы и т.д.) [96];

дополнении и уточнении данных при ограниченном объеме измерений и испытаний;

разработке новых решений для надежной, эффективной и экологичной работы оборудования.

На данный момент в мире существует ряд программных продуктов для исследования и анализа газодинамических и теплофизических процессов, применимых для исследования топочных процессов (табл. 2.1).

Таблица – 2.1. Наиболее распространенные программные продукты, применяемые для исследования процессов при сжигании топлив

	Зарубежные	Отечественные
Коммерческие	«ANSYS FLUENT» и «ANSYS CFX» (ANSYS Inc.) [97], «STAR-CD/STAR-CCM+» (Siemens AG) [98], FLOW-3D (Flow Science, Inc.) [99], Open FOAM (OpenCFD Ltd.) [100]	«Flow Vision» (ТЕСИС) [101], «ЛОГОС» (РФЯЦ ВНИИЭФ) [102], «Gas Dynamics Tool» (GTD Software Group) [103]
Некоммерческие	Пакеты крупных университетов и научно-исследовательских институтов для внутреннего пользования	VP2/3 [104], SigmaFlow [105], SINF [106], FIRE 3D [107] и др.

Для моделирования котлоагрегатов активно применяются ANSYS FLUENT [108, 109] из числа коммерческих программных продуктов, среди некоммерческих – специальные пакеты прикладных программ для моделирования топочных устройств – SigmaFlame и FIRE 3D.

FLUENT является наиболее развитым универсальным программным модулем, позволяющим моделировать поведение жидких и газообразных структур, учитывая турбулентность, тепломассообмен и химические реакции. С помощью данного модуля возможно решать широкий спектр задач в энергетической, нефтегазовой, медицинской и других областях [97].

Универсальные программные комплексы используют мощные программные средства и модели, а для описания еще не охваченных моделированием технологических процессов создаются специальные математические модели. Последнее усложняет работу над получением качественных расчетов с минимальной возможностью ошибок и требует специального обучения. Кроме того, большинство доступных прикладных программ являются коммерческими и их использование на безвозмездной основе невозможно.

Специализированные программные комплексы научных групп университетов и институтов имеют ряд преимуществ [110], в частности, адаптированность продукта для решения конкретных задач, например, в технологиях топливосжигания, что позволяет его использование специалистами без глубоких знаний в области математического моделирования.

SigmaFlame – специализированный программный комплекс, разработанный на основе ядра кода SigmaFlow [111] Красноярским филиалом Института теплофизики СО РАН. Разработанная комплексная математическая модель физико-химических процессов в топочных камерах котельных агрегатов включает подмодели: пространственной турбулентной аэродинамики; конвективного теплообмена и теплообмена излучением; движения и выгорания пылеугольного топлива; горения летучих в газовой фазе; образования окислов азота; формирования шлаковых отложений на поверхностях нагрева [112].

FIRE 3D – программа расчета аэродинамики, горения и теплообмена в топках котлоагрегатов и газоходах, состоящая из пяти приложений [113, 114], содержит необходимый комплекс моделей для расчета аэротермохимических процессов, позволяет определить коэффициент шлакоулавливания и зоны шлакования поверхностей нагрева [115], провести параметрические расчеты для оценки образования окислов азота [116]. А учет выхода влаги из частиц угля, перемещающихся по топочному объему [117], позволяет моделировать процессы сжигания высоковлажных топлив, в частности, бурых углей. Данная возможность в сумме с доступностью и апробированностью программы среди студентов и

сотрудников ТПУ и ТГУ, практическим интересом к возможности дальнейшего продвижения на новые объекты обуславливает выбор FIRE 3D в качестве программного продукта для проведения исследований.

Математическая модель, реализованная в программном продукте FIRE 3D, в своей основе разработана А.М. Бубенчиковым и А.В. Старченко [118], и использована в различных прикладных исследованиях топочных процессов [117, 119–124]. В основе выбранной модели исследования лежит Эйлеро-Лагранжев способ описания физико-химических процессов газодисперсной среды [115]. Эйлеров подход применяется для описания процессов горения и теплообмена посредством пространственных уравнений тепломассообмена, энергии, импульса, концентраций газовых компонентов. Движение и массовые переходы отдельной угольной или золовой частицы представлены способом Лагранжева описания. Характеристики турбулентности газовой фазы описываются двухпараметрической моделью $k - \varepsilon$. Лучистый теплообмен в топке описывается на основе метода приближения сферических гармоник (P1). Образование оксидов азота описывается по кинетической схеме Митчелла и Тэрбелла [116].

Для достижения высокого качества численной модели необходимо высокоточное и полное описание внутритопочных процессов горения топлива, движения газов и частиц топлива, тепломассообмена.

2.3 Апробация модели численного исследования

Описание используемой модели представлено в Приложении III. Как показано выше, данная математическая модель имеет хорошую апробацию. Для адаптации модели к теме и объекту исследования необходимо проведение сравнительного анализа результатов моделирования и теплового расчета с имеющимися данными режимно-наладочных испытаний.

На стадии проработки различных конструкторских решений при наличии математической модели проведение исследований чаще всего состоит из следующих этапов [125]:

формирование базы исходных данных (геометрические параметры котла, информация по топливу, проектные характеристики котла, результаты испытаний котла и др.);

апробация модели исследования;

проработка вариантов и их моделирование;

анализ данных и определение оптимального варианта.

В качестве исходных данных в исследовании выступают геометрические параметры топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 (рис. 2.5) с плоскостями для визуализации по осям поперечного и продольного сечений, в горизонтальном сечении плоскость визуализации проходит на высотной отметке 10 м. К исходным данным также относятся характеристики кузнецкого каменного угля (табл. 2.2), при сжигании которого проводились режимно-наладочные испытания [126].

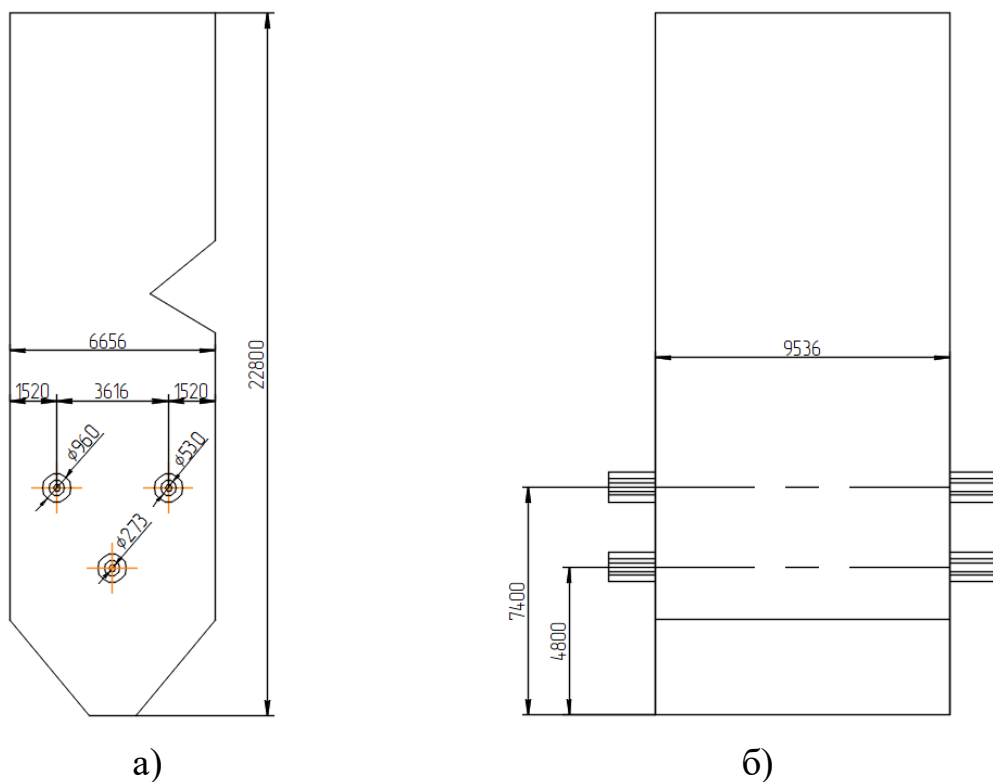


Рисунок 2.5 – Эскизная компоновка исследуемой топочной камеры (котел БКЗ-220-100-4): а) вид в продольном сечении, б) вид в поперечном сечении

Первоначально проводится поверочный тепловой расчет в программе TRAKT [127], алгоритм которой базируется на нормативных методах теплового расчета [128] и гидравлического расчета [129] котлоагрегата. Программа позволяет производить расчеты в широком диапазоне нагрузок и предусматривает расчеты на все виды топлива, в том числе смесь однотипных или разных топлив. В данном исследовании расчет производится на номинальную нагрузку, а для тестирования модели – на заданный состав топлива.

Таблица 2.2 – Характеристики кузнецкого каменного угля

W_t^r	A_t^r	V^{daf}	Q_i^r	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
%	%	%	МДж/кг	%	%	%	%	%
17,6	10,2	41,3	20,7	56,0	4,0	10,0	0,3	1,9

Вторым этапом проводится численный эксперимент в программном продукте FIRE 3D с целью исследования топочных процессов при сжигании каменного угля, сравнения с результатами режимно-наладочных испытаний и теплового расчета. Результаты, представленные в таблице 2.3, показывают незначительные расхождения анализируемых показателей, что доказывает адекватность используемой модели, заложенной в FIRE 3D.

Таблица 2.3 – 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	—
η	%	90,67	90,98	—
B_p	т/ч	23,80	24,74	23,76
ϑ_m''	°C	1199	1159	1174

Примечание: Q_k – теплопроизводительность котла, η – коэффициент полезного действия брутто, B_p – расход топлива, ϑ_m'' – температура на выходе из топочной камеры.

Далее численный эксперимент проводится с целью проверки точности расчета посредством моделирования на сетках разной степени измельчения. Таким образом, минимальное количество ячеек составило 965420, максимальное – 31417038. Сравнительный анализ этих численных экспериментов представлен распределением усредненных в горизонтальных сечениях значений температур (рис. 2.6) и концентрации кислорода (рис. 2.7) по высоте топочной камеры. Анализ показал достаточную сходимость, что дает основание для вывода о том, что размер ячеек в использованном диапазоне их количества не оказывает значительного влияния на получаемые параметры процессов, протекающих в топочной камере. На основании этого для проведения серий экспериментов принимается сетка с количеством ячеек равным 1487920.

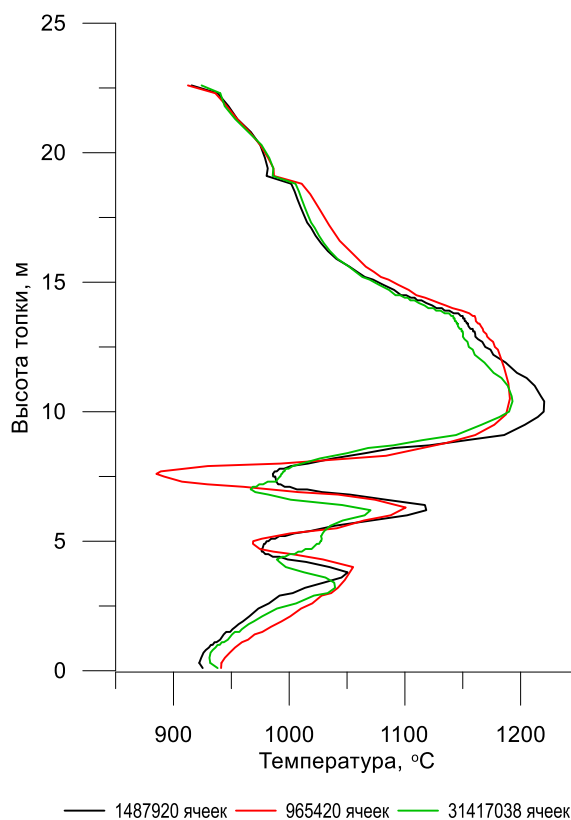


Рисунок 2.6 – Влияние количества ячеек расчетной сетки на получаемое распределение температур по высоте топочной камеры

Визуализация процессов, происходящих при сжигании кузнецкого угля в исследуемой топке, представлена аэродинамической структурой потока (рис. 2.8),

распределением температур (рис. 2.9) и концентрацией частиц (2.10) в поперечном, продольном и горизонтальном (на высотной отметке 10 м) сечениях.

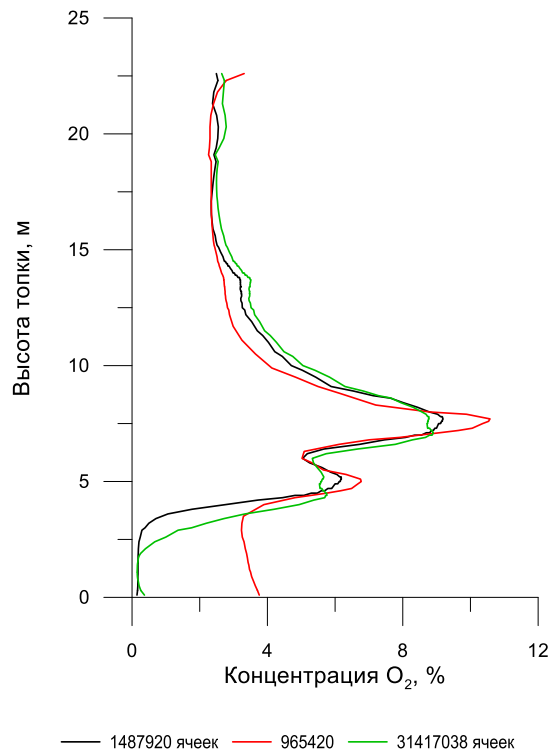


Рисунок 2.7 – Влияние количества ячеек расчетной сетки на получаемое распределение концентрации кислорода по высоте топочной камеры

Визуализация аэродинамической структуры потоков (рис. 2.8) показывает согласованность со схемой сжигания при встречном расположении вихревых горелок. Наблюдается почти осесимметричное распределение скорости потока по сечению топочной камеры.

Наличие в конструкции топки аэродинамического выступа позволяет выровнять поток продуктов сгорания в области выходного окна. Однако, на картине распределения скоростей видны локальные участки со слабым завихрением потока и участки с застойными зонами.

Распределение температур (рис. 2.9) по высоте топочной камеры равномерное и соответствует аэродинамической структуре потока, формируемой при встречном расположении горелок. Значения максимальных температур наблюдаются в зоне активного горения, по мере выгорания топлива температуры

снижаются. Достигнутый температурный уровень характерен для практики сжигания каменных углей марки Д. Формируемый единый устойчивый факел плотно прилегает к стенам топочной камеры, что может привести к более интенсивному процессу парообразования в экранных трубах.

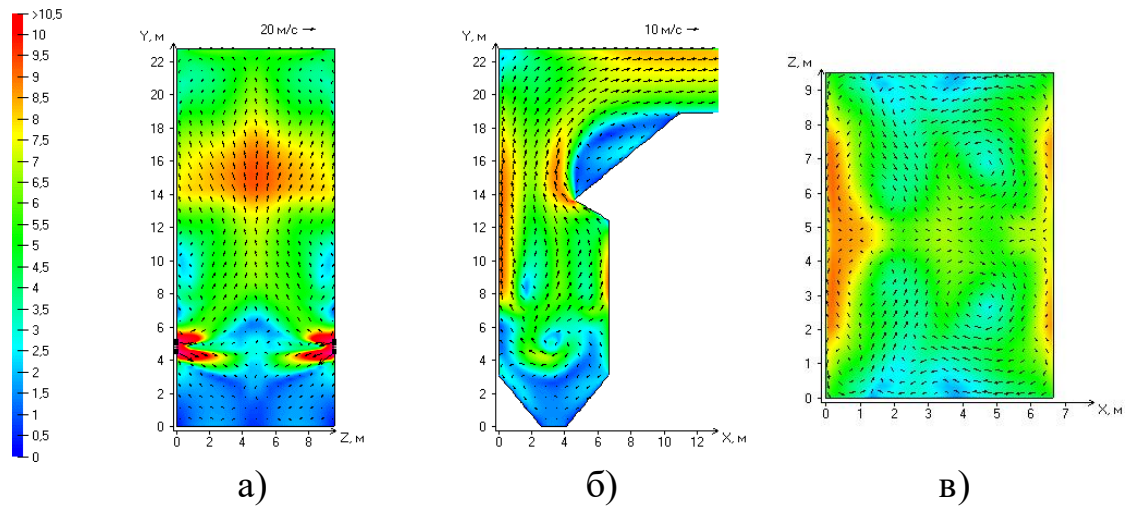


Рисунок 2.8 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях

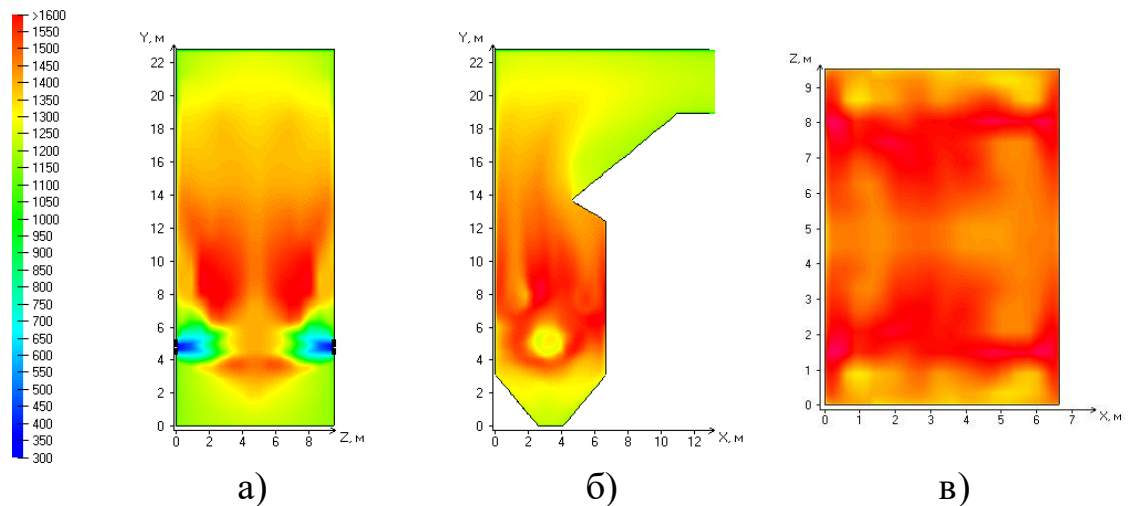


Рисунок 2.9 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях

Наибольшая концентрация частиц (рис. 2.10), естественно, наблюдается в зоне горелок. За счет достигаемого уровня температур в зоне активного горения вплоть до аэродинамического выступа и особенности аэродинамической структуры факела концентрация частиц выше горелок низкая. Из чего следует, что

сжигание происходит равномерно. При этом тенденция скопления частиц на скатах холодной воронки и в углах топочной камеры может привести к увеличению недожога топлива и шлакованию этих поверхностей нагрева.

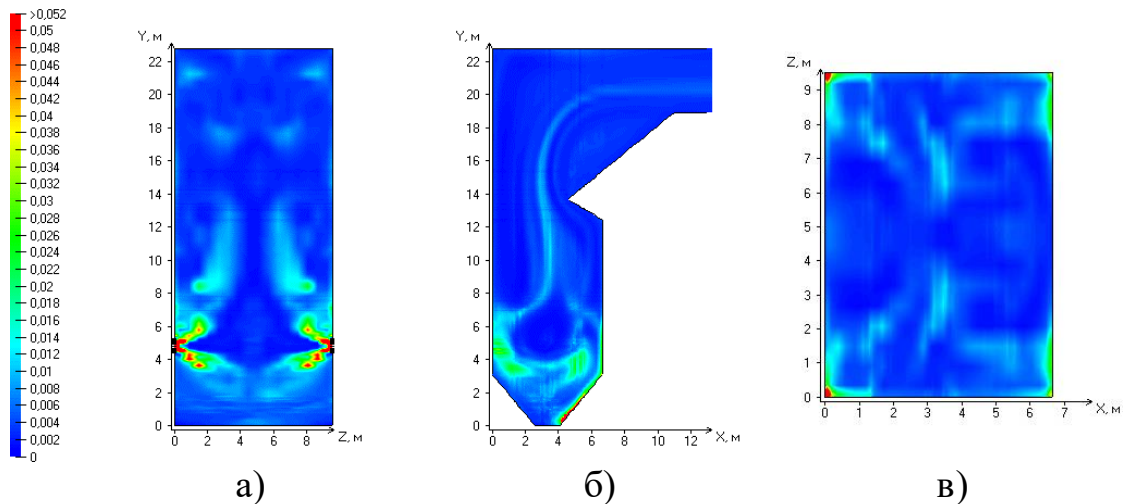


Рисунок 2.10 – Концентрация частиц (кг/кг) в поперечном (а),
продольном (б), горизонтальном (в) сечениях

Представленные результаты расчетов (табл. 2.3) и численных экспериментов доказывают обоснованность использования FIRE 3D для дальнейшего исследования.

2.4 Определяющие принципы исследования

Для достижения поставленных цели и задач проводятся исследования принятых к рассмотрению вариантов топлива согласно схеме, представленной на рисунке 2.11.

Исходный уголь рассматривается в диапазоне рабочей влажности от 20 % до 50 % с шагом в 5 % (табл. 2.4) [130–136]. 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 (табл. 2.5), таловского полукокса с кузнецким углем (табл. 2.6).

Также для сравнительного анализа проведено исследование сжигания таловского угля в исходном виде в топке котла БКЗ-210-140Ф (рис. 2.12) с угловым расположением прямооточных горелок [137,138]. Плоскости сечений для визуализации результатов численного моделирования выбраны по продольной, поперечной осям котла и по геометрической оси горелок в горизонтальной плоскости. К расчету принимаются два варианта с различным элементарным составом (табл. 2.7).

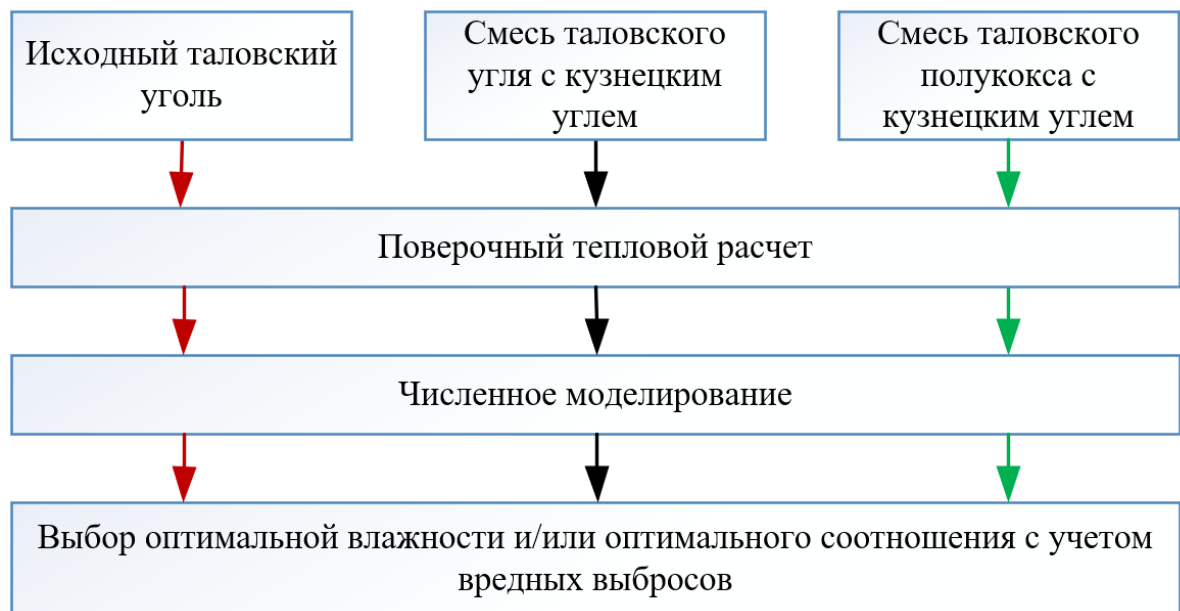


Рисунок 2.11 – Схема организации расчетного исследования

Таблица 2.4 – Характеристики таловского бурого угля при разной влажности

№ п/п	W_t^r	A_t^r	Q_i^r	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
	%	%	МДж/кг	%	%	%	%	%
1	20	29,53	15,398	32,59	3,41	13,79	0,10	0,58
2	25	27,69	14,283	30,55	3,19	12,93	0,09	0,55
3	30	25,84	13,168	28,51	2,98	12,07	0,09	0,51
4	35	24,00	12,053	26,47	2,77	11,21	0,08	0,47
5	40	22,15	10,938	24,44	2,56	10,34	0,07	0,44
6	45	20,31	9,823	22,40	2,34	9,48	0,07	0,40
7	50	18,46	8,708	20,36	2,13	8,62	0,06	0,37

Таблица 2.5 – Характеристики смеси таловского и кузнецкого углей

Соотношение	W_t^r	A_t^r	Q_i^r	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
	%	%	МДж/кг	%	%	%	%	%
10:90	18,34	11,95	20,041	53,45	3,92	10,30	0,28	1,76
20:80	19,08	13,70	19,376	50,91	3,84	10,58	0,26	1,63
30:70	19,82	15,45	18,710	48,36	3,75	10,88	0,24	1,50
40:60	20,56	17,19	18,044	45,82	3,68	11,17	0,22	1,36
50:50	21,30	18,94	17,379	43,27	3,60	11,47	0,20	1,22
60:40	22,04	20,70	16,713	40,73	3,51	11,76	0,17	1,09
70:30	22,78	22,44	16,047	38,19	3,43	12,05	0,15	0,96
80:20	23,52	24,19	15,381	35,64	3,35	12,35	0,13	0,82
90:10	24,26	25,94	14,716	33,10	3,27	12,64	0,11	0,68

Таблица 2.6 – Характеристики смеси таловского полукокса и кузнецкого угля

Соотношение	W_t^r	A_t^r	Q_i^r	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
	%	%	МДж/кг	%	%	%	%	%
10:90	16,84	12,34	20,437	55,84	3,63	9,27	0,27	1,72
20:80	16,08	14,66	20,167	55,69	3,25	8,54	0,24	1,54
30:70	15,32	16,89	19,896	55,53	2,88	7,81	0,21	1,36
40:60	14,56	19,12	19,626	55,37	2,51	7,09	0,17	1,18
50:50	13,8	21,34	19,356	55,22	2,13	6,36	0,15	1,00
60:40	13,04	23,57	19,086	55,06	1,76	5,63	0,12	0,82
70:30	12,28	25,81	18,816	54,90	1,39	4,90	0,09	0,63
80:20	11,52	28,03	18,545	54,74	1,02	4,18	0,06	0,45
90:10	10,76	30,26	18,275	54,59	0,64	3,45	0,03	0,27

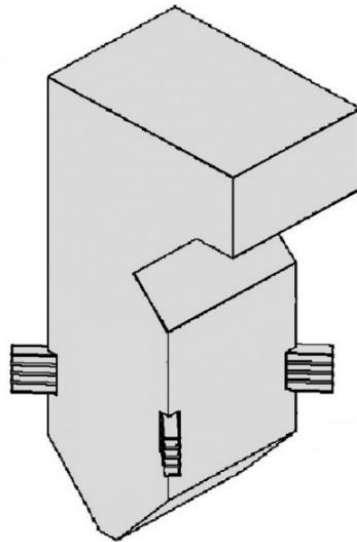


Рисунок 2.12 – Компоновка топочной камеры БКЗ-210-140Ф

Таблица 2.7 – Элементарный состав угля, принятого к расчету

Элементы	W_t^r	A_t^r	C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
	%	%	%	%	%	%	%
Вариант 1	50,7	18,2	20,08	2,1	8,5	0,06	0,3
Вариант 2	25,0	27,7	30,6	3,2	12,9	0,1	0,5

При численном моделировании рассматриваемых вариантов процесс подачи топлива с воздухом через выходные сечения горелочных устройств в топку принимается 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.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Топливо – таловский уголь в исходном виде

По результатам исследования представлены визуализированные поля распределения основных параметров, характеризующих процессы в топочной камере котла БКЗ-220-100-4: распределения концентрации водяных паров, кислорода, температур, аэродинамическая структура потоков и распределения частиц. Визуализации в виде контурных графиков с цветовой индексацией представлены в Приложении IV.

Концентрация водяных паров в объеме топочной камеры котла при влажности таловского угля $W_t^r = 20\%$ (рис. 3.1 и рис. IV.1) и 25% (рис. IV.2) в обоих случаях имеют близкие значения. Небольшая концентрация наблюдается на уровне горелок. При влажности $W_t^r = 30\%$ (рис. IV.3) видно увеличение значений концентрации влаги и в зоне горелок, и в верхней части топки выше горелочного пояса. Резкое повышение концентрации влаги приходится на вариант с влажностью $W_t^r = 35\%$ (рис. 3.2 и рис. IV.4). Наибольший выход влаги зафиксирован в пределах влажности топлива W_t^r от 40 до 50 % (рис. 3.3, рис. IV.5–IV.7), что закономерно для реальной картины горения высоковлажного топлива.

Процессы воспламенения пылевоздушной смеси интенсифицируются 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.

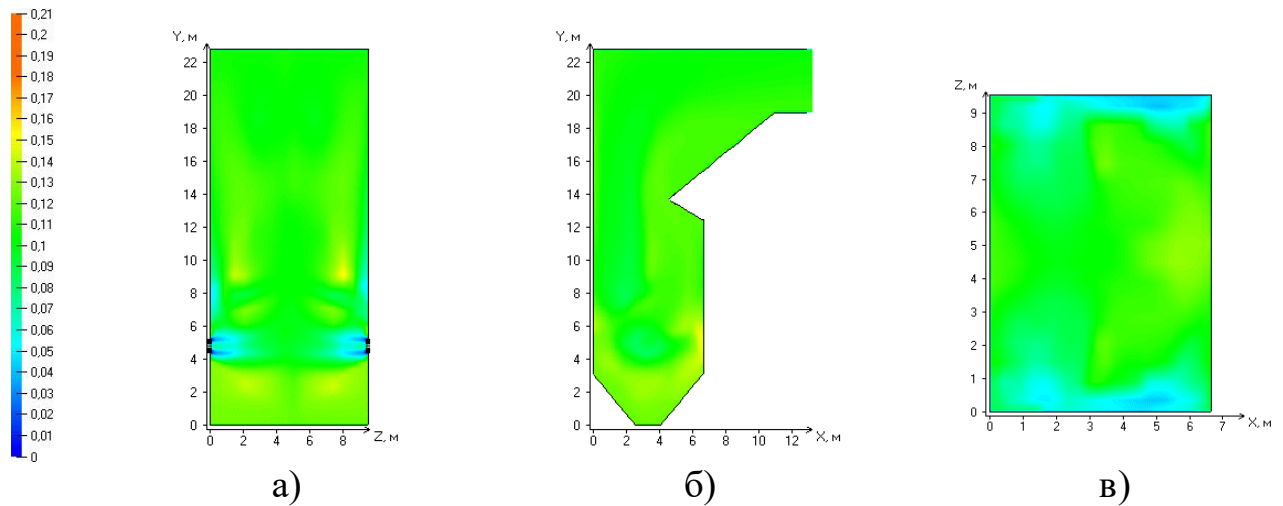


Рисунок 3.1 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 20\%$)

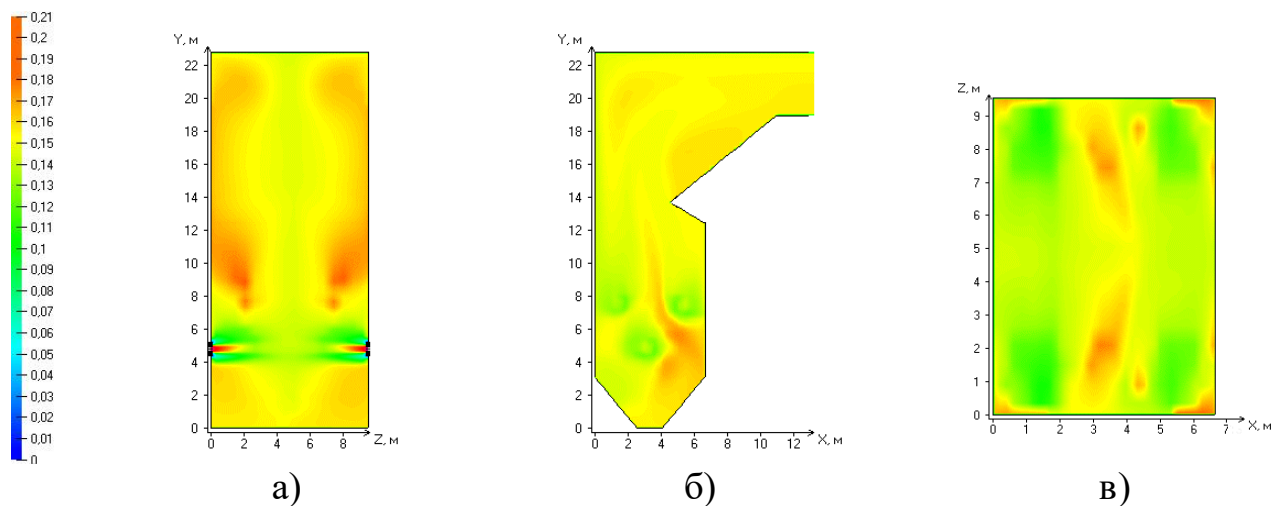


Рисунок 3.2 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 35\%$)

Картина аэродинамической структуры топочной среды (рис. 3.4–3.6, рис. IV.8–IV.14), выглядит вполне обусловленной со стороны организации и конструктивного воплощения схемы пылесжигания, реализованных в данной топочной камере. Несмотря на значительный диапазон влажности таловского угля, распределение скоростей в топке для этого диапазона имеет очевидные общие особенности, которые определяют возникновение восходящего скоростного потока в центральной части топочного объема.

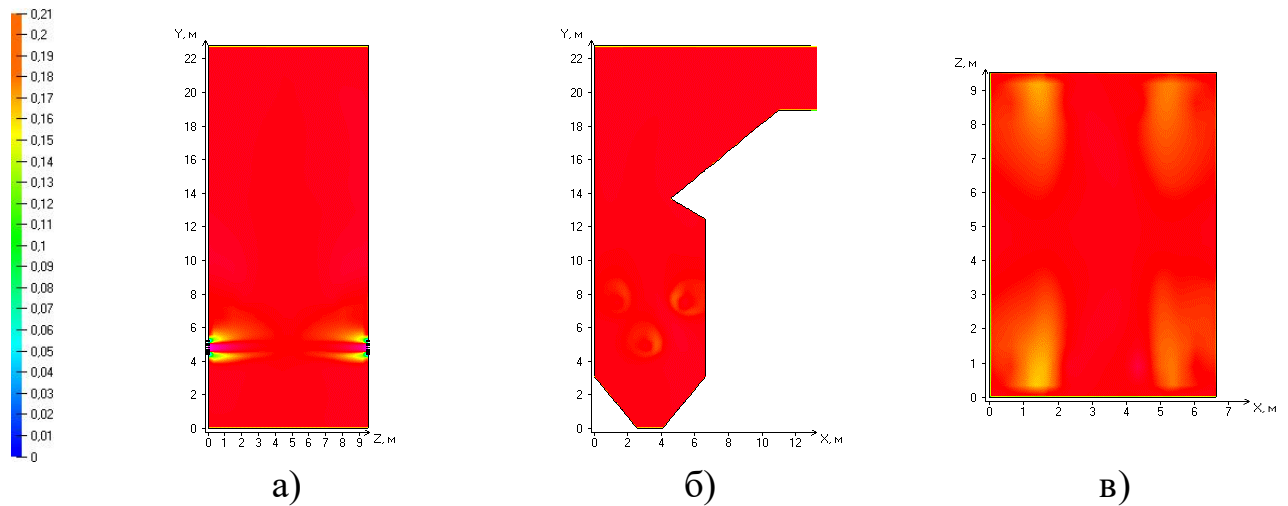


Рисунок 3.3 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 50\%$)

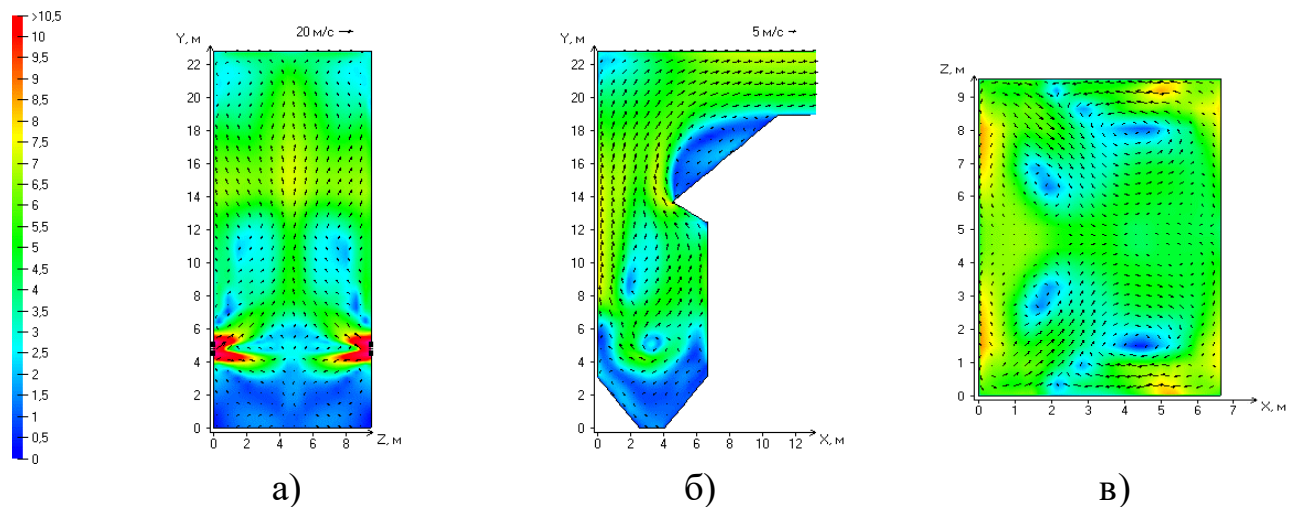


Рисунок 3.4 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 20\%$)

Следует отметить, что эти особенности менее выражены на графиках для влажности таловского угля $W_t^r \leq 20 \div 25\%$. На уровне выше горелочного пояса средняя скорость потока не превышает 10 м/с. По мере подъема факела основной поток распространяется вплоть до области, прилегающей к экранам поверхностей нагрева. В области аэродинамического выступа из-за уменьшения проходного сечения наблюдается закономерное увеличение скорости отклоняемого потока. Отклонение скоростного потока можно пронаблюдать также в области горелок нижнего яруса и холодной воронки. Данный эффект вызван

давлением, создаваемым здесь столкновением встречных скоростных потоков от горелок. В результате этого эффекта поток в зоне холодной воронки становится более насыщенным, а далее по мере продвижения в верх топочной камеры его структура выравнивается.

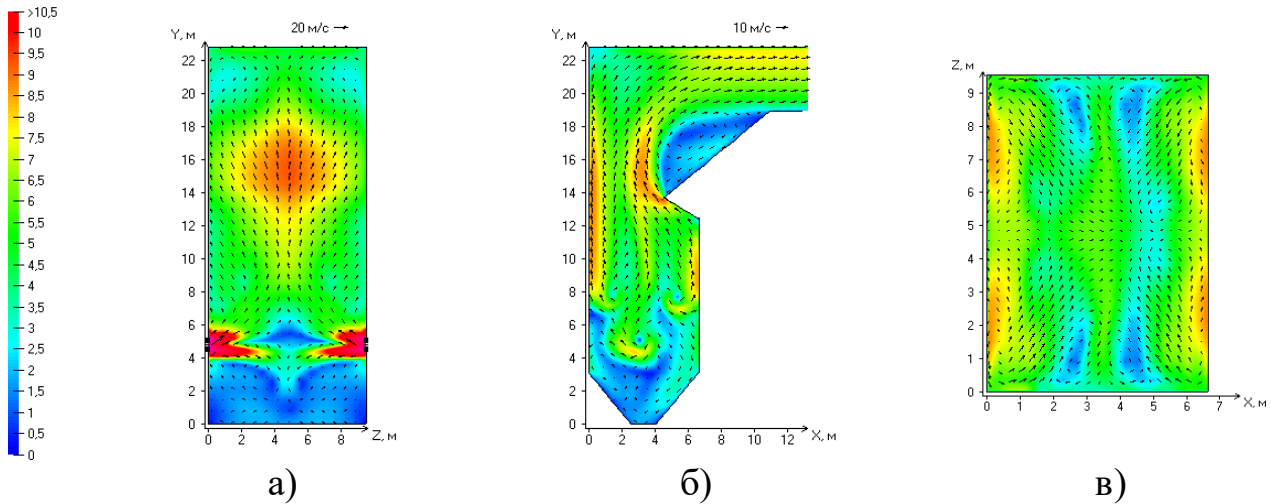


Рисунок 3.5 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 35\%$)

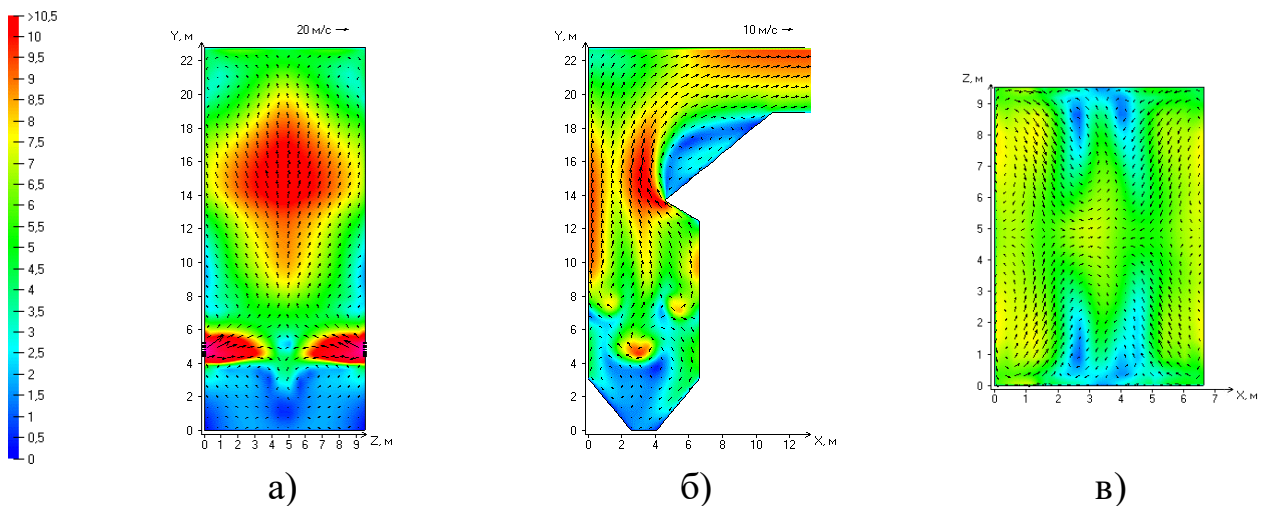


Рисунок 3.6 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 50\%$)

Распределение температуры в топочной камере котла БКЗ-220-100-4 при сжигании таловского угля (рис. 3.7–3.9, рис. IV.15–IV.21) имеет прямую зависимость от характеристик подаваемого в топку топлива. Теплотехнические характеристики таловского угля влияют на количество окислителя в зоне сгорания

топливных частиц, а, следовательно, и на эффективность процесса горения и общий температурный уровень внутри топочного объема. Вследствие низкой концентрации окислителя в варианте сжигания угля с влажностью $W_t^r \leq 40 \div 50 \%$ (рис. 3.9, рис. IV.19–IV.21) наблюдается затянутый процесс воспламенения и горения топливных частиц. В свою очередь, это может повлиять на технико-экономические показатели работы котельного агрегата: растут затраты тепла на испарение влаги из частиц топлива и увеличивается время на его прогрев, а в конечном итоге и потери тепла с механическим недожогом.

Затянутый процесс горения значительно влияет и на распределение температур в топке: видно (рис. IV.19 и IV.21), что в нижней части топочного объема и даже на уровне горелочного пояса температура фиксируется пределах от 1200 до 1350 К. По мере продвижения потока значения снижаются, в области выходного окна температурный уровень не превышает и 1000 К. Идентичный характер наблюдается у топлива с влажностью 35% (рис. 3.8, рис. IV. 18), при этом температуры чуть выше.

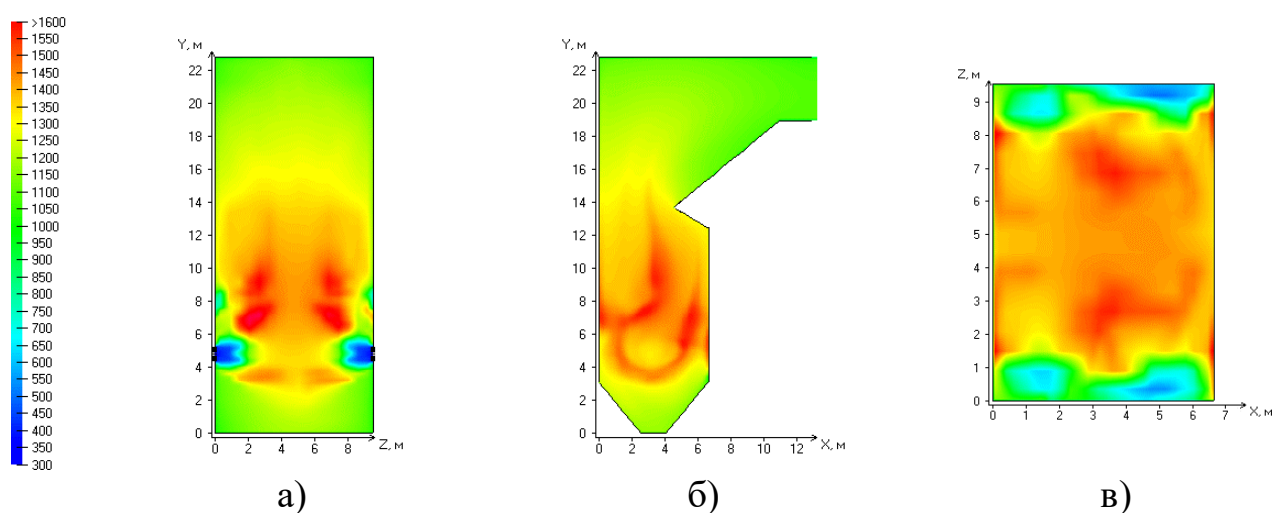


Рисунок 3.7 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 20 \%$)

Топливо с влажностью 25 и 30 % (рис. IV.16 и IV.17) обладает еще достаточно высокой реакционной способностью, чтобы интенсифицировать процессы воспламенения и горения в области горелочного пояса. Это позитивно

влияет на температуру в районе выходного окна и на входе в горизонтальный газоход и, как следствие, на надежность работы размещенных там поверхностей нагрева и котлоагрегата в целом. Значение температуры дымовых газов на выходе из топки по результатам численного моделирования для сжигания топлива составляет не более 1300 К.

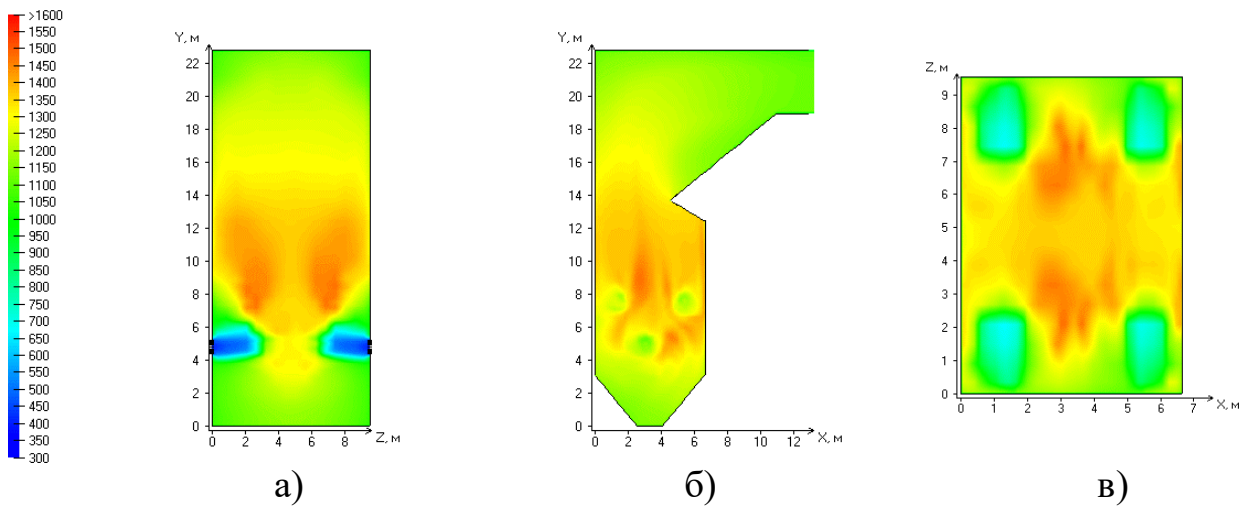


Рисунок 3.8 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 35\%$)

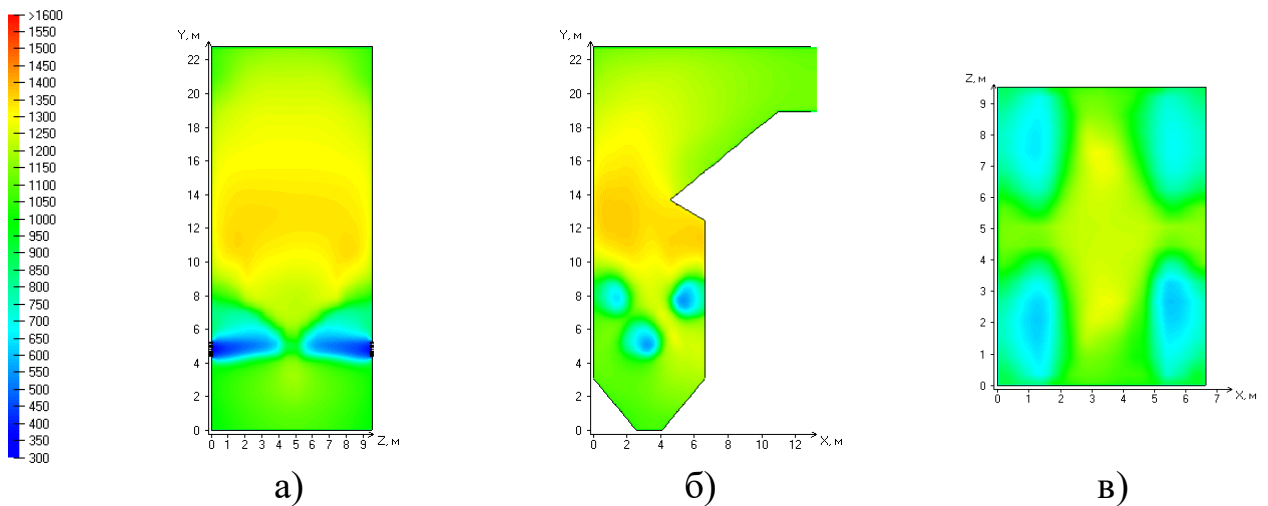


Рисунок 3.9 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 50\%$)

Результаты численного эксперимента (рис. IV.16 и IV.17) показывают, что протекающие процессы в топке симметричны в плоскости продольного сечения и

близки по характеру распределения с графиками концентрационных и температурных полей при сжигании кузнецкого каменного угля.

Графики распределения температур с влажностью топлива 20 % указывают на негативные стороны сжигания таловского угля даже в таком состоянии. Из рисунка 3.7 (IV.15) видно образование единого факела, область наибольших температур которого (около 1550 К) фиксируется в районе под аэродинамическим выступом. Далее температуры снижаются, и на выходе из топочной камеры на отметке 19,4 метра температура не превышает 1000 К. Такая картина распределения температур усложняет надёжную работу экранных поверхностей нагрева и может привести к высокотемпературной коррозии металла экранных труб.

Распределение дисперсных частиц в объеме топки (рис. 3.11–3.13, IV.22–IV.28) дает дополнительную информацию для качественного сравнения условий горения таловского и кузнецкого углей [139]. Представленные визуализации концентрационных полей 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.

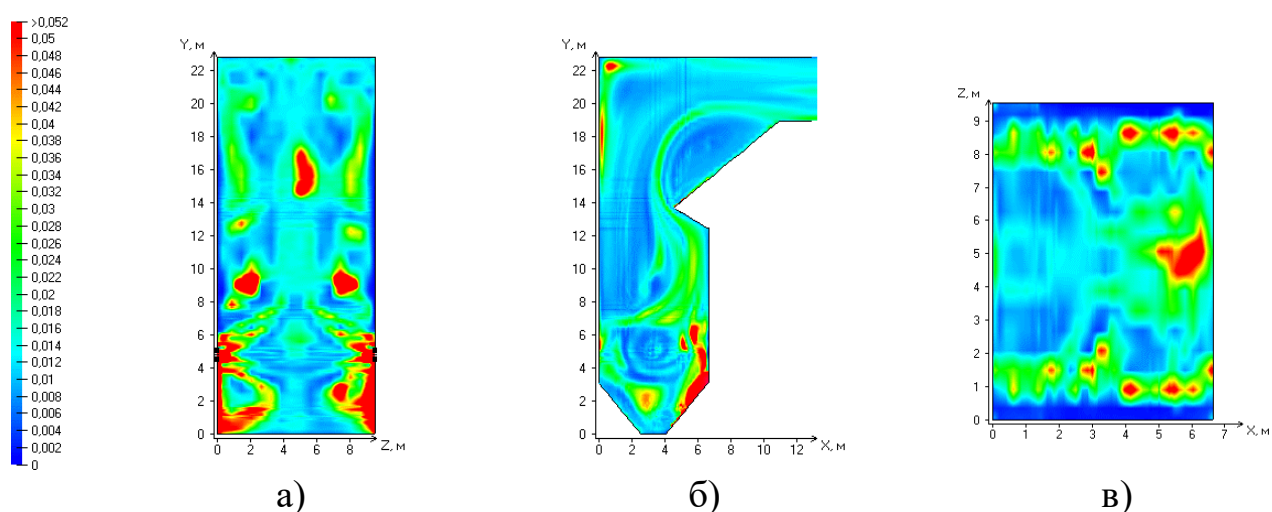


Рисунок 3.11 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 20\%$)

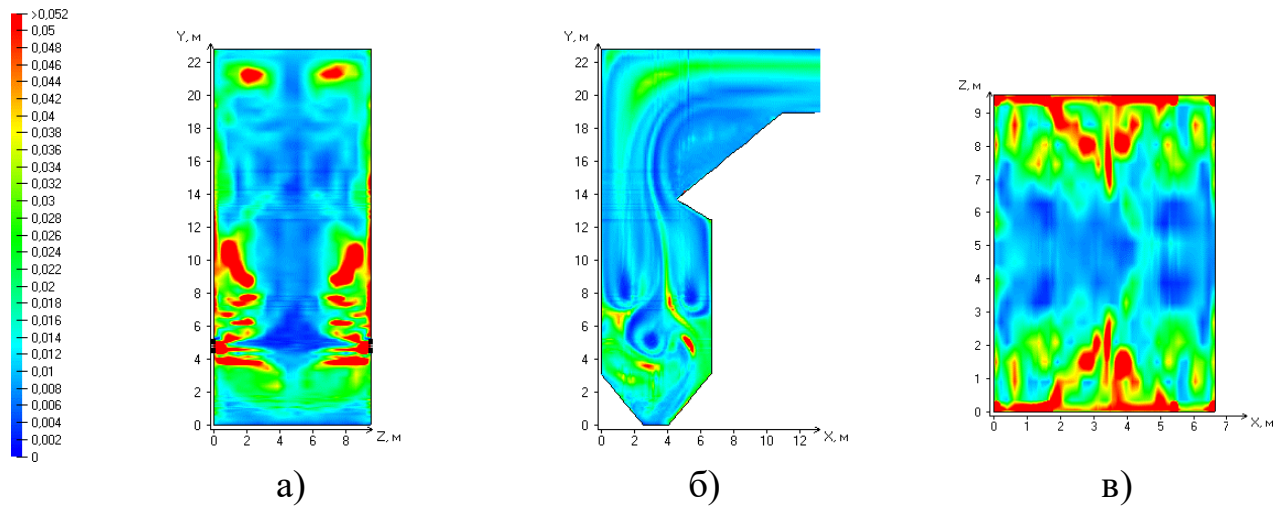


Рисунок 3.12 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 35\%$)

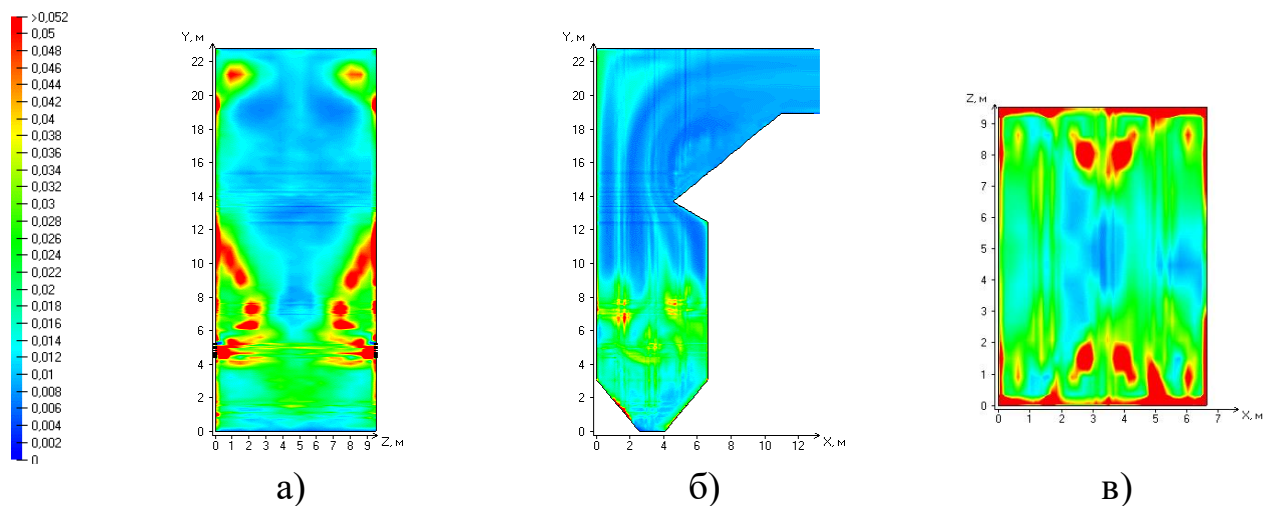


Рисунок 3.13 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – $W_t^r = 50\%$)

В локальных областях топочного объема, где скоростной режим понижен, наблюдается скопление частиц. В частности, к ним относятся боковые пристеночные пространства, потолочно-фронтальные сопряжения, заполненные вихревыми течениями, а при сжигании таловского угля – скаты фронтального и тыльного экранов в холодной воронке.

Обобщением представленных выше контурных полей с цветовой индексацией являются графики изменения по высоте топки среднеинтегральных (в горизонтальных сечениях) значений температуры и концентрации кислорода (рис. 3.14, 3.15).

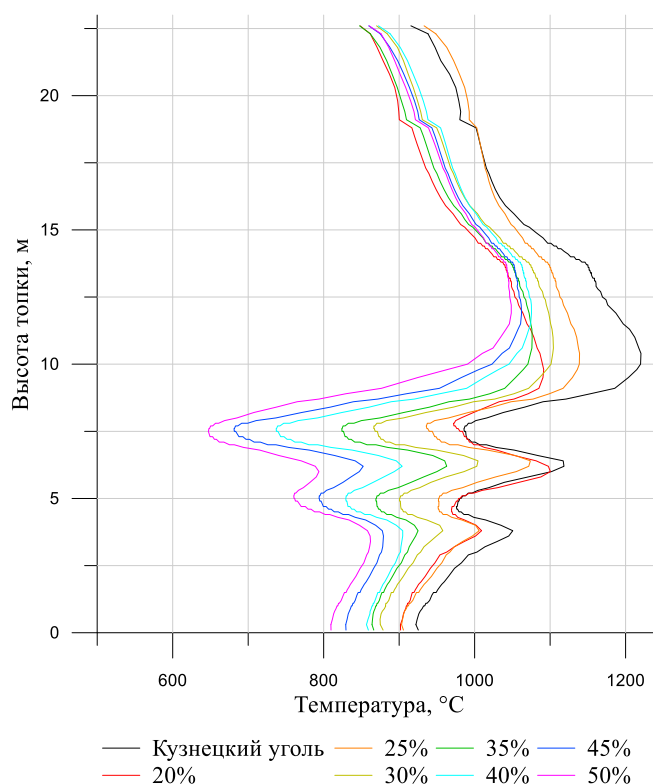


Рисунок 3.14 – Среднеинтегральная температура на различных высотных отметках топки котла БКЗ-220-100-4 (топливо – кузнецкий уголь и таловский уголь с влажностью 20–50 %)

Из рисунка 3.14 видно, что распределение температур по высоте топки котла напрямую зависит от влажности таловского угля (20–50 %), т.е. по мере роста значений влажности сжигаемого таловского угля уменьшается температура в зоне горелочного пояса. В направлении к верхней части топочной камеры тепловой поток выравнивается, при этом разница между значениями температур в рассматриваемом диапазоне влажности не превышает 50 °C, за исключением топлива с влажностью 25 %, значения температур которого близки к значениям при сжигании кузнецкого угля.

Изменение концентрации O_2 по высоте топочной камеры (рис. 3.15) коррелирует с распределением температур и представляют собой обратную картину. Реальности соответствует и тот факт, что наибольшая концентрация кислорода сосредоточена на уровне горелочного пояса. Однако, далее (по высоте топки) концентрация O_2 уменьшается вследствие развития процессов воспламенения и горения угольных частиц.

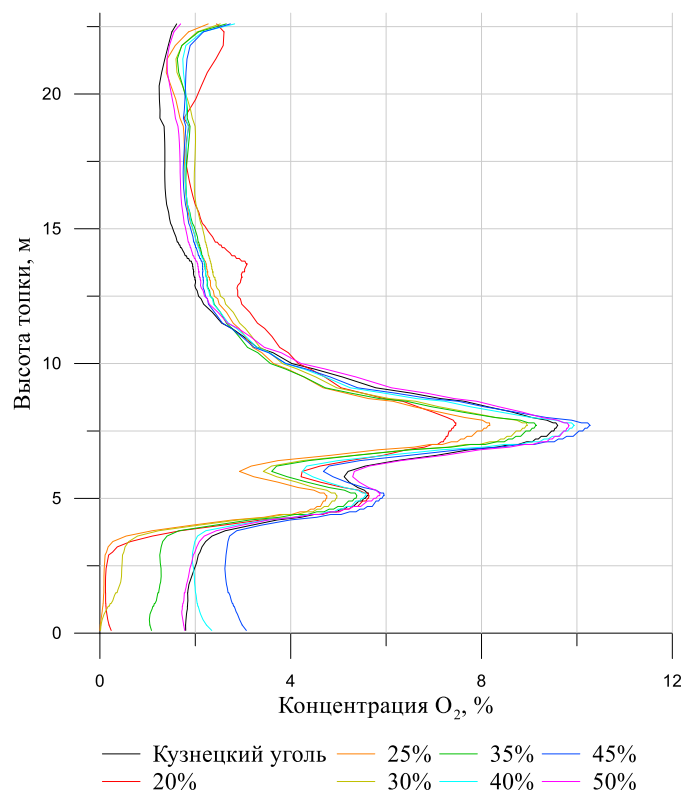


Рисунок 3.15 – Среднеинтегральная концентрация кислорода на различных высотных отметках топки котла БКЗ-220-100-4 (топливо – кузнецкий уголь и таловский уголь с влажностью 20–50 %)

Сравнительное исследование параметров топочного процесса применительно к котлу БКЗ-210-140Ф представлено результатами численного моделирования для двух вариантов влажности таловского угля, ограничивающих ожидаемый диапазон, – 25 и 50,7 %. Аэродинамическая структура в вертикальном сечении по продольной оси топочной камеры (рис. 3.16а и 3.16б) позволяет отметить, что восходящий скоростной поток более интенсивен во втором варианте (рис. 3.16б). Поскольку топливо воспламеняется на уровне горелочных устройств, объем продуктов сгорания существенно увеличивается, что в дальнейшем приводит к увеличению скорости среды в топочном объеме выше горелочных устройств. В обоих вариантах ниже горелок наблюдаются два горизонтальных вихря, которые заполняют нижнюю часть топки и при этом во втором варианте они более масштабные (рис. 3.16б).

Аэродинамическая структура потоков в горизонтальных сечениях на уровне горелочных устройств (рис. 3.17) в обоих вариантах не имеют существенных

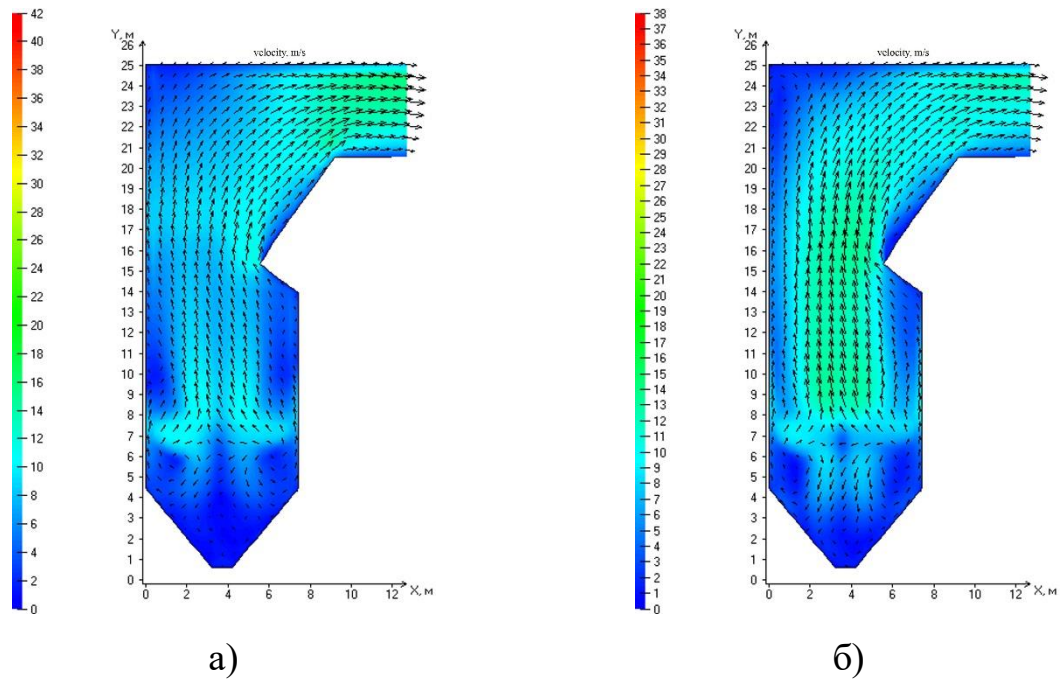


Рисунок 3.16 – Заполнение топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф
аэродинамическим потоком (м/с) в продольном сечении: а) влажность сжигаемого
угля $W_t^r = 50,7 \%$; б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25 \%$

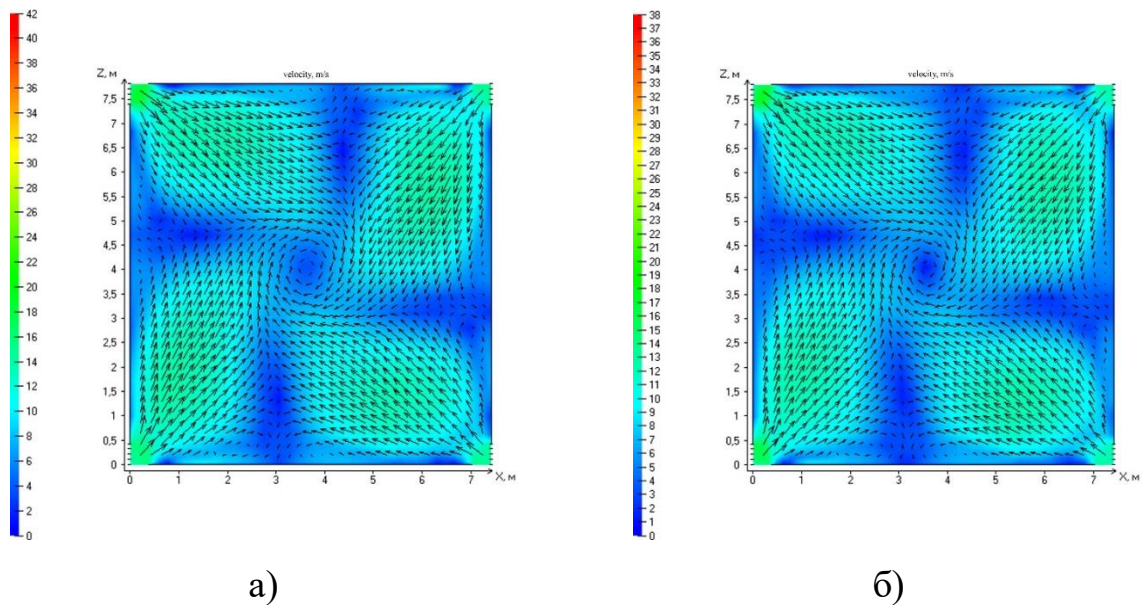


Рисунок 3.17 – Заполнение топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф
аэродинамическим потоком (м/с) в горизонтальном сечении: а) влажность
сжигаемого угля $W_t^r = 50,7 \%$; б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25 \%$

различий. Из результатов моделирования можно отметить, что аэродинамическая структура согласуется с принятой схемой компоновки горелок. Поток топливно-воздушной смеси формируют вертикальный вихрь.

При сжигании топлива с влажностью 50,7 % температура в области расположения горелочных устройств низкая (рис. 3.18а), поскольку процесс выгорания частицы протекает медленно до полного испарения влаги. Выделившиеся водяные пары уменьшают топливную долю материального баланса среды в топочном объеме. Поэтому активное горение топлива происходит в верхней части топки. Таким образом в основном объеме топки температуры в среднем составляют 650 К, а на выходе из топки 1400 К (рис. 3.18а).

При сжигании топлива с влажностью 25 % температурный уровень и его распределение в топочном объеме существенно изменяются (рис. 3.18б). Зона активного выгорания топлива с высокими значениями температур (1500 К) располагается немного выше горелочных устройств. При этом можно констатировать, что температурный уровень в топочном объеме умеренный и равномерный. Области низких температур на уровне горелочных устройств представляются тороидальной областью закрученного низкотемпературного потока из горелочных устройств. Также стоит отметить более высокий температурный уровень в нижней части топки.

На высоте расположения горелочных устройств температурные поля также существенно различаются (рис. 3.19). Зоны с низкими температурами относятся к потокам топлива и воздуха из горелочных устройств. При сжигании топлива с влажностью 25 % в центральной области топочной камеры температуры имеют значения около 1350 К, что существенно выше, чем в случае сжигания топлива с влажностью 50,7 %. Высокие температуры в данной области формируются под воздействием более интенсивного выгорания в нижней части топки (рис. 3.18б) и эжекции продуктов сгорания в центральную часть вертикального вихря.

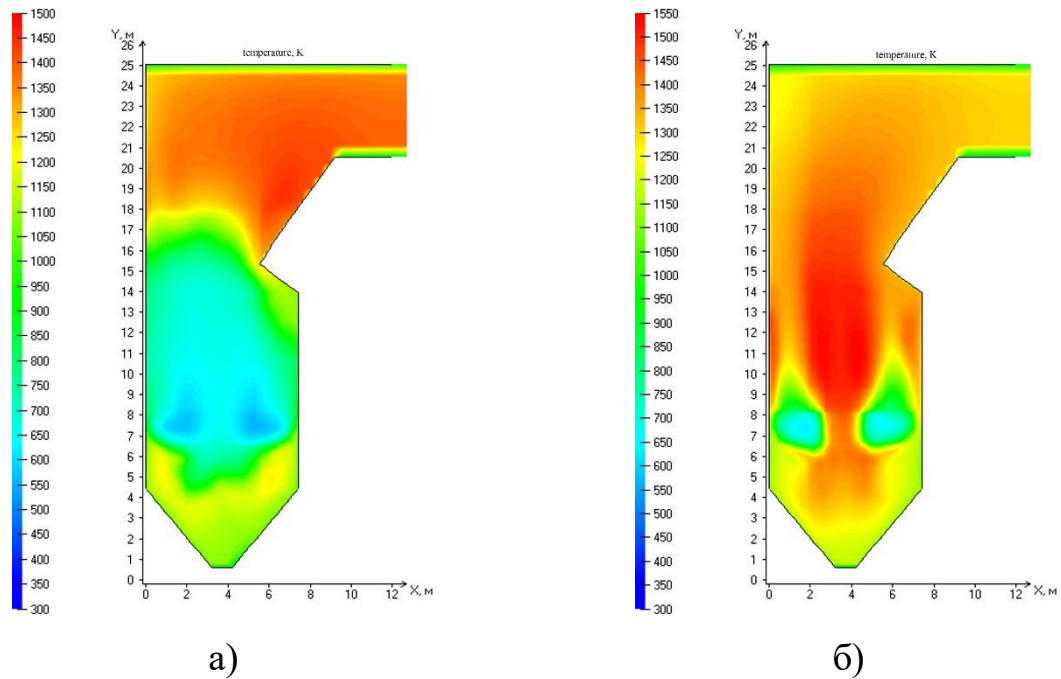


Рисунок 3.18 – Распределение температуры (К) в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф: а) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 50,7\%$;
б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25\%$

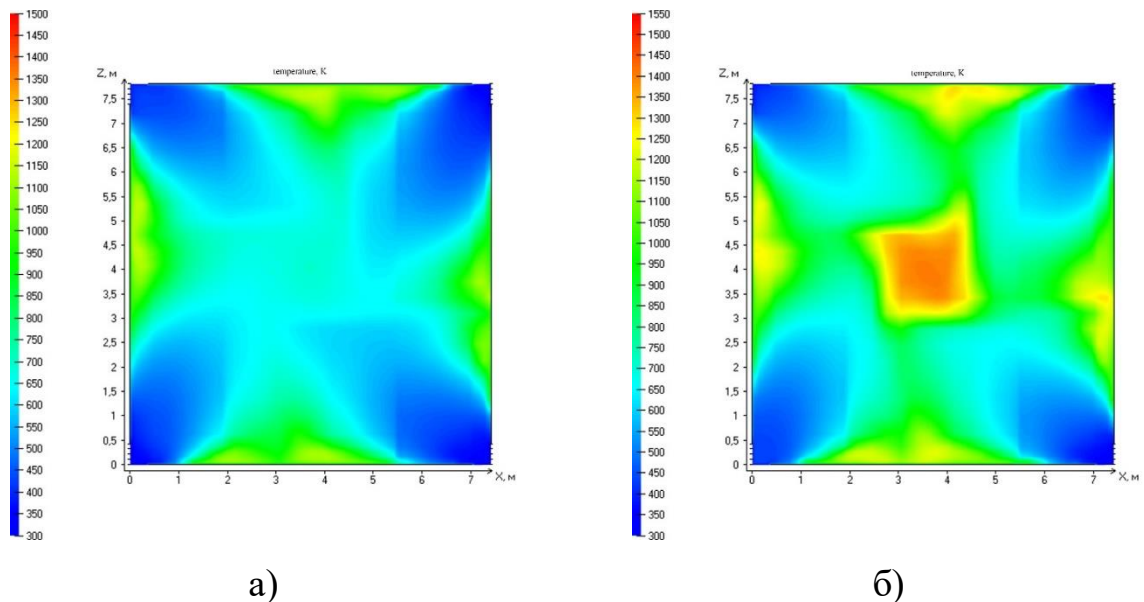


Рисунок 3.19 – Распределение температуры (К) в горизонтальном сечении (по горелкам) топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф: а) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 50,7\%$; б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25\%$

Частицы твердого топлива выносятся к центру топочной камеры на высоте расположения горелок (рис. 3.20), образуя тороидальную область с высокой

концентрацией частиц. Распределение частиц соответствует аэродинамической структуре потоков в объеме топочной камеры, но результат моделирования при сжигании топлива с влажностью 50,7 % (рис. 3.20а) отличается повышенной концентрацией частиц в нижней части топки и выносом частиц вплоть до высоты расположения аэродинамического выступа. Данный факт свидетельствует о низкой эффективности выгорания топлива.

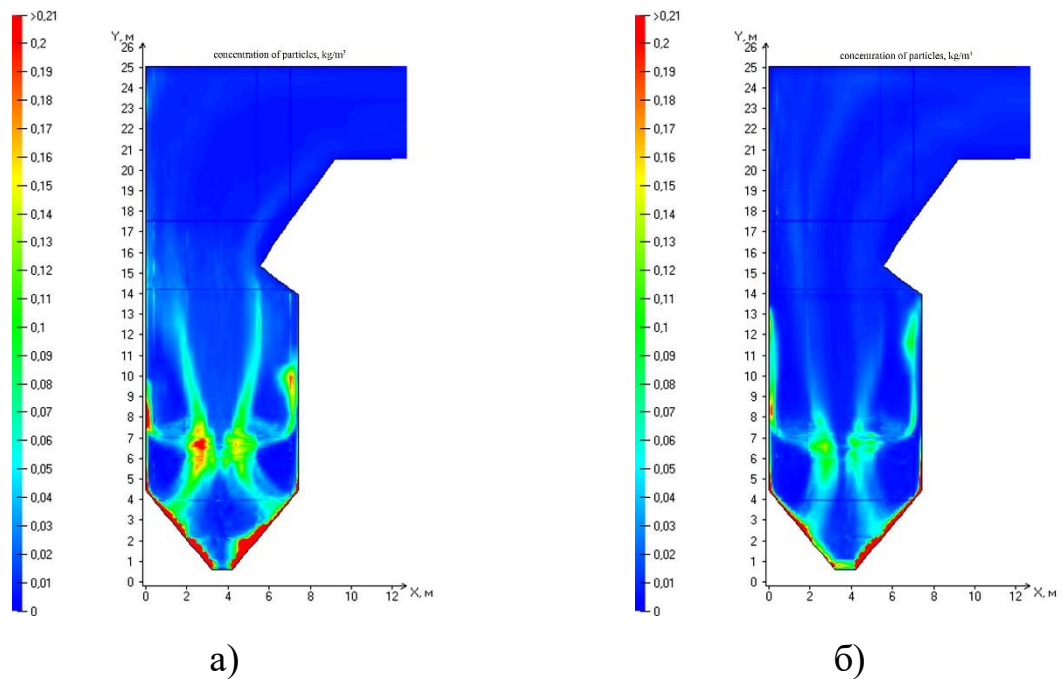


Рисунок 3.20 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф: а) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 50,7 \%$; б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25 \%$

На рисунке 3.21 представлены зоны концентрации монооксида углерода. При сжигании топлива с элементарным составом, соответствующим варианту с влажностью 50,7 %, наибольшая концентрация СО наблюдается на выходе из топочной камеры. Высокая концентрация СО как химического недожога в данной области приводит при его дожигании к высоким температурам продуктов сгорания перед пароперегревателями, и влияет на снижение тепловых потоков в испарительных поверхностях топки.

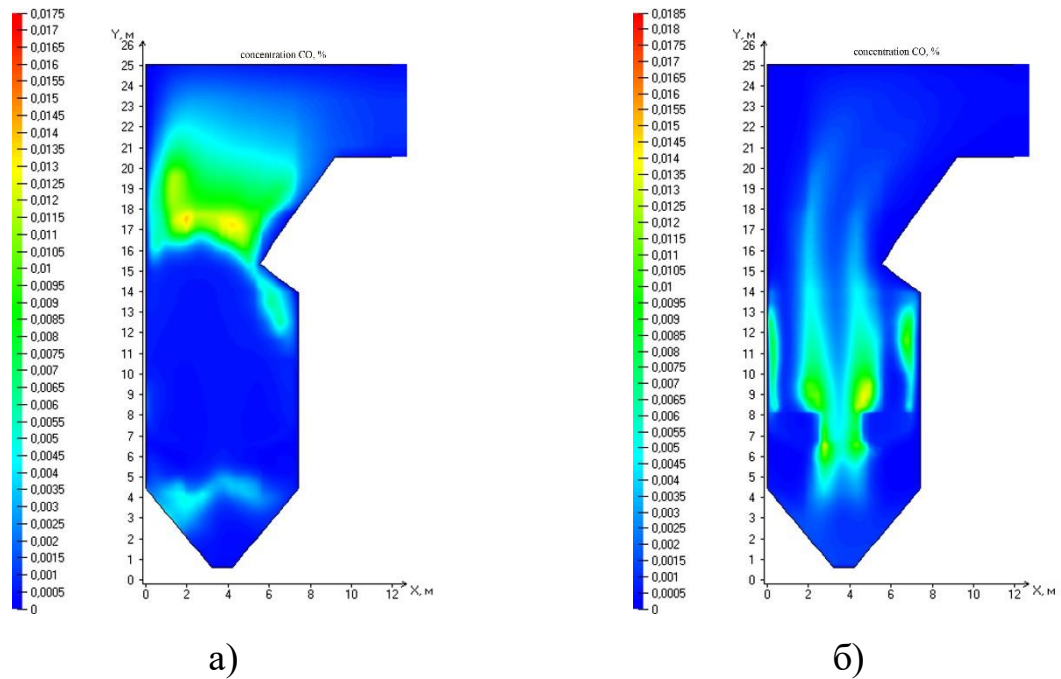


Рисунок 3.21 – Распределение монооксида углерода (%) в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф: а) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 50,7 \%$; б) влажность сжигаемого угля $W_t^r = 25 \%$

При сжигании топлива с влажностью 25 % области с повышенной концентрацией монооксида углерода располагаются в центральной части объема топки (рис. 3.21б). Соответственно, ядро горения и область дожигания монооксида углерода расположены в зоне возможного максимального теплового напряжения.

При сжигании угля с влажностью 50,7 % температура во всей нижней части топочного объема, включая область горелочного пояса, существенно ниже в сравнении с вариантом сжигания угля с влажностью 25 %. Это не позволяет вновь поступающему топливу быстро прогреться и воспламениться его горючей части в отличие от варианта с влажностью в 25 %. По этой причине температура в топке по мере продвижения факела вверх достигает лишь максимального значения 1078 °C на уровне высотной отметки 21 м и при существенно более высоком недожоге топлива. В противоположность этому при сжигании угля с влажностью 25 % температурный максимум достигается на высотных отметках 12–15 м, а на выходе из топки температура дымовых газов достигает 1030 °C [138].

3.2 Топливо – смесь таловского и кузнецкого углей

Численные исследования сжигания таловского угля в смеси с кузнецким проводились с разной долей углей. В Приложении V представлена визуализация в соотношении долей от 10:90 до 90:10 с шагом в 10 %.

Рассматривая аэродинамическую структуру потока (рис. 3.22–3.24, рис. V.1–V.7), 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. При доле таловского угля до 30 % (рис. 3.22, рис. V.1–V.3) наблюдается повышение скоростей и вдоль боковых стен со смещением к углам тыльной стенки топочной камеры. Следствием такого фрагментарного повышения скоростей является риск возникновения абразивного износа экранных поверхностей нагрева.

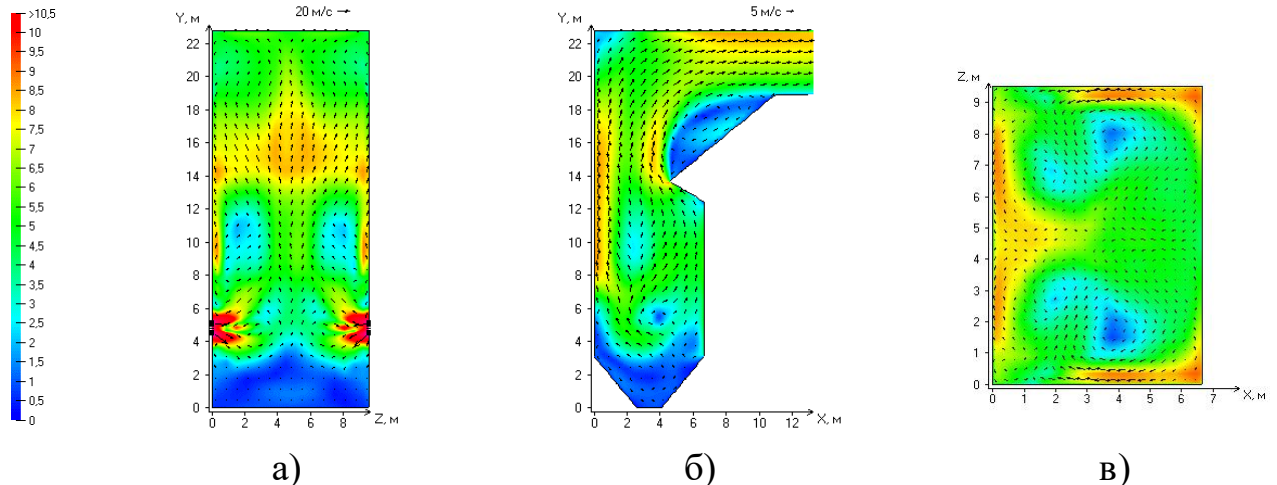


Рисунок 3.22 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

С увеличением доли таловского угля (рис. 3.23–3.24, рис. V.4–V.9) 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. Лучше всего данный

факт просматривается на рисунке 3.24 (V.9), где доля таловского угля равна 90 %. Несмотря на это, идентичность характера аэродинамической структуры наблюдается на всем исследуемом спектре долевого соотношения углей в смеси.

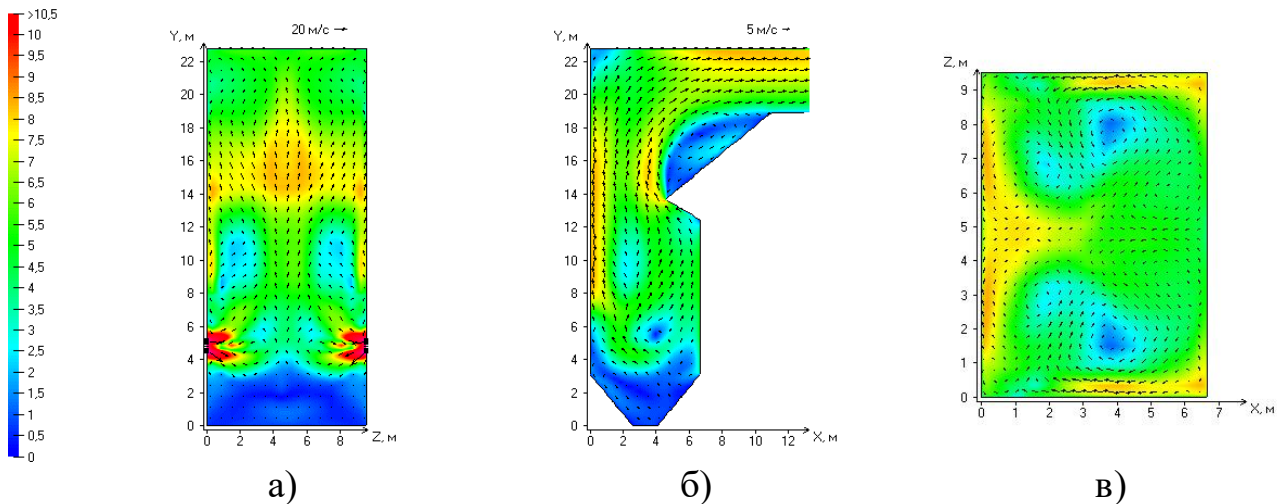


Рисунок 3.23 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

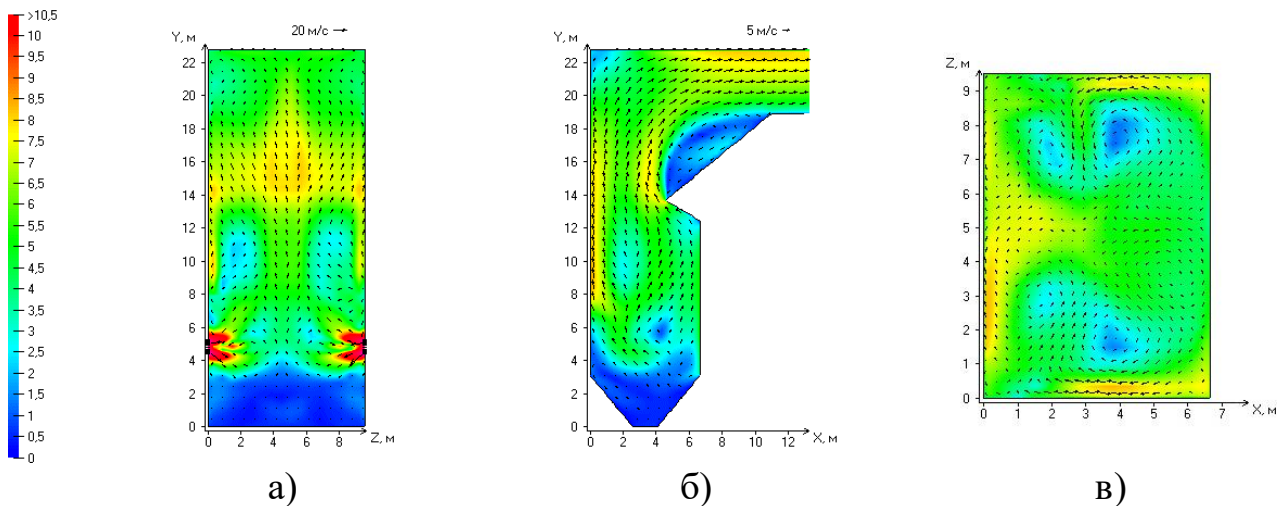


Рисунок 3.24 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

Распределение температур, представленное на рисунках 3.25–3.27 и V.10–V.15, показывает, что единое ядро горения формируется на оси нижнего яруса горелок, достигая значений 1300–1500 К. В области холодной воронки

наблюдается выраженная граница температурных полей, за которой значения температур находятся на уровне 1150–1250 К. По мере увеличения доли таловского угля граница температурных полей в области холодной воронки меняется, как и значения температур, которые снижаются. Главным отличием полей температур в нижней части топочной камеры является наличие признаков единого факела, формируемого из двух встречных потоков вблизи горелок нижнего яруса. Явной зависимости от доли таловского угля не прослеживается.

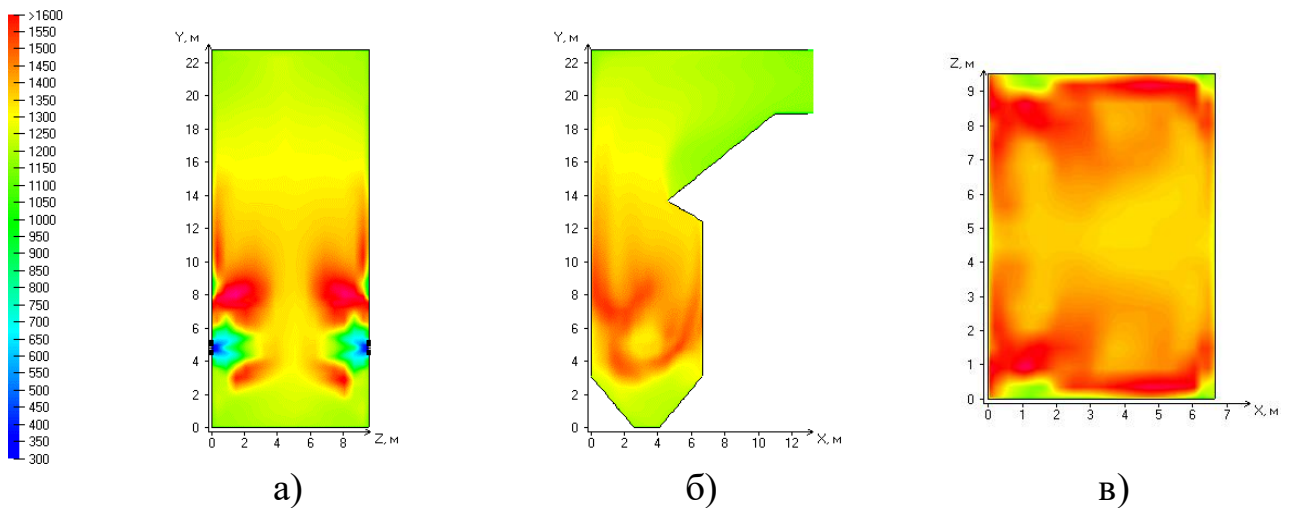


Рисунок 3.25 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

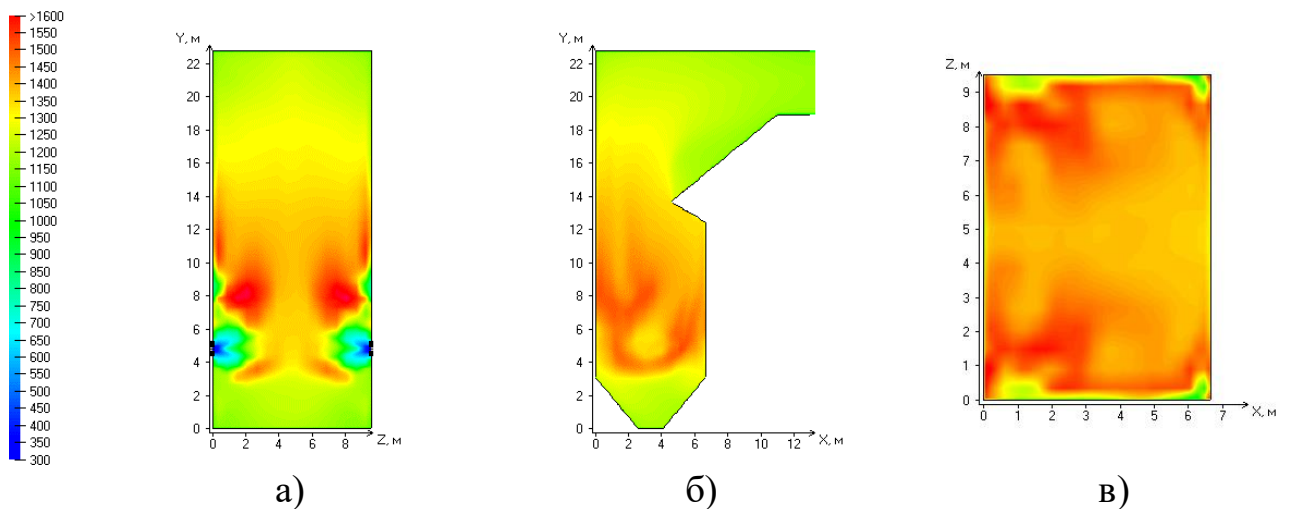


Рисунок 3.26 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

В зоне активного горения наблюдается смещение температурных полей к горелочным устройствам, где значения температур выше, чем в центре топочной камеры, что говорит о неоднородности факела. В горизонтальном сечении, особенно на рисунке 3.27 (V.15), видно, что имеются участки плотного прилегания факела к стенам топочной камеры, что может повлиять на тепловосприятие экранных труб.

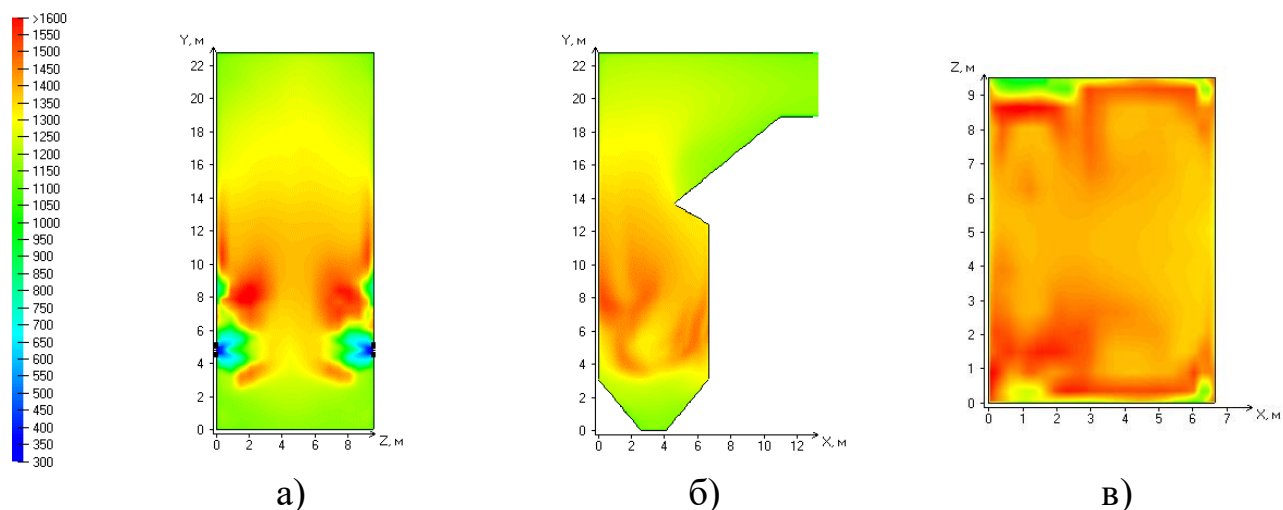


Рисунок 3.27 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

По мере снижения доли кузнецкого угля факел приобретает менее интенсивный характер. Прослеживается и явно выраженная граница температурных полей, подобная отмеченной выше для зоны нижнего яруса горелок. При доле таловского угля 10–30 % (рис. 3.25, рис. V.10–V.13) картина распределения температур более равномерная в области аэродинамического выступа и выше. При увеличении этого соотношения до 40–60 % (рис. 3.26, рис. V.13–V.15) наблюдается формирование границы разделения температурных полей, а при 70–90 % (рис. 3.27, рис. V.16–V.18) длина факела значительно меньше в сравнении с другими вариантами.

Концентрационные поля распределения частиц (рис. 3.28–3.30, V.19–V.27) соответствуют показанному выше характеру аэродинамической структуры топочной среды. Концентрация частиц при доле таловского угля от 10 до 30 % (рис. 3.28, V.19–V.21) практически не меняется. При 40–60 % таловского угля

(рис. 3.29, рис. V.22–V.24) концентрация увеличивается в зоне активного горения и в области холодной воронки. Значительно увеличивается концентрация частиц уже при 70–90 % (рис. 3.30, рис. V.25–V.27).

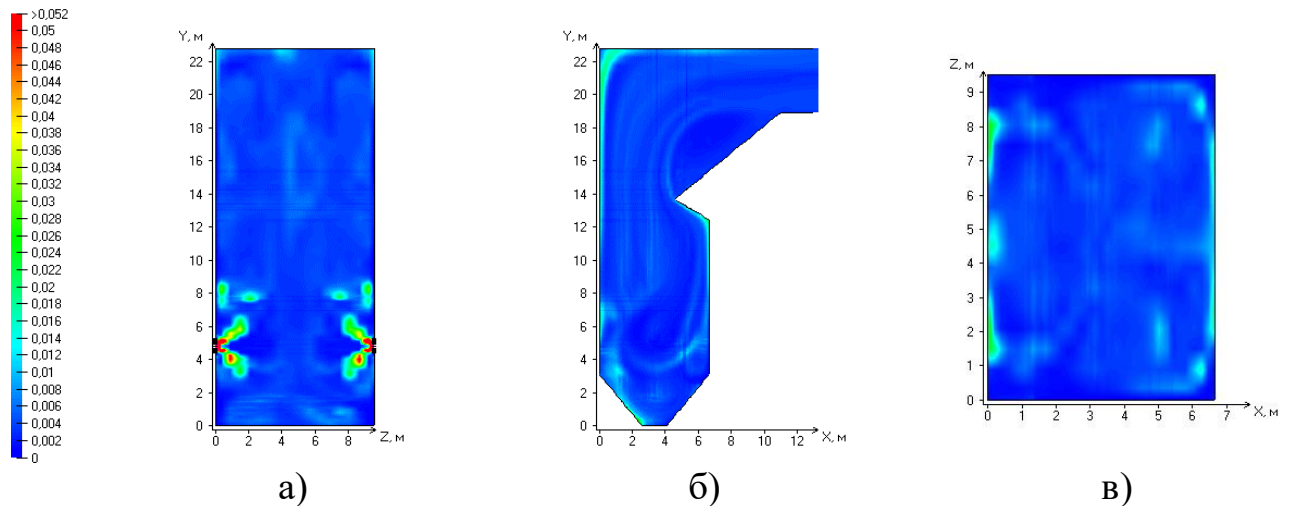


Рисунок 3.28 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

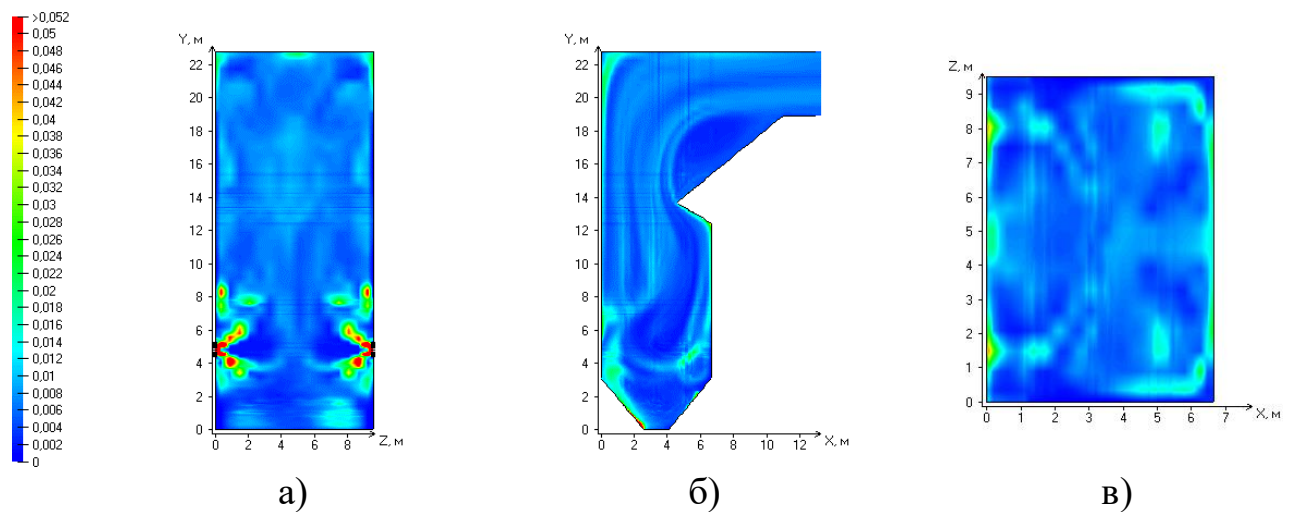


Рисунок 3.29 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

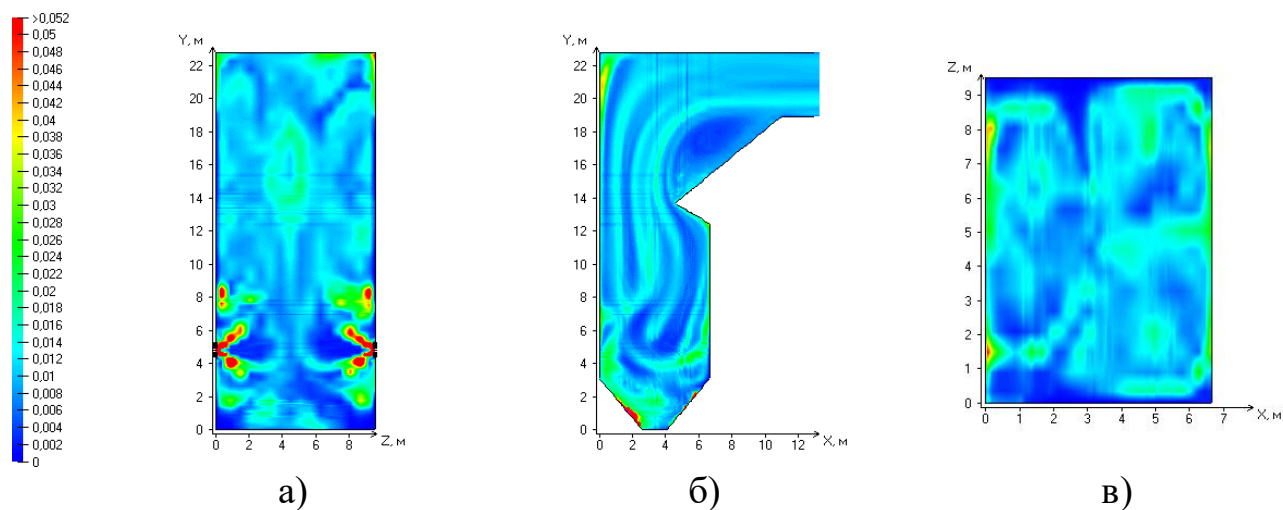


Рисунок 3.30 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

Таким образом, наибольшие концентрации наблюдаются при увеличении доли таловского угля в смеси с 50 до 90 % (рис.3.29–3.30, рис. V.24–V.27). Негативные сосредоточения наблюдаются в нижней части топочной камеры – в зоне холодной воронки. Данное скопление может привести к шлакованию экранированных стен холодной воронки и увеличению недожога топлива.

Наблюдаемая неоднородность концентрационных полей подтверждается графиками изменения температуры (рис. 3.31) и концентрации кислорода (рис. 3.32) по мере продвижения факела в верх топки. Для сравнения с параметрами при сжигании кузнецкого угля на рисунках 3.31–3.32 приведены соответствующие этому данные для того же котлоагрегата.

Из рисунка 3.31 видно, что температура при различных вариантах, в том числе при сжигании только кузнецкого угля, на уровне горелочного пояса отличается друг от друга в пределах 100 °С. Выше зоны активного горения температуры выравниваются и диапазон разницы значений температур не превышает 50 °С. Однако, температуры при сжигании только кузнецкого угля выше и в среднем составляют 1240 °С, тогда как при сжигании смеси максимальная средняя температура по высоте топке достигает только 1160 °С.

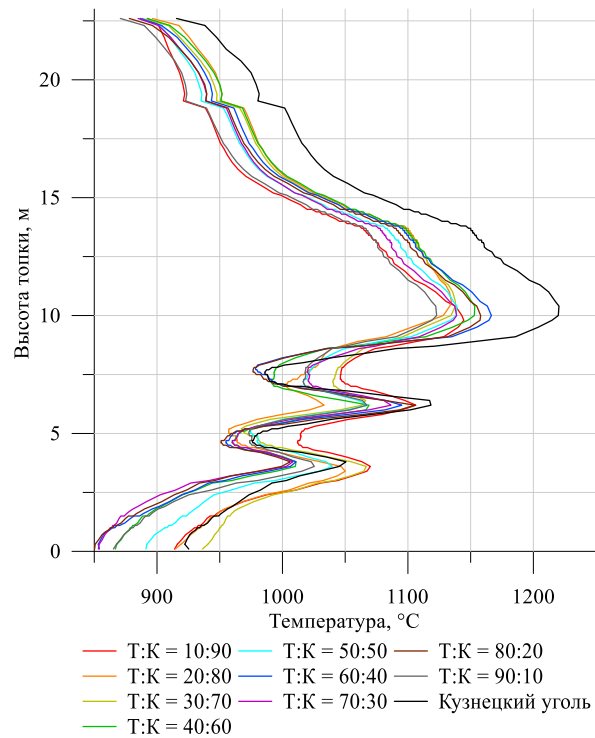


Рисунок 3.31 – Среднеинтегральные значения температуры на различных высотных отметках для вариантов сжигания смесей углей: таловского (Т) и кузнецкого (К)

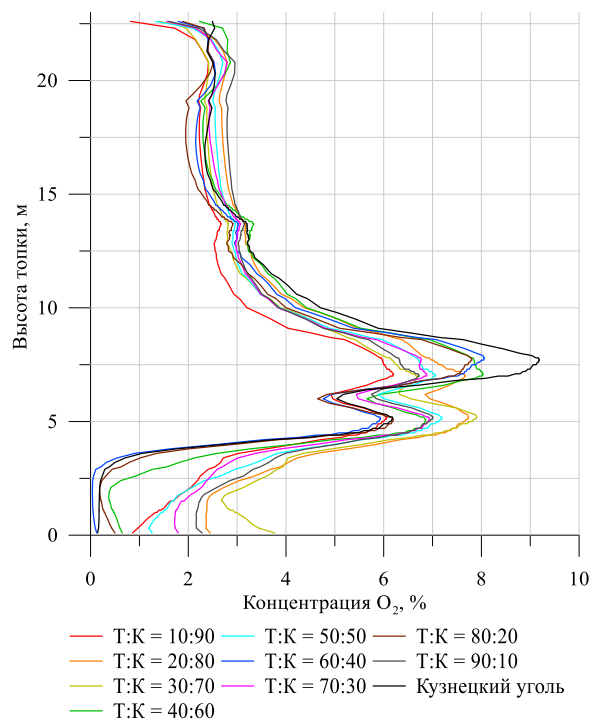


Рисунок 3.32 – Среднеинтегральные значения концентрации кислорода в топочной камере на различных высотных отметках для вариантов сжигания смесей углей: таловского (Т) и кузнецкого (К)

Концентрация кислорода (рис. 3.32) имеет наибольшее значение на входе в топочное пространство, что естественно при факельном сжигании. Концентрация кислорода при сжигании кузнецкого угля более заметно отличается на уровне выхода из горелок второго яруса, далее выравнивается и находится в диапазоне разницы значений концентрации исследуемых вариантов не более 0,5 %.

Графики изменений при различных вариантах относительно друг друга выглядят достаточно близкими и не являют явной зависимости от доли того или иного угля.

3.3 Топливо – смесь полукокса таловского угля и натурального кузнецкого угля

Благодаря полученным результатам по термической конверсии таловского угля [44], еще одним вариантом для исследования является смесь таловского полукокса и кузнецкого угля. Соотношение долей в смеси взято в таком же диапазоне, как и в предыдущем варианте (см. п. 3.2.): от 10 до 90 с шагом в 10 %. При исследовании данной смеси были получены следующие результаты численного моделирования, визуально представленные в Приложении VI. Для наглядности на рисунках 3.33–3.41 представлены визуализации для соотношений 10:90, 50:50 и 90:10.

Аэродинамическая структура топочной среды для всего исследуемого диапазона соотношения компонентов смеси (рис. 3.33–3.35, рис. VI.1–VI.9) 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.

На уровне выше второго яруса горелок и вплоть до аэродинамического выступа наблюдается увеличение скоростей в пристеночных областях по всему периметру топочной камеры. Также увеличение скоростей происходит на уровне

аэродинамического выступа, что оказалось характерным для данного типа топочной камеры.

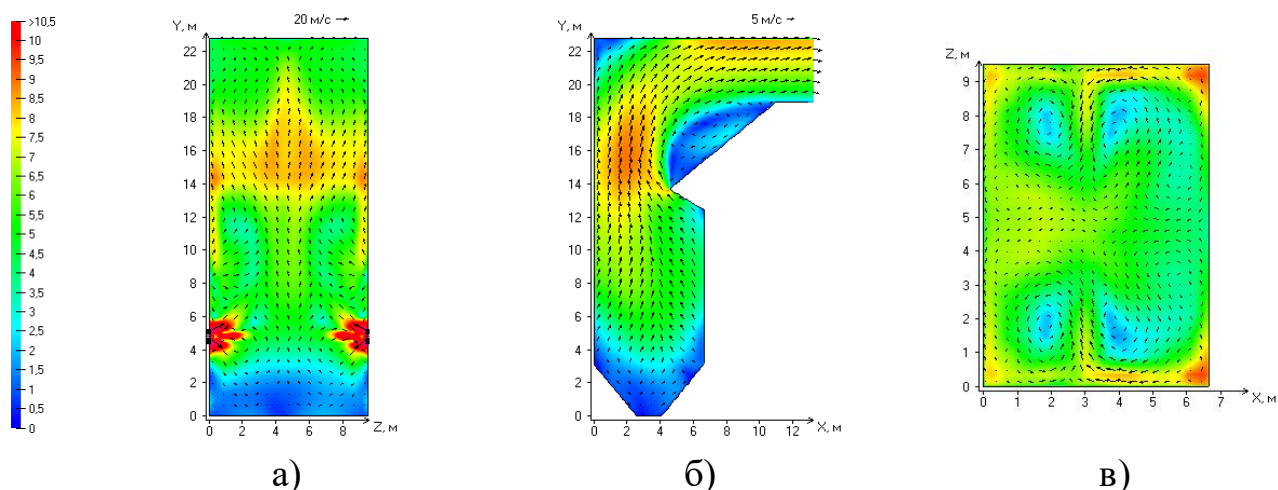


Рисунок 3.33 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

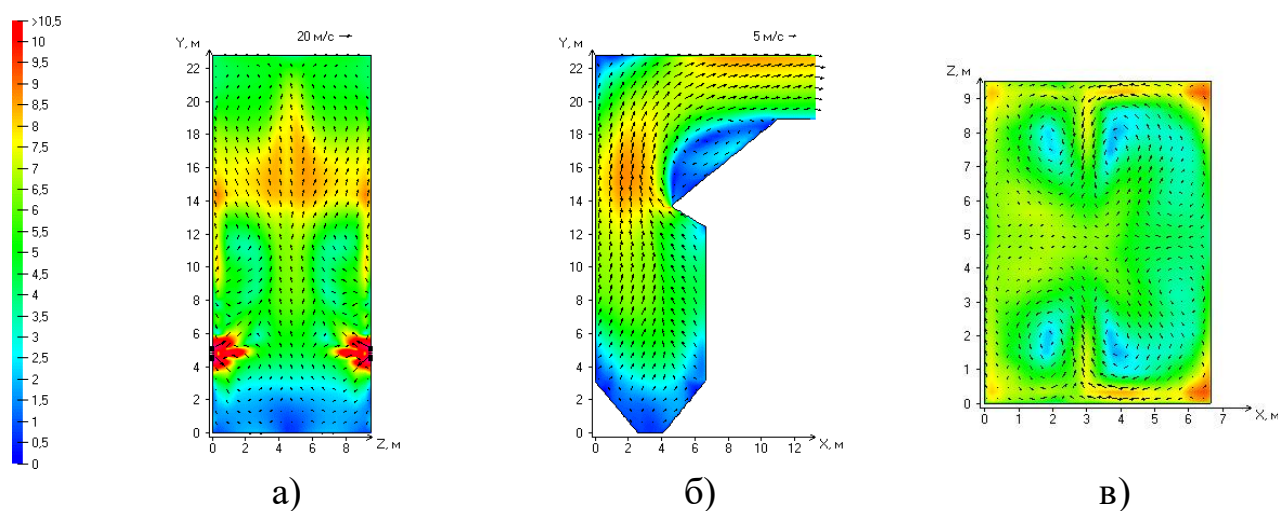


Рисунок 3.34 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

Общий температурный уровень среды в представленных сечениях (рис. 3.36–3.38, рис. VI.10–VI.18) является достаточно высоким и находится в диапазоне 1300–1600 К. Горение топлива происходит активно почти по всей высоте топочной камеры. Наличие высоких температур в зоне холодной воронки (1300–1400 К) – может негативно сказаться на надежности работы поверхностей нагрева

и привести к шлакованию. Отмечается также и плотное прилегание факела к фронтальной и тыльной стенкам топочной камеры, что также негативно влияет на работу экранных поверхностей нагрева.

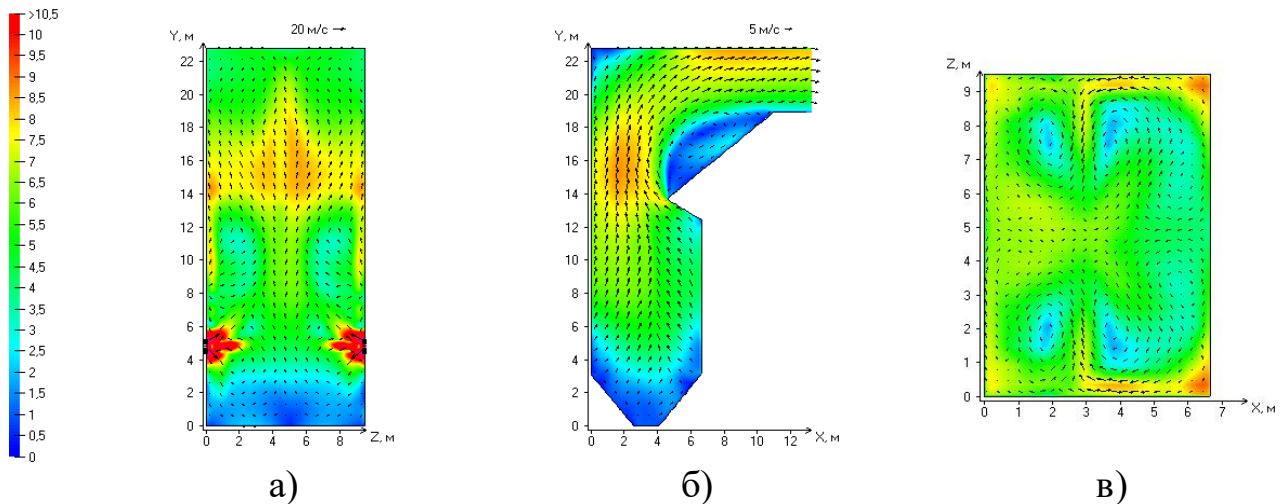


Рисунок 3.35 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

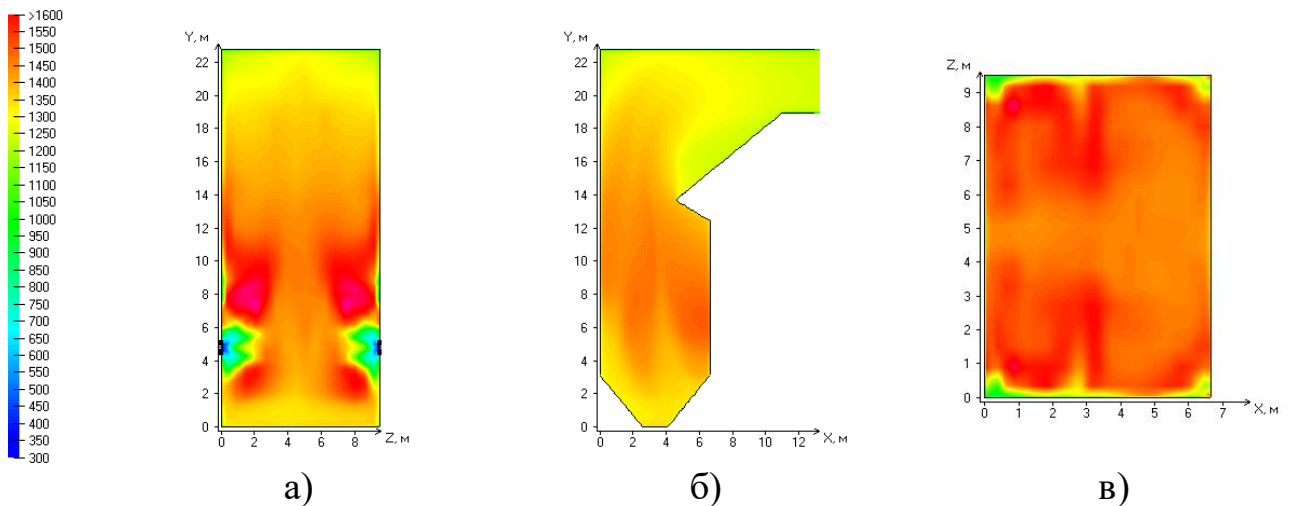


Рисунок 3.36 – Распределение температур (K) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

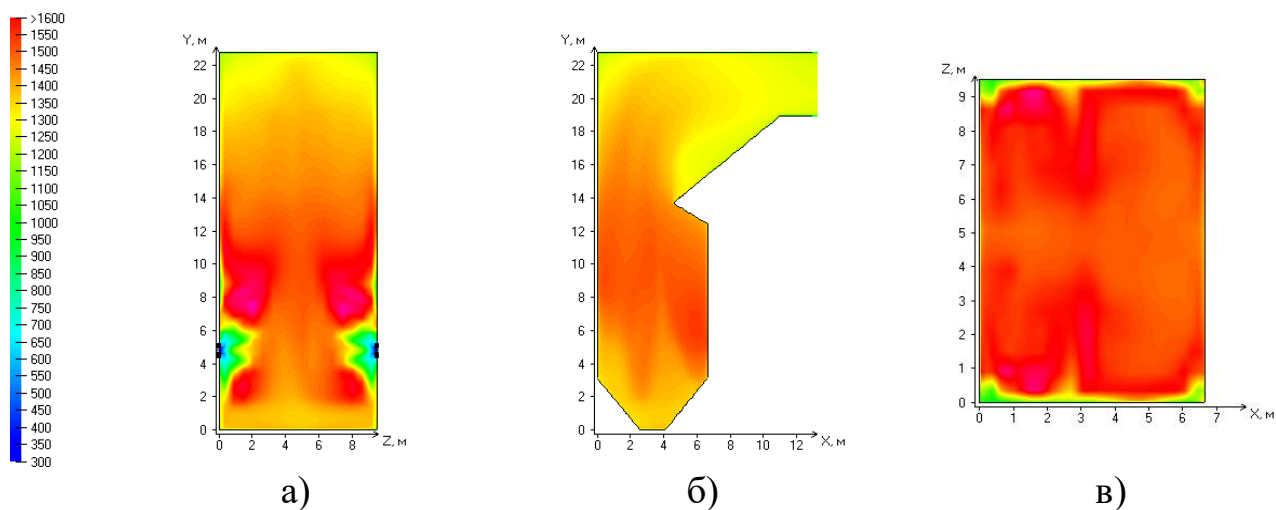


Рисунок 3.37 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

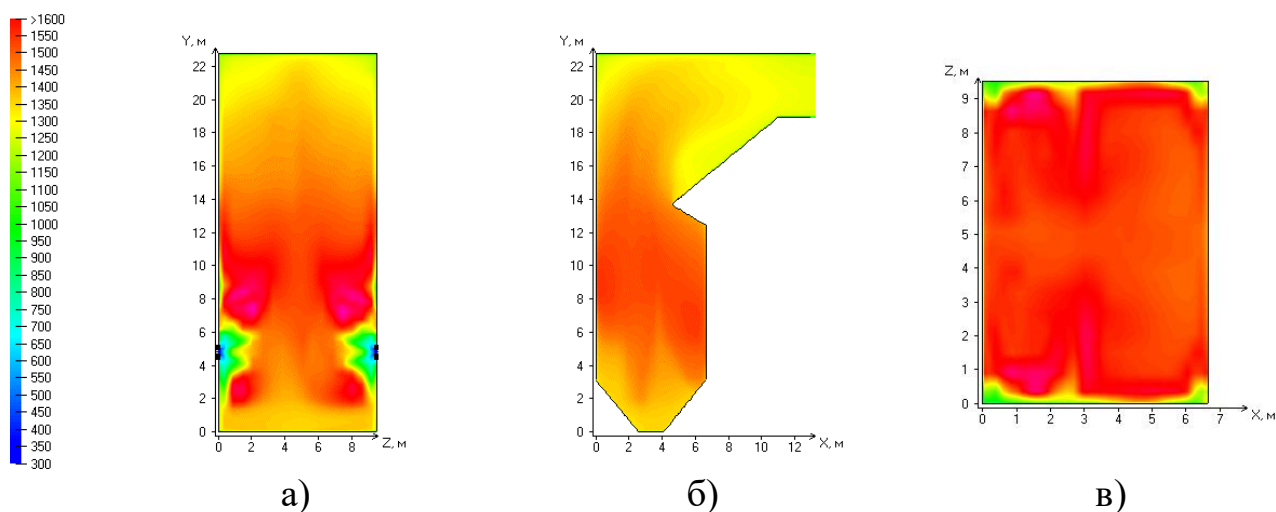


Рисунок 3.38 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

С увеличением доли таловского полукокса в смеси увеличивается не только общий температурный уровень, но и концентрация частиц (рис. 3.39–3.41, рис. VI.19–VI.27): видно, что наибольшая концентрация, естественно, наблюдается на выходе из горелок. При 30 % и больше доли таловского полукокса в смеси сосредоточение частиц проявляется в области аэродинамического выступа, фронтальной стены на выходе из топочной камеры и потолка топочной камеры.

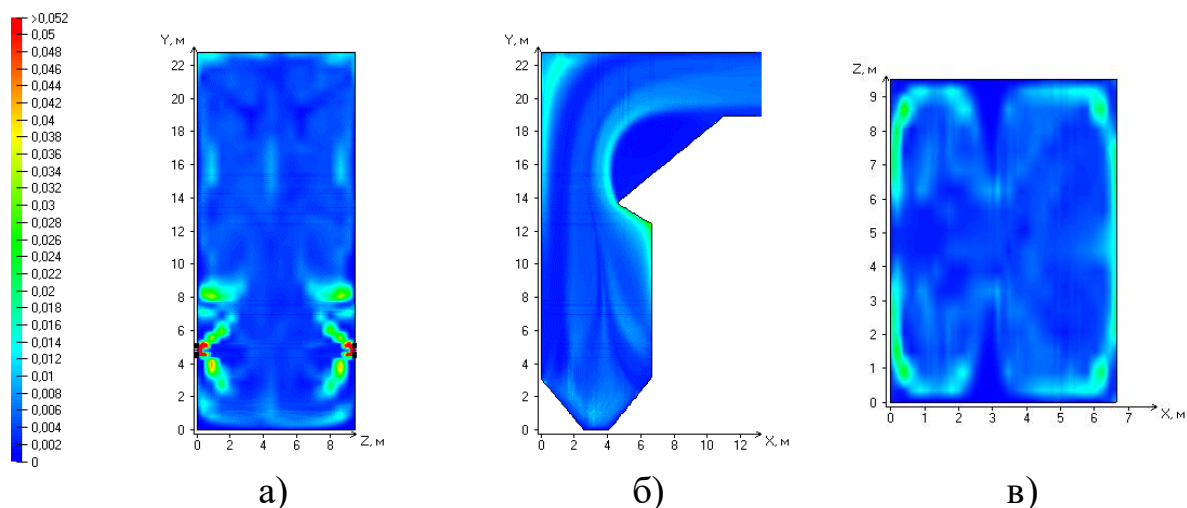


Рисунок 3.39 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

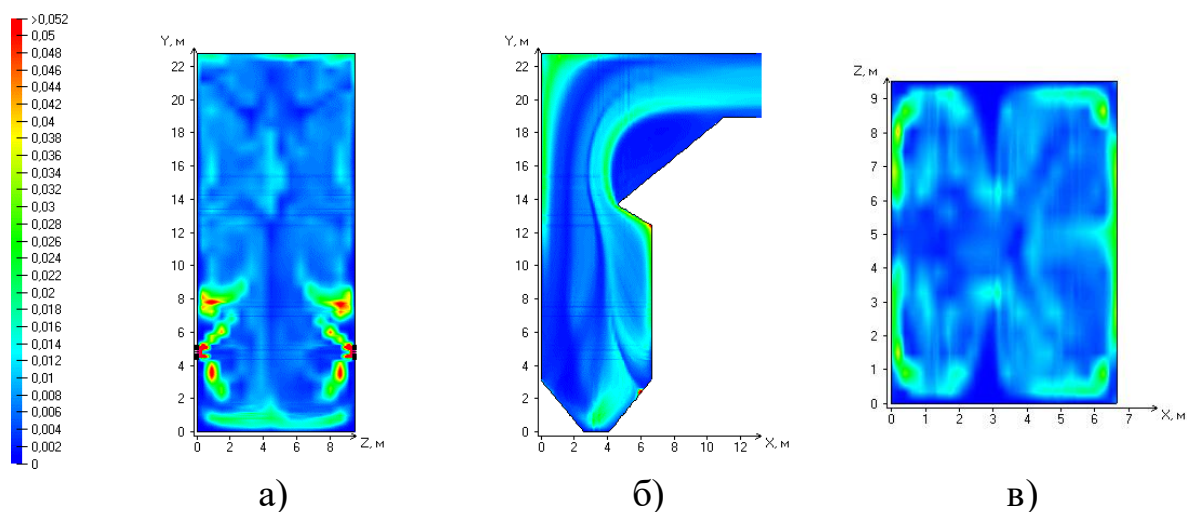


Рисунок 3.40 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

Наибольших значений концентрация частиц в данных областях достигает при доле таловского полукокса 60–90 % (рис. 3.41, рис. VI.24–VI.27). Повышение концентрации частиц у потолочного пароперегревателя чревато локальными явлениями золового износа или золового заноса в конвективных ступенях в зависимости от скорости дымовых газов в них.

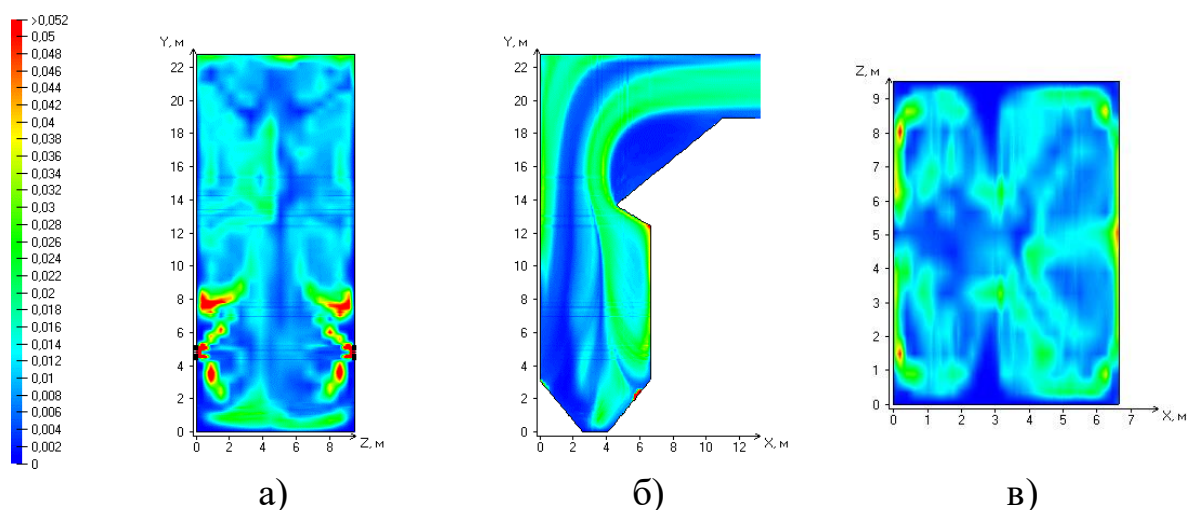


Рисунок 3.41 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

Среднеинтегральные значения температур по высоте топки (рис. 3.42) в сравнении с кузнецким углем являются более высокими при всех соотношениях долей. При этом профили графиков температур отличны друг от друга.

Среднеинтегральная максимальная температура в $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$ при сжигании кузнецкого угля достигается в зоне активного горения. В случаях со смесью в данной зоне значения равны $1160\text{--}1230\text{ }^{\circ}\text{C}$. На выходе из горелок температуры смеси выше в несколько раз, чем при сжигании кузнецкого угля, что говорит о раннем зажигании частиц топлива и активном горении уже на уровне второго яруса горелок. Выше зоны активного горения температуры выравниваются при всех исследованных вариантах и отличаются друг от друга не более чем на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Концентрация кислорода, представленная на рис. 3.43, также имеет свои особенности. В целом картина является обратной относительно графиков температур: при сжигании кузнецкого угля она отличается от смеси значениями в несколько раз. На выходе из топочной камеры значения выравниваются.

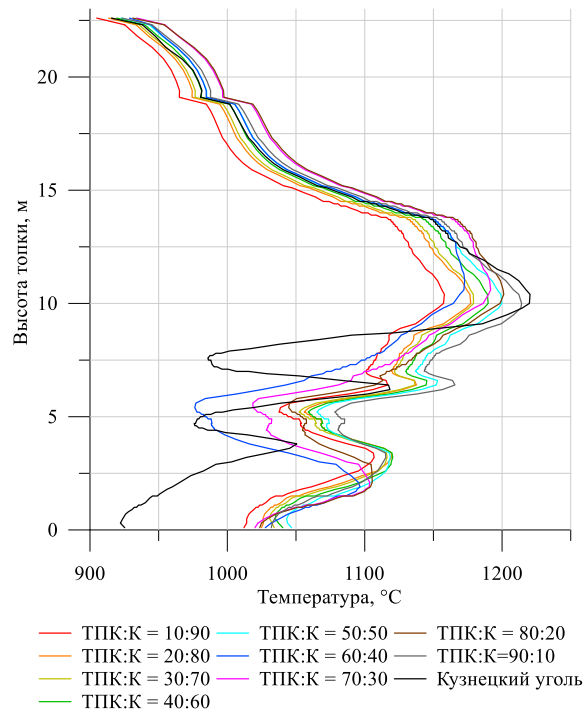


Рисунок 3.42 – Среднеинтегральные по горизонтальным сечениям температуры в топочной камере для вариантов сжигания смесей: полукокса таловского угля (ТПК) и натурального кузнецкого угля (К)

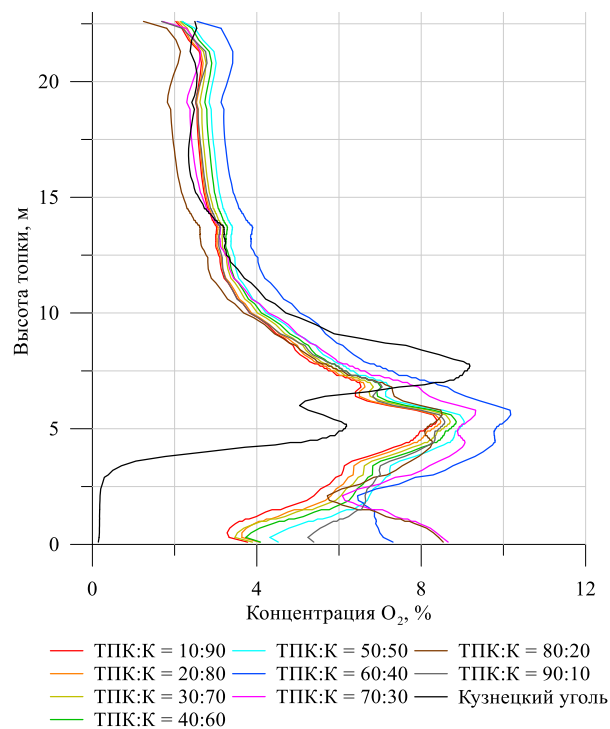


Рисунок 3.43 – Среднеинтегральные по горизонтальным сечениям значения концентрации кислорода в топочной камере для вариантов сжигания смесей: полукокса таловского угля (ТПК) и натурального кузнецкого угля (К)

3.4 Результаты тепловых поверочных расчетов

В данной работе выполнен расчет исследуемого котла, исходящий из условия предполагаемой замены привозного каменного угля, как варианта вовлечения местного бурого угля в энергетическое использование. Таким образом, для расчетного исследования рассмотрены все представленные выше варианты топлива.

Тепловые поверочные расчеты котла БКЗ-220-100-4 проведены по нормативному методу теплового расчета паровых котлов [128] с помощью отраслевой программы ТРАКТ [127]. Исходные данные по топливу приведены выше в таблицах 2.4–2.6. На рисунке 3.44 представлены графики зависимостей параметров работы котла, полученных расчетным путем от величины влажности таловского угля. Для сравнения выбраны 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.

Представленные графики свидетельствуют о том, что негативные тенденции изменения параметров работы топки соответствуют влажности таловского угля более 30 %. Расход топлива увеличивается более, чем в 2 раза, объем газов снижается в 1,5 раза. Изменение в сторону увеличения удельного теплового напряжения топочного объема находится в пределах $0,01 \text{ МВт/м}^3$, удельной тепловой нагрузки экранов топки – в пределах $0,15 \text{ МВт/м}^2$, не превышая при этом допустимых значений равных $0,18 \text{ МВт/м}^3$ и $5,5 \text{ МВт/м}^2$, соответственно.

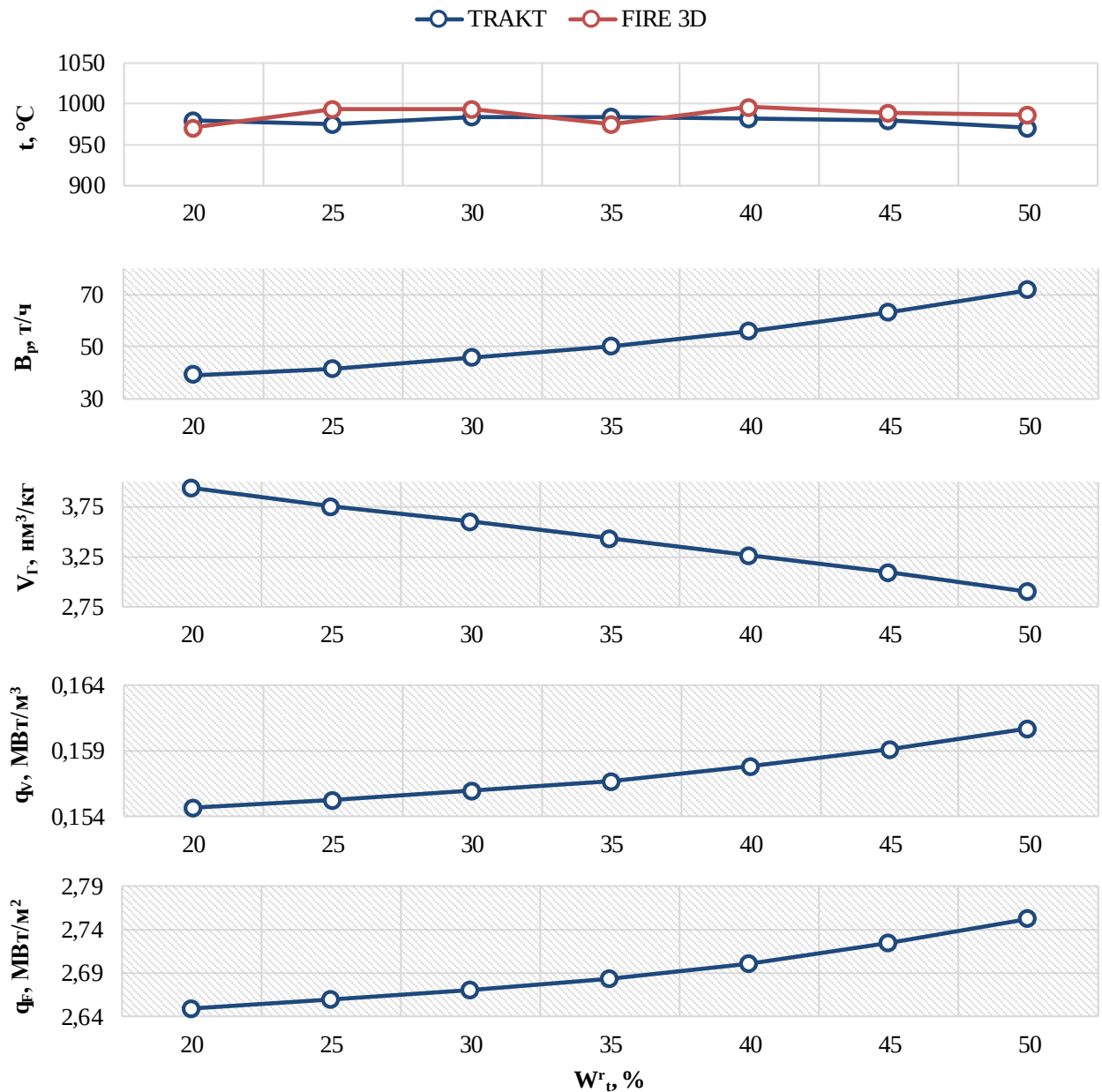


Рисунок 3.44 – Зависимость параметров (t – температуры на выходе из топочной камеры, B_p – расхода топлива, V_r – объема продуктов сгорания, q_v – удельного теплового напряжения топочного объема, q_F – удельной тепловой нагрузки экранов топки) от величины рабочей влажности таловского угля (W_t^r)

Тепловой поверочный расчет показал, что при сжигании таловского бурого угля с влажностью $W_t^r = 25 \%$ в топке парового котла БКЗ-220-100-4 требуемые параметры пара достигаются. Следовательно, данный вид топлива можно рассматривать, как замену привозному проектному кузнецкому углю. Однако

необходимо учесть опасность золового заноса поверхностей нагрева из-за низких скоростей дымовых газов.

На рисунке 3.45 выведены зависимости параметров от долей следующих смесей: таловский (Т) и кузнецкий (К) угли, таловский полукокс (ТПК) и кузнецкий (К) уголь.

В представленной зависимости температуры от доли исследуемых смесей использовались данные по величине температуры на выходе из топочной камеры, полученные при численном исследовании на основе пакета прикладных программ FIRE 3D. Приведены данные по исследованию сжигания смеси таловского и кузнецкого углей (Т+К FIRE 3D), а также таловского полукокса и кузнецкого угля (ТПК+К FIRE 3D).

Анализируя представленные зависимости, можно отметить следующее:

температура на выходе из топки снижается при увеличении доли таловского угля в исследуемых смесях. При этом температуры, полученные при численном моделировании, отличаются от рассчитанных в программе ТРАКТ не более, чем на 50 °С.

расход топлива увеличивается, зависимость имеет нарастающий характер изменений – с 30,1 до 40,2 т/ч.

объем продуктов сгорания снижается с 6 до 4 нм³/кг, то есть в 1,5 раза.

удельное тепловое напряжение топочного объема и удельная тепловая нагрузка стен топки снижаются в пределах 0,003 МВт/м³ и 0,04 МВт/м², соответственно, и не превышают допустимых значений, указанных выше.

Также стоит отметить, что при численном моделировании и расчетах в программе ТРАКТ коэффициент тепловой эффективности ψ принимался равным 0,45. Коэффициент полезного действия при использовании исследуемых вариантов топлива получен в пределах 90–92 %.

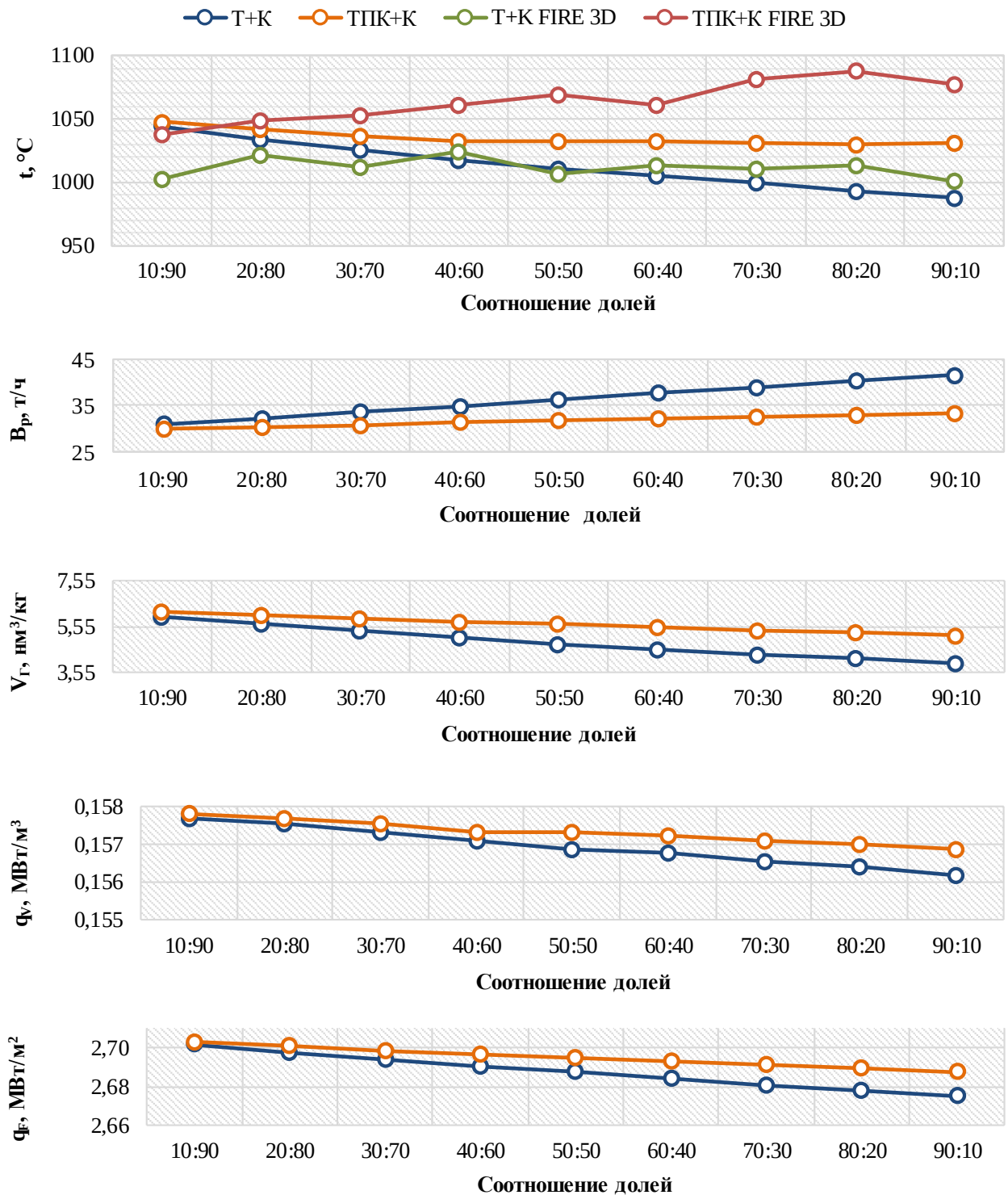


Рисунок 3.45 – Зависимость параметров (t – температуры на выходе из топочной камеры, B_p – расхода топлива, V_r – объема продуктов сгорания, q_v – удельного теплового напряжения топочного объема, q_F – удельной тепловой нагрузки экранов топки) от соотношения компонентов исследуемых смесей

3.5 Генерация оксидов азота и выбросы с дымовыми газами

В настоящий момент в Российской Федерации действуют нормативы удельных выбросов загрязняющих веществ для котельных установок [140, 141]. Для ТЭС, сжигающих твердое топливо, такими веществами являются: оксиды азота, сернистый ангидрид, оксид углерода, твёрдые частицы.

Норматив удельного выброса загрязняющего вещества в атмосферу приводится:

на единицу вводимого в топку тепла, г/МДж;

на тонну условного топлива, кг/т.у.т.;

на единицу объема дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу (при стандартном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,4$ и нормальных условиях - температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении $101,3\text{ кПа}$), мг/м³.

Для исследуемых вариантов сжигаемого топлива произведен расчет выбросов твердых частиц, оксидов азота и оксида серы. Определение концентрации оксида углерода в дымовых газах в действующей методике [141] расчетным путем не предусмотрено.

По результатам исследования кузнецкого угля выбросы твердых частиц не превышают нормативное значение 500 мг/м^3 и составляют 378 мг/м^3 . В соответствии с [126] содержание NO_x в уходящих газах при работе исследуемого котла на кузнецком каменном угле составляет 870 мг/нм^3 , по результатам данного исследования на выходе из топки – 930 мг/м^3 , что в $1,85 - 2,45$ раза превышает нормативное значение 470 мг/м^3 , относящееся, однако, к уходящим газам за котлом. С одной стороны, это показывает достоверность выбранной модели исследования и сходимость результатов, с другой, свидетельствует о необходимости принятия мер по снижению выбросов оксидов азота.

На рисунках 3.45–3.47 приведены среднеинтегральные значения концентрации оксидов азота на различных высотных отметках.

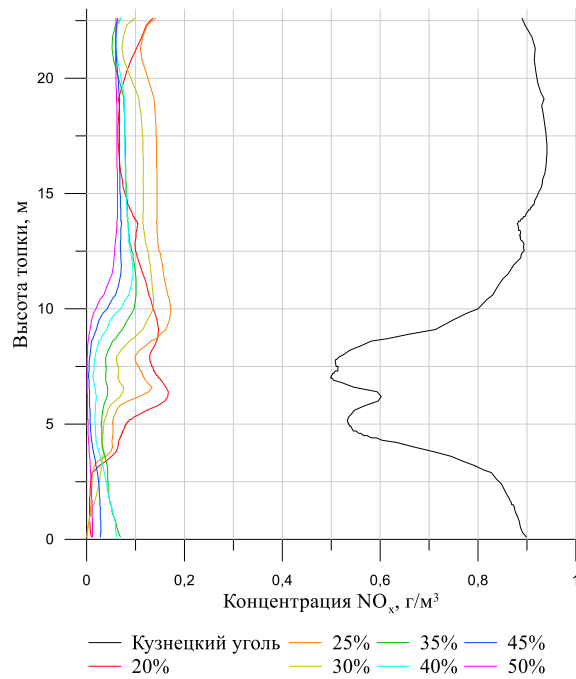


Рисунок 3.45 – Среднеинтегральные значения концентрации оксидов азота на различных высотных отметках (топливо – кузнецкий уголь и таловский уголь с влажностью 20–50 %)

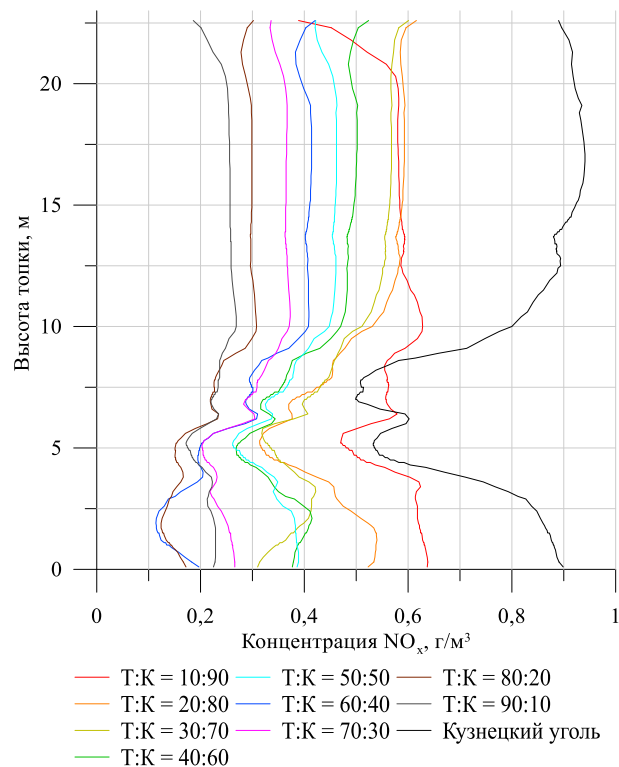


Рисунок 3.46 – Среднеинтегральные значения концентрации оксидов азота в топочной камере на различных высотных отметках для вариантов сжигания смесей углей: таловского (Т) и кузнецкого (К)

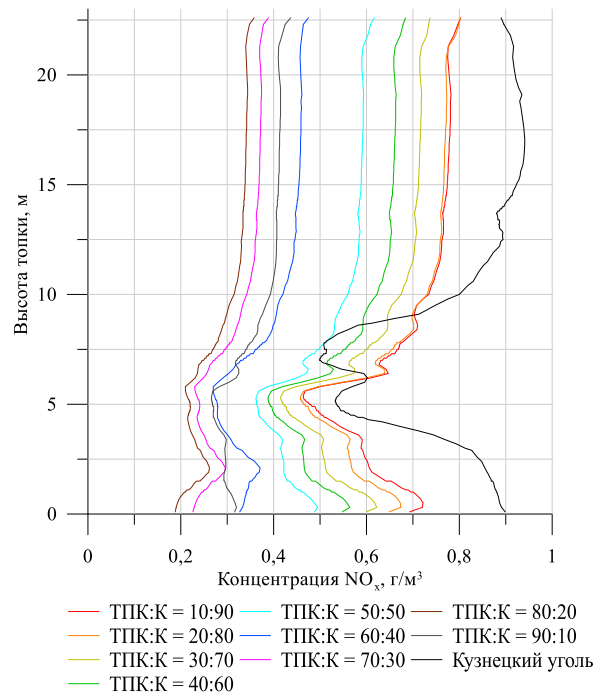


Рисунок 3.47 – Среднеинтегральные по горизонтальным сечениям значения концентрации оксидов азота в топочной камере для вариантов сжигания смесей: полукокса таловского угля (ТПК) и натурального кузнецкого угля (К)

Из рисунков можно видеть соответствие представленных профилей с основными механизмами генерации NO_x : во-первых, с развивающимися температурами в зоне горения; во-вторых, с содержанием кислорода в топочной среде.

На рисунках 3.48–3.56 представлены зависимости параметров по выбросам на выходе из топки котла БКЗ-220-100-4 и с уходящими дымовыми газами: n – максимальный удельный выброс, г/МДж; μ_i – концентрация i -ого компонента выброса, мг/м³; m – максимальный удельный выброс на тонну условного топлива, г/кг. Приводятся зависимости от величины рабочей влажности таловского угля и для исследуемых вариантов смесей: таловский и кузнецкий угли, полукоксы таловского угля и кузнецкого угля.

Анализируя зависимость выбросов при сжигании смесей таловского и кузнецкого углей (рис. 3.51–3.53), можно отметить отсутствие превышения нормативного значения выбросов оксида серы. Выбросы оксидов азота снижаются

по мере увеличения доли таловского угля в смеси начиная с 40 %. Выбросы твердых частиц возрастают с доли таловского угля в смеси от 20 %.

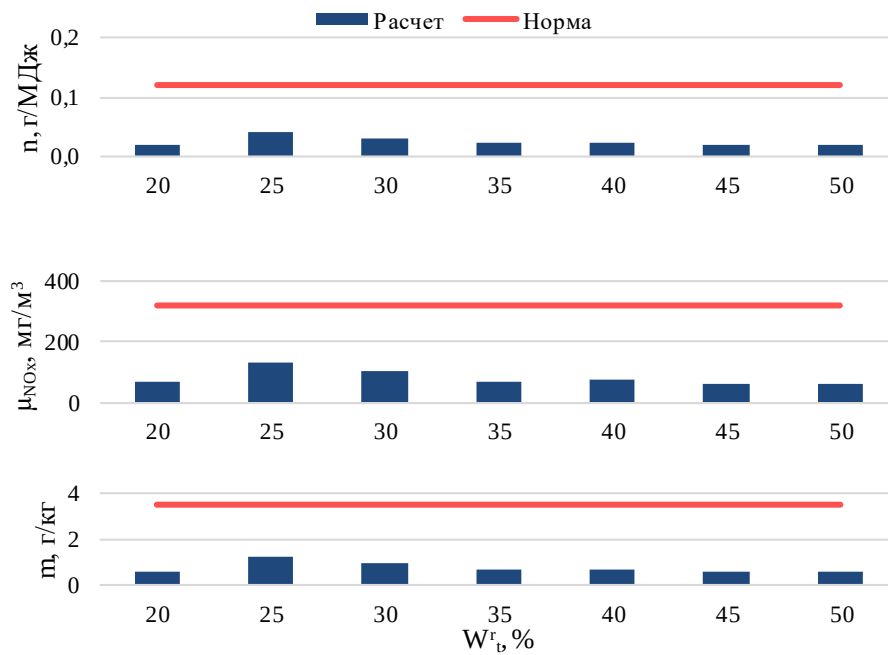


Рисунок 3.48 – Зависимость выбросов оксидов азота от величины рабочей влажности таловского угля (W_t^r) на выходе из топки (норма представлена для уходящих газов)

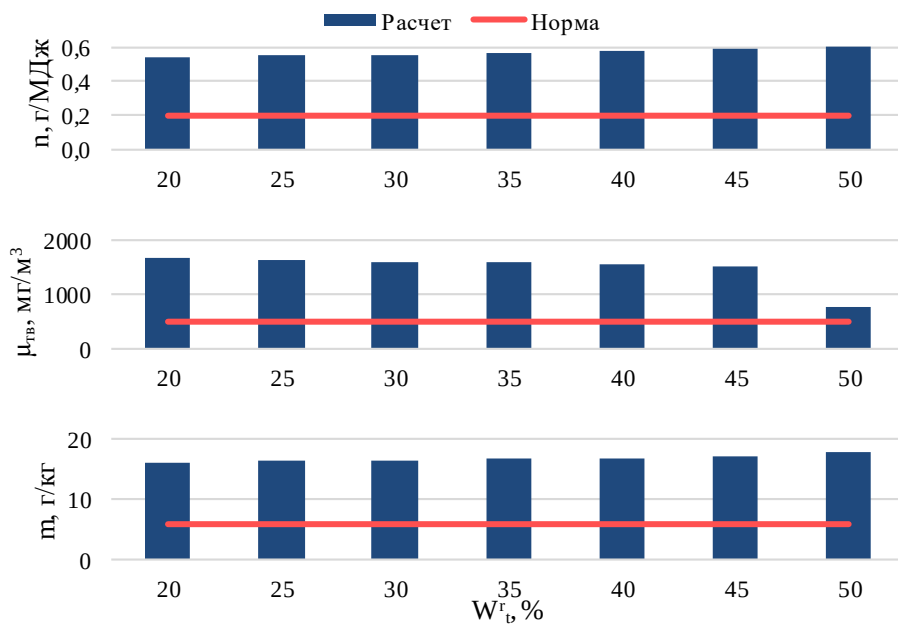


Рисунок 3.49 – Зависимость выбросов твердых частиц от величины рабочей влажности таловского угля (W_t^r)

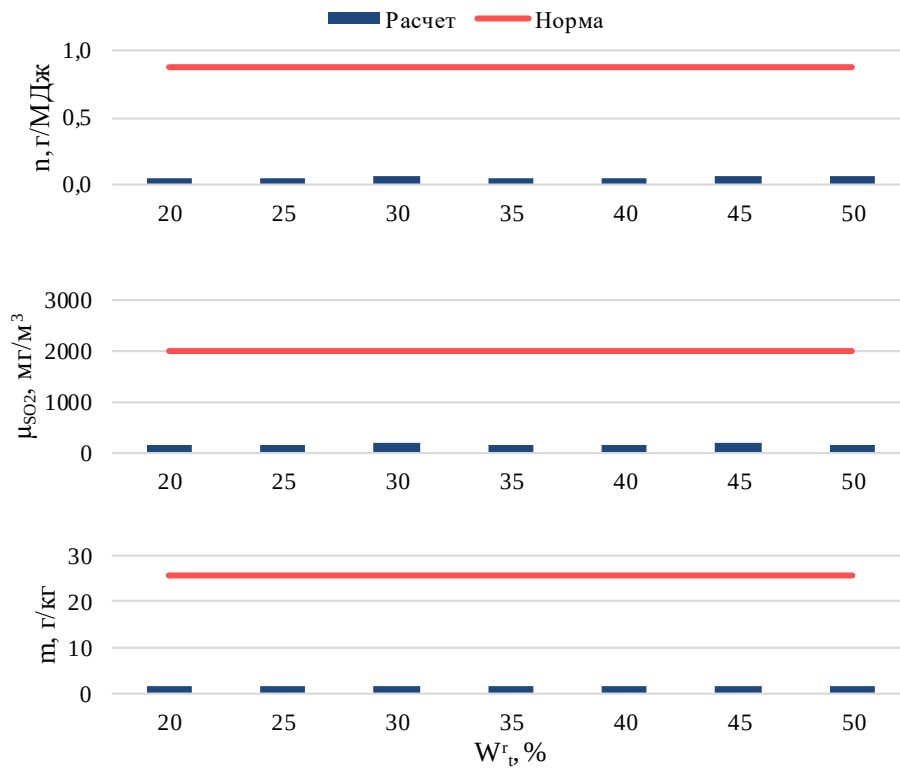


Рисунок 3.50 – Зависимость выбросов оксида серы от величины рабочей влажности таловского угля (W_t^r)

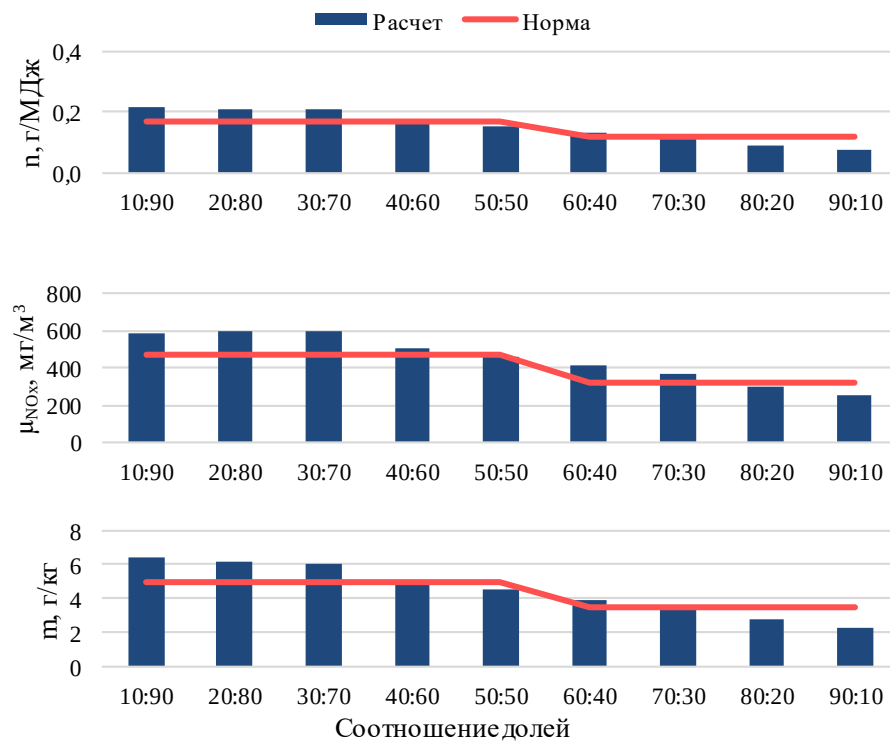


Рисунок 3.51 – Зависимость выбросов оксидов азота от соотношения компонентов исследуемых смесей: таловский и кузнецкий угли на выходе из топки (норма представлена для уходящих газов)

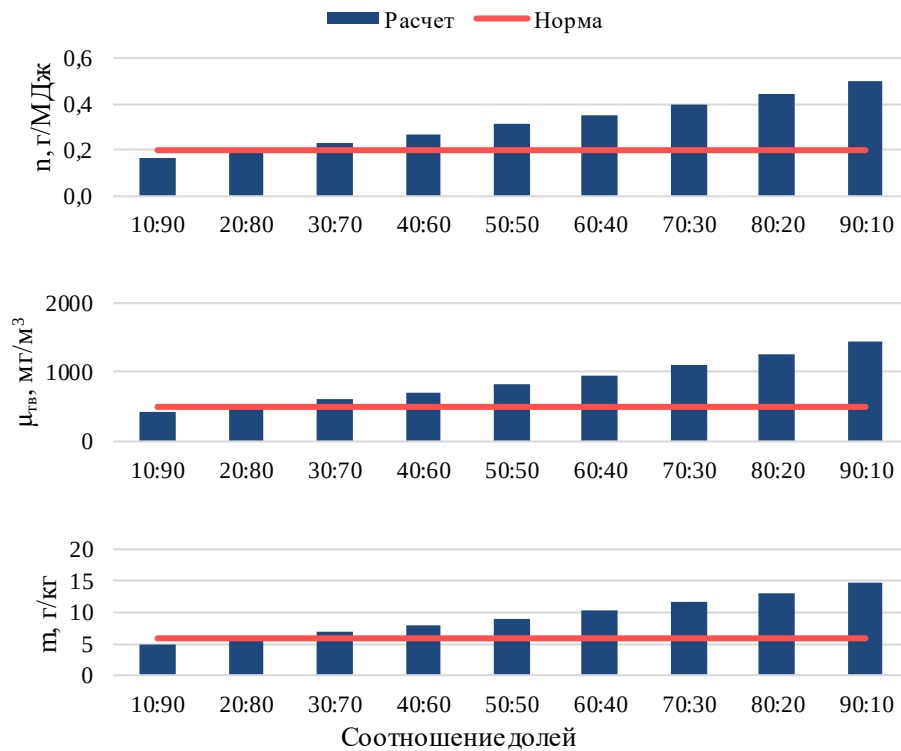


Рисунок 3.52 – Зависимость выбросов твердых частиц от соотношения компонентов исследуемых смесей: таловский и кузнецкий угли

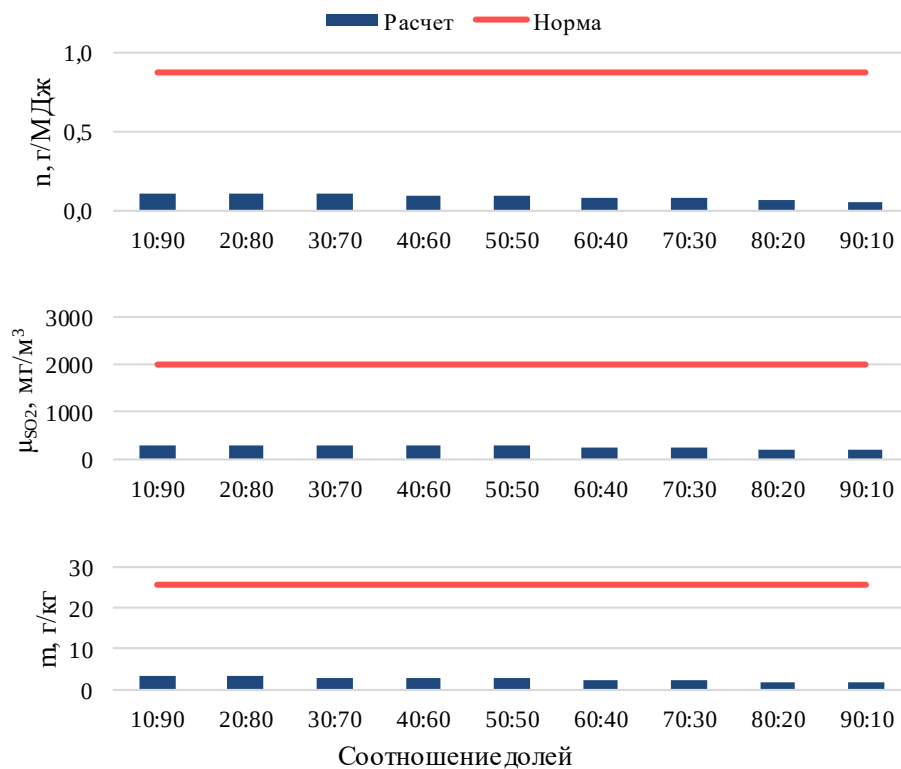


Рисунок 3.53 – Зависимость выбросов оксида серы от соотношения компонентов исследуемых смесей: таловский и кузнецкий угли

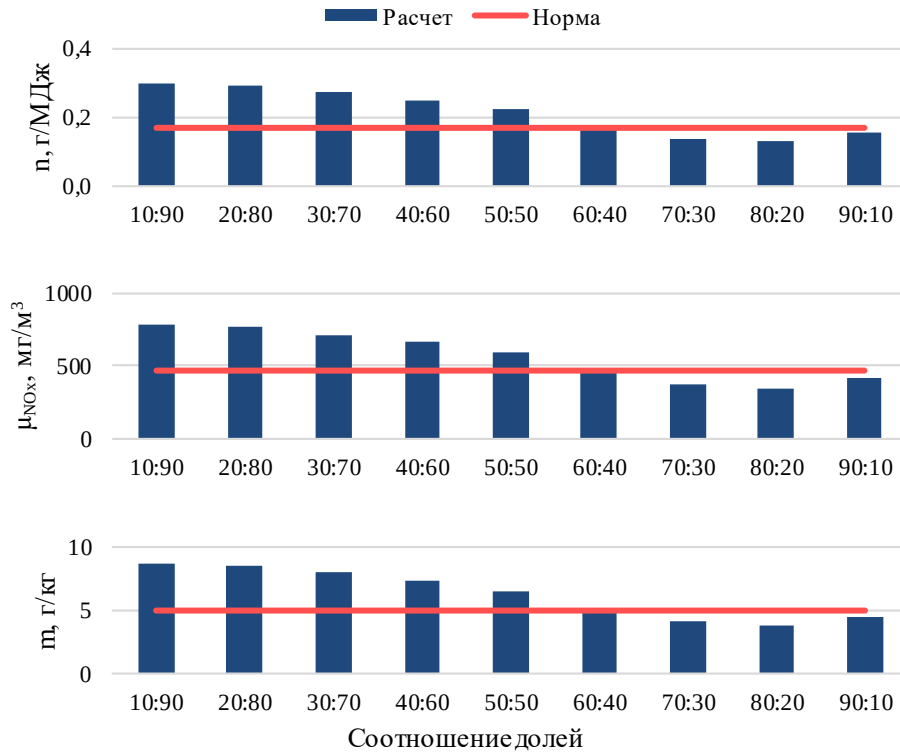


Рисунок 3.54 – Зависимость выбросов оксидов азота от соотношения компонентов исследуемых смесей: полукокс таловского угля и кузнецкий уголь на выходе из топки (норма представлена для уходящих газов)

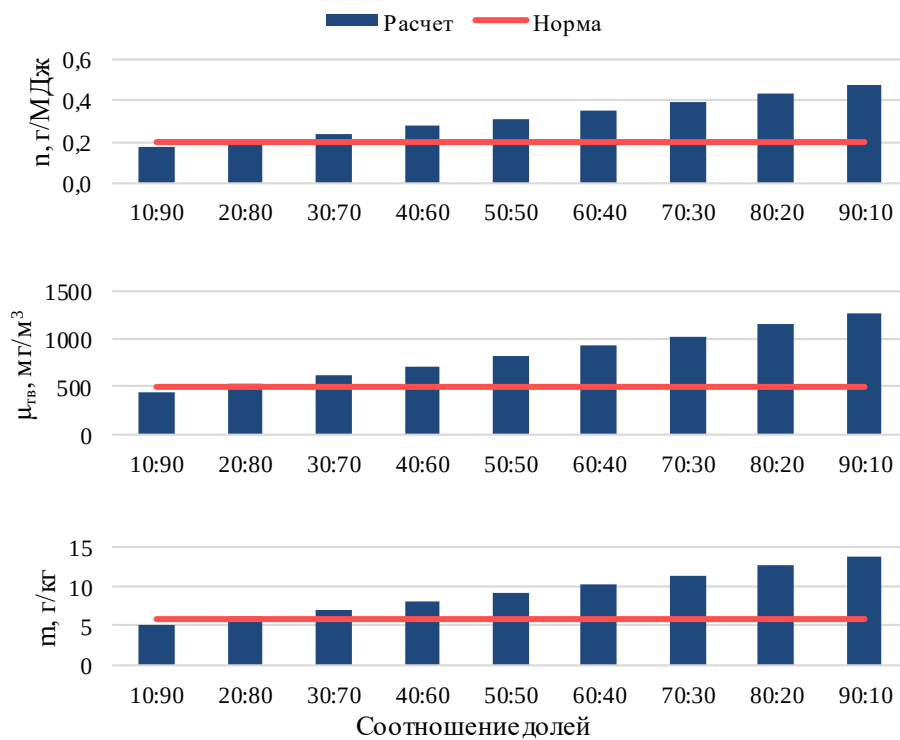


Рисунок 3.55 – Зависимость выбросов твердых частиц от соотношения компонентов исследуемых смесей: полукокс таловского угля и кузнецкий уголь

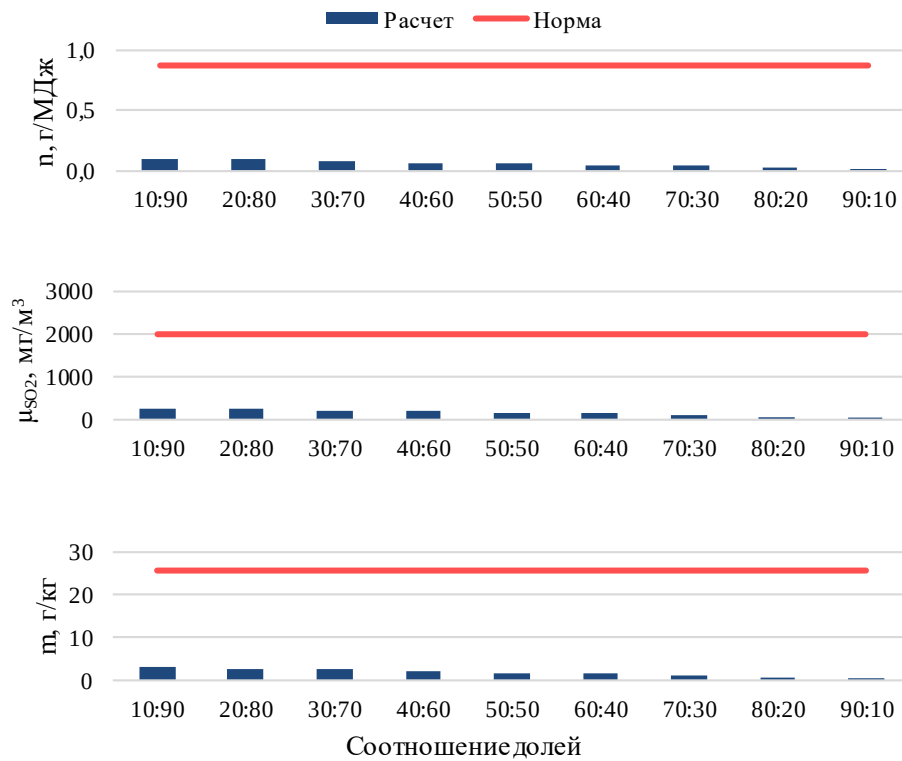


Рисунок 3.56 – Зависимость выбросов оксида серы от соотношения компонентов исследуемых смесей: полукокс таловского угля и кузнецкий уголь

Относительно зависимости выбросов при исследовании смеси полукокса таловского угля и кузнецкого угля (рис. 3.54–3.56) также наблюдается отсутствие превышения нормативного значения выбросов оксида серы. При этом снижение выбросов оксидов азота начинается с 60 % таловского угля в смеси. Увеличение выбросов твердых частиц происходит также с 20 % таловского угля в смеси.

Норма выбросов оксидов азота в исследуемых смесях превышает максимально в 1,6 раза, выбросов твердых частиц – в 3 раза. С учетом произведенных в режимном сечении и в уходящих газах измерений в рамках режимно-наладочных испытаний допускается спрогнозировать снижение выбросов оксидов азота около 10 % на выходе из золоулавливающей установки относительно представленных выше.

ГЛАВА 4. УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАЛОВСКОГО УГЛЯ

Численными исследованиями на основе пакета прикладных программ FIRE 3D получена достаточно подробная, в том числе визуализированная, картина параметров топочной среды, пригодная для изложенного ниже анализа особенностей внутритопочных процессов применительно к рассмотренным в данной работе вариантам использования угля Таловского месторождения в действующих в регионе энергетических установках. Также на основе существующих методик расчетным путем получены данные по количеству выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для рассмотренных вариантов топливных компонентов.

4.1 Сжигание в исходном (натуральном) виде

Применительно к котлу, распространенному на ТЭЦ Сибири, с твердым шлакоудалением и вихревыми горелками (БКЗ-220-100-4) выявлены следующие особенности:

- процессы, протекающие в ходе горения исходного угля во всем диапазоне влажности, симметричны в сечениях топочной камеры котла;

- во всем исследованном диапазоне влажности ярко выраженная зона обратных токов не обнаружена;

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

- 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;

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;

зависимость температуры в ядре горения от влажности таловского угля является обратно пропорциональной;

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

наличие центрально ориентированного ядра горения в поперечном сечении топки во всем диапазоне влажности;

тенденция к скоплению частиц на скате холодной воронки тыльной стороны топочной камеры;

отсутствие превышения нормативных значений по выбросам оксидов азота и оксида серы;

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. При данной влажности процесс горения топлива существенно затягивается и не обеспечивается эффективность его выгорания, что может привести к снижению теплопроизводительности, и, как следствие, скажется на надежности работы котла. Если влажность рабочей массы таловского угля составляет не более 25% , то процесс воспламенения и выгорания топлива является стабильным, с минимальными потерями по недожогу. Объем топки достаточно равномерно заполнен факелом, что создает умеренные температуры в объеме и соответствие рекомендованным значениям [142] на выходе из неё.

4.2 Сжигание в смеси с кузнецким углем

В соответствии с показанными выше результатами численного моделирования и расчетов выбросов имеет смысл рассматривать сжигание таловского угля в смеси. В дальнейших исследованиях к такому расчету принимался таловский уголь с рабочей влажностью 25 %.

Анализируя полученные результаты при сжигании смеси таловского и кузнецкого углей, отмечается следующее:

- характер аэродинамической структуры потока идентичен при разных вариантах;

- скоростной режим среды снижается с увеличением доли таловского угля;

- столкновение потока со стенками топочной камеры и последующее увеличение значений скоростей может негативно сказаться на надежности работы экранных поверхностей нагрева, приведя к абразивному износу стенок труб;

- формирование единого ядра горения происходит при всех исследуемых вариантах;

- значения температур находятся на достаточном уровне для обеспечения выгорания топлива;

- плотное прилегание факела к экранам просматривается при сжигании смеси каждого соотношения;

- распределение в потоке частиц соответствует аэродинамической структуре потока, при этом концентрация меняется с ростом доли таловского угля в сторону увеличения;

- скопление частиц на скатах холодной воронки наблюдается при преобладающей доле таловского угля;

- отсутствие превышения нормативного значения по выбросам оксида серы;

- 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 %.

4.3 Сжигание полукокса в смеси с кузнецким углем

При сжигании смеси полукокса таловского угля и кузнецкого угля можно отметить:

аэродинамическая структура не имеет значительных отличий во всем исследуемом диапазоне;

в пристеночных областях топочной камеры наблюдается увеличение скорости потока;

температурный уровень среды достаточно высокий и повышается с увеличением доли полукокса в смеси;

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;

концентрация частиц в объеме топочной камеры соответствует аэродинамической структуре, имеется пропорциональная зависимость от доли полукокса в смеси;

локальное скопление частиц наблюдается при преобладающей доле полукокса таловского угля;

отсутствие превышения нормативного значения по выбросам оксида серы;

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 %.

4.4 Рекомендации по использованию таловского угля

В соответствии с принадлежностью к различным сферам энергетического производства целесообразно рассматривать предприятия региона в двух наиболее крупных уровнях: энергогенерирующие, в том числе входящие в энергетические комплексы или системы, представленные тепловыми электростанциями; энергетические предприятия промышленного и отопительного назначения, представленные широким спектром объектов, относящихся к промышленным комплексам и системам жизнеобеспечения [143, 144].

4.4.1 Тепловая электростанция

Имея в виду выделенную при обосновании цели и задач исследований возможность предельного уменьшения или полного исключения затрат на реконструкцию оборудования, главным образом основного, следует прежде всего обратить внимание на *непосредственное сжигание* местного угля как наиболее простой путь его вовлечения в региональное энергетическое использование. На этом пути главным ограничением может выступать общее содержание балласта и его составляющих, поскольку для таловских углей характерен весьма широкий диапазон изменения величин зольности и влажности.

Зольность сжигаемого угля влияет на концентрацию твердых частиц в продуктах сгорания и тем самым на полноту очистки дымовых газов в золоуловителе. Кроме того, в эксплуатации следует учитывать фактор золотого износа поверхностей нагрева при высокой скорости дымовых газов в конвективных газоходах, а также образование натрубных отложений.

Оценка прогностического характера о влиянии минеральной части таловских углей выполнена ранее О.А. Казаковой с соавторами [29] на основе расчетных показателей, предложенных сотрудниками УралВТИ [145]. Она

показала, что надежная работа котла по этим условиям может быть обеспечена при сжигании угля с ограничением по зольности сухой массы $A^d \leq 25 \%$. Не менее важным является и учет влияния другой балластной составляющей – влажности. Основанием для этого можно считать результаты выполненного в настоящей работе (глава 3) численного моделирования топочных процессов, согласно которому процессы в топке котла БКЗ-220-100-4 по основным параметрам прогнозируются при влажности таловского угля $W_t^r \leq 25 \%$ как практически идентичные тем, что имеют место при сжигании кузнецкого угля базовой поставки (рис. IV.9, IV.16).

Выявленные таким путем граничные для камерной топки котла типа БКЗ-220-100-4 значения балласта, поступающего на сжигание по технологии «с колес» таловского угля, следует корректировать с учетом образования вредных выбросов.

Как показано выше, при непосредственном сжигании таловского угля наблюдается превышение выбросов твердых частиц. Замена золоулавливающих установок позволит снизить выбросы до 5 раз и соблюсти нормативы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Реализация иного технологического принципа использования таловского угля – *сжигание в смеси с другим твердым топливом* – связана с необходимостью расширения емкости топливного склада и выполнения операций подготовки угольных смесей. Основной задачей при этом оказывается определение оптимальных интервалов соотношения компонентов в смеси, состоящей из низкосортного местного угля и угля, используемого в качестве базового для электростанции. Подобрать эти соотношения опытным путем очень затратно как по времени, так и по ресурсам. В сравнении с этим наиболее предпочтительным является проведение численного моделирования процессов в топке применительно ко всему возможному диапазону состава угольных смесей. Выполненные с этой целью исследования, результаты которых приведены в настоящей работе (глава 3), показывают, что доля таловского угля с влажностью не более 25 % на рабочую массу допустима до 0,3 (рис. V.3, V.12). При этом уместно заметить, что

фактически не исключается увеличение доли этого низкосортного угля в смесевом топливе вместе с кузнецким углем до 0,3–0,5. Данное предположение исходит из того, что во время пребывания на воздухе внешняя разновидность влаги, которая является подавляющей формой в таловском угле, быстро удаляется из него. Однако это потребует повышенного внимания к контролю состояния угля из-за возрастания склонности к самовозгоранию.

Показатели вредных выбросов, определенные расчетом для смесей таловского и кузнецкого углей применительно к условиям сжигания в котле БКЗ-220-100-4, показывают, что при доле таловского угля до 0,3 соблюдаются нормативы выбросов твердых частиц, но превышаются выбросы оксидов азота. Снижение последних возможно режимными методами, установкой малотоксичных горелок или организацией ступенчатого сжигания. По прогнозным оценкам [146], данные мероприятия позволят снизить выбросы оксидов азота от 15 до 70 %.

Как было показано выше при анализе состояния разработок по технологиям переработки таловского угля (глава 1, п. 1.3), при низкотемпературном пиролизе получается полукокс, по своим свойствам пригодный для широкого спектра вариантов энергетического использования, но в зависимости от возможностей топливосжигающего и топливоприготовительного оборудования. С учетом этого полукокс можно рассматривать и как самостоятельное топливо, и как компонент смесевых композиций. В первом варианте наряду с более высокой, чем у исходного угля, теплотворной способностью доминирующим фактором выступает довольно низкий выход летучих веществ из горючей массы. Эта особенность применительно к факельному сжиганию в рассматриваемых топочных устройствах потребует, в качестве минимальной меры, изменения воздушного режима и конструктивных параметров горелок. Следствием этого может стать необходимость изменения в работе систем пылеприготовления, тяги и дутья. Такой объем затратного реконструктивного вмешательства не согласуется с целеполагающим принципом настоящей работы. В другом варианте, когда полукокс используется для подготовки смесей при наличии на складе исходного таловского угля, значительно усложняются этапы и увеличиваются материальные затраты на подготовку

топливных смесей. Необходимо учитывать, что кроме угля, являющегося базовым для электростанции, необходимо отдельно складировать и хранить еще два вида твердого топлива, один из которых (таловский уголь) обладает признаками склонного к самовозгоранию.

По изложенным причинам для тепловой электростанции, оборудованной котлами пылеугольного сжигания, может представлять интерес полукокс таловского угля главным образом в смеси с кузнецким углем. Выполненное численное моделирование для широкого диапазона составов такой смеси (глава 3) показало, что угольно-коксовая смесь очень изменяет параметры топочной среды в исследуемом котле. Предположение об их негативном влиянии на работу поверхностей нагрева котла приводит к выводу о приемлемой доле полукокса таловского угля в смеси с кузнецким углем на уровне $0,25 \div 0,30$. Расчетные значения вредных выбросов с дымовыми газами для такого состава (п. 3.5) характеризуется следующими значениями: концентрации твердых частиц 621 мг/м^3 , оксида серы – 226 мг/м^3 , оксидов азота – 718 мг/м^3 . При этом соответствующие нормативы выбросов достигаются только по выбросам оксида серы. Снижение выбросов твердых частиц возможно достичь при снижении доли полукокса таловского угля в смеси до 20 %. Относительно выбросов оксидов азота достижение нормативов возможно применив меры, как в случае сжигания таловского угля в смеси с кузнецким.

4.4.2 Промышленные и отопительные котельные

Для крупных котельных промышленных предприятий с пылеугольными котлами рекомендации по использованию таловского угля идентичны тем, что обоснованы выше для котлов тепловой электростанции. Однако особенность промышленной и муниципальной теплоэнергетики региона состоит в том, что наиболее крупные котельные работают на природном газе, а в большинстве котельных сжигается твердое топливо (уголь и дрова) в слоевых топках, оборудованных стационарными или движущимися цепными колосниковыми решетками [147]. Для таких котлов принципиально возможно подбирать наиболее оптимальные режимы обслуживания путем трудоемкой теплотехнической

наладки. Но это вряд ли достижимо повсеместно, поскольку требует достаточной инженерной квалификации, нужного уровня которой, как правило, не хватает у персонала, занятого эксплуатацией котельных установок в этой сфере теплотехники.

Территориальная рассредоточенность котельных и зачастую протяженные маршруты доставки до них топлива делают малопригодным таловский уголь для перевозки в естественном виде из-за пониженной теплоты сгорания при высоком содержании балласта, прежде всего влажности. Другим неблагоприятным для слоевого сжигания свойством угля следует считать склонность к растрескиванию и измельчению на воздухе в процессе подсушивания. Это увеличит долю недожога топлива за счет провала через колосниковую решетку и скажется на уменьшении и без того невысокого значения коэффициента полезного действия подавляющего большинства котлов со слоевыми топками, находящихся в эксплуатации, особенно в отопительных котельных.

Возвращаясь к анализу технологических подходов к использованию таловского угля, приведенному в главе 1 (п. 1.3) настоящей работы, есть все основания заключить, что технология низкотемпературной термической конверсии [44] угля может стать вполне подходящим и реализуемым этапом для обеспечения экономичной и надежной работы слоевых топок. Получаемый по этой технологии полукокс представляет собой, по сути, так называемое облагороженное топливо, которое является альтернативным по свойствам естественному таловскому углю. Более высокая теплотворная способность при минимальной влажности, невысоких значениях влагоемкости и выхода летучих веществ многократно увеличивает возможности использования таловского полукокса как транспортабельного топлива. При этом организацию режимов сжигания в слое можно ориентировать на восприятие отработанной практики сжигания тощих каменных углей.

Ареал распространения таловского угля в виде полукокса в сфере теплотехники может быть существенно расширен за счет внедрения технологии производства формованного топлива. Получаемые из полукокса брикеты и пеллеты, размеры которых превышают воздушно-дутьевые проемы в

колосниковой решетке, пригодны для сжигания в слоевых топках с обеспечением минимизации потерь от провала. Если для этой технологии отобрать наименее зольную часть месторождения, то реально обеспечивать транспортабельным формованным топливом, например, муниципальные котельные.

Высокозольная часть угля из Таловского месторождения тоже может найти применение в теплотехнических целях посредством той же конверсии, но направленной на газообразную составляющую процесса в качестве целевого продукта. Как показали соответствующие исследования, получаемый горючий газ содержит водород, метан, оксид углерода [44]. Очевидно, что этот вариант будет наиболее рентабельным в случае обеспечения вырабатываемым газообразным топливом энергетического производства, территориально размещенного вблизи от разрабатываемого угольного месторождения.

Такой же логистический подход к транспортированию топлива потребителю ожидаемо осуществим в случае реализации разработки Таловского месторождения по методу подземной газификации. Этот метод относительно малораспространенный, однако считается эффективным в применении к угольным пластам небольшой мощности или с осложненными условиями залегания. Исследования применительно к технологической схеме организации процесса, рассмотренной в [53, 54] (см. п. 1.3), показали возможность доведения массовой концентрации горючих газов до уровня, приемлемого для энергетического сжигания.

Выбросы в окружающую среду от промышленных и отопительных котельных определяются расчетным путем по методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час [148] с учетом локальных фоновых концентраций [149]. Для совокупности котельных региона в зависимости от вида сжигаемого топлива и мощности они находятся в следующих диапазонах: для твердых частиц $0,147 \div 0,875$, для газов $0,0017 \div 0,0275$, полученные расчетом как значения суммы отношений ожидаемых фактических

концентраций вредных веществ от котельных к предельно допустимым концентрациям.

4.4.3 Реперные значения расчетных параметров для рекомендованных вариантов топлива

Итоговые ориентиры по применению вариантов топлива на основе таловских углей приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Реперные значения расчетных параметров для рекомендованных вариантов топлива

Топливо	Максимальная температура на выходе из топки, °С	Среднеинтегральная температура на выходе из топки, °С	Концентрация оксидов азота, мг/м³
Исходный таловский уголь, влажность, %			
20	983	912	ниже нормативного значения
25	1060	1000	
30	1009	944	
35	984	923	
Смесь таловского и кузнецкого углей, соотношение			
10:90	1013	933	581
20:80	1046	964	593
30:70	1026	960	573
40:60	924	963	502
Смесь таловского полукокса и кузнецкого угля, соотношение			
10:90	1050	979	781
20:80	1060	988	772
30:70	1064	991	718

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию возможностей вовлечения в энергетическое использование бурого угля Таловского месторождения путем сжигания в топочных устройствах котлов. В этом аспекте настоящие исследования представляют собой продолжающий этап в ряду с выполненными ранее в Томском политехническом университете работами по использованию в энергетике угля данного месторождения.

Систематизация опубликованных материалов по оценке запасов и теплотехнических свойств, подтвердившая целесообразность использования таловского угля как местного топлива с ограниченными возможностями для дальнего транспортирования, позволила выделить в качестве приоритетного принципа предназначенность для обеспечения региональной энергетической безопасности. На этой основе и с учетом анализа опыта сжигания подобных низкосортных топлив в котлах тепловых электростанций сформулирована цель диссертационной работы и определены объекты исследования – котлы, установленные на одном из наиболее крупных энергетических предприятий региона. Основным объектом является пылеугольный котел БКЗ-220-100-4 с встречным на боковых стенах расположением горелок, работающий на каменном угле Кузнецкого бассейна. Объектом сравнительной оценки результатов исследования принят котел БКЗ-210-140Ф с угловым расположением прямоточных горелок, скомпонованных по тангенциальной схеме, спроектированный на сжигание бурого угля.

В соответствии с поставленной целью и задачами, направленными на ее достижение, рассмотрены различные технологические варианты использования таловского угля как топлива: в виде исходного угля во всем диапазоне влажности рабочей массы; в виде полукокса, получаемого в результате низкотемпературной паротепловой конверсии; в виде смесей в широком диапазоне соотношений с углем, поставленным извне в регион.

Основой проведенных исследований для всех рассмотренных вариантов явилось численное моделирование топочных процессов в пакете прикладных программ FIRE 3D и анализ получаемых параметров топочной среды, влияющих на экономичность сжигания и надежность работы поверхностей нагрева, а также на условия генерации вредных выбросов. Для верификации результатов использовались экспериментальные данные режимно-наладочных испытаний, проводившихся специализированными организациями для тех же объектов исследования, что и в настоящей работе. Расширению информационного поля при обсуждении результатов и обосновании подходов к промежуточным и итоговым выводам способствовали выполненные для всех рассмотренных вариантов поверочные тепловые расчеты на основе нормативных методов, а также расчеты вредных выбросов по действующим отраслевым нормативно-техническим и методическим материалам.

Совокупность вышеуказанных подходов позволила обосновать оптимальную величину влажности таловского угля для варианта его сжигания в исходном виде и оптимальные соотношения для вариантов использования в составе топливных смесей.

Итоговым этапом исследования согласно поставленным задачам проведена выработка рекомендаций по использованию таловского угля в энергетической сфере региона, включая как объекты централизованной электро- и теплогенерации, так и источники распределённого теплоснабжения. При этом приняты во внимание также результаты исследований других авторов, в частности, оценка технической реализуемости конверсионных технологий с получением продуктов, транспортабельных в пределах региона.

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 оксида 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуреева, М. А. Современные тенденции развития топливно-энергетического комплекса и экономическая безопасность России [Текст] / М. А. Гуреева // Экономика и управление. – 2015. – № 4. – С. 6–10.
2. Макаров, А. А. Системные исследования развития энергетики [Текст]: курс лекций / А. А. Макаров. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 280 с.
3. Тугов, А. Н. Производство электроэнергии в мире: тенденции и достигнутые в 2021 г. результаты [Текст] / А. Н. Тугов, И. В. Артемьева // Электрические станции. – 2022. – № 11(1096). – С. 2–11.
4. Тугов, А. Н. Современное состояние и перспективы угольной энергетики [Текст] / А. Н. Тугов // Енисейская теплофизика: тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 года / Отв. за выпуск Д. В. Платонов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 14–16.
5. Единая энергетическая система России: промежуточные итоги (оперативные данные) [Электронный ресурс] // Системный оператор единой энергетической системы. – 2022. – Режим доступа: https://www.sops.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups_review_0122.pdf.
6. Хохлов, А. Угольная генерация: новые вызовы и возможности [Электронный ресурс] / А. Хохлов, Ю. Мельников. – Сколково: Центр энергетики Московской школы управления, 2019. – Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Coal_generation_2019.01.01_Rus.pdf.
7. Тумановский, А. Г. Перспективы развития угольных ТЭС России [Текст] / А. Г. Тумановский // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
8. Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 20.05.2019. – № 20. – Ст. 2421.

9. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» // Собрание законодательства РФ. – 15.06.2020. – № 24. – Ст. 3847.

10. Топливные ресурсы Томской области для альтернативного энергетического использования [Текст] / А. С. Заворин, Т. С. Тайлашева, К. В. Буваков и другие // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 55–65.

11. Основные направления развития минерально-сырьевой базы Томской области (твердые полезные ископаемые) [Текст] / А. В. Комаров, Г. А. Добнер, В. А. Баженов и другие // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири: материалы научной конференции, посвященной 120-летию основания Томского государственного университета, Томск, 1–4 апреля 1998 года. – Томск: Изд-во Томского университета, 1998. – Том 3. – С. 75–79.

12. Гринев, О. М. Об уровне геологической изученности и регионально-минерогенических предпосылках наращивания минерально-сырьевой базы Томской области [Текст] / О. М. Гринев // Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири: материалы межрегиональной научно-практической конференции, Томск, 2005 год. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 80–86.

13. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). – 2021. – Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf>.

14. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Томской области на 15.03.2021 г. [Электронный ресурс] // ФГБУ «ВСЕГЕИ»: в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00, 2021. – Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/fed658378ef2e95442b5c1f9ad61cb9d.pdf>.

15. Сорокин, Б. Л. Результаты глубинного геологического картирования Томской площади [Текст]: информационный отчет по геологическому заданию 56-30 за 1990–1994 года / Б. Л. Сорокин. – Новосибирск: ТФ «Томскгеолкома», 1994. – 46 с.
16. Галанский, В. М. Результаты аэрогеофизической съемки масштаба 1:50000 на Томской площади [Текст]: отчет Центральной экспедиции № 56 за 1991 год / В. М. Галанский, Н. Г. Лященко – Новосибирск: ТФ «Томскгеолкома», 1992. – 182 с.
17. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на Таловском месторождении бурого угля в 1997–2000 годах [Текст] / П. Н. Прокопенко, Т. И. Черникова, А. Ф. Шамахов и другие. – Томск: ТФ «Томскгеолкома», 2000. – 198 с.
18. Паровинчак, М. С. Пути оптимизации топливно-энергетического баланса (ТЭБ) Сибирских регионов на примере Томской области [Текст] / М. С. Паровинчак, Н. М. Смолянинова // Томская горнодобывающая компания: сборник публикаций к 5-летию ТомГДК, 2001–2005 годы. – Томск: СТТ, 2006, С. 74–80.
19. Черняев, Е. В. Твердые полезные ископаемые Томской области [Текст] / Е. В. Черняев, В. К. Бернатонис, Г. Ю. Боярко // Региональная геология. Геология месторождений полезных ископаемых: материалы Международной конференции «Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства», Томск, 2001 год. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 361–368.
20. Техничко-экономические соображения о возможном промышленном значении Таловского месторождения угля [Текст]: пояснительная записка. – Новосибирск: СИБГИПРОШАХТ, 1997. – 138 с.
21. Девятов, В. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000 [Текст]: издание второе: серия Западно-Сибирская, подсерия Обская: 0-45-XXVI (Итатка): объяснительная записка / В. П. Девятов. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 154 с.

22. Проект комплексного освоения Таловского бурогоугольного месторождения [Текст] / В. С. Скобельский, Ю. Н. Нисковский, В. И. Лунев, К. М. Паровинчак // Томская горнодобывающая компания: сборник публикаций к 5-летию ТомГДК, 2001–2005 годы. – Томск: STT, 2006, С. 68–69.

23. Геологическая библиотека «GeoKniga» [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://www.geokniga.org/>.

24. Теплотехнические свойства углей Таловского месторождения Томской области [Текст] / С. К. Карякин, А. С. Заворин, С. Г. Маслов и другие // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 131–136.

25. Емешев, В. Г. Без привозной энергетики [Текст] / В. Г. Емешев, М. С. Паровинчак // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 17. – С. 63–65.

26. Казакова, О. А. Исследование состава минеральной части угля Таловского месторождения Томской области как энергетического топлива [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14: защищена 25.12.2006 / Казакова Оксана Александровна. – Томск, 2006. – 138 с.

27. Казакова, О. А. Состав неорганической части угля Таловского месторождения Томской области [Текст] / О. А. Казакова, А. С. Заворин, А. В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 49–52.

28. Казакова, О. А. Оценка технологических параметров при энергетическом использовании угля Таловского месторождения Томской области [Текст] / О. А. Казакова, А. С. Заворин, А. В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 45–50.

29. Казакова, О. А. Исследование угля Таловского месторождения Томской области [Текст]: монография / О. А. Казакова, А. С. Заворин, А. В. Казаков; Томский политехнический университет. – Томск: STT, 2010. – 172 с.

30. Алехнович, А. Н. Методические рекомендации по исследованию шлакующих и загрязняющих свойств углей [Текст] / А. Н. Алехнович, Э. П. Дик. – Челябинск: УралВТИ, 1998. – 66 с.

31. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла [Текст] / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов, В. Е. Гладков, Н. В. Артемьева // Теплоэнергетика. – 1997. – № 3. – С. 64–68.
32. Алехнович, А. Н. Температурные условия начала шлакования при сжигании углей с кислым составом золы [Текст] / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 34–38.
33. Алехнович, А. Н. Выбор температуры газов на выходе из топки по условиям шлакования [Текст] / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов // Теплоэнергетика. – 1994. – № 8. – С. 23–26.
34. Алехнович, А. Н. Прогнозирование шлакования по химическому составу частичек летучей золы [Текст] / А. Н. Алехнович, В. Е. Гладков, В. В. Богомолов // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 23–28.
35. Алехнович, А. Н. Вероятностная модель формирования шлаковых отложений [Текст] / А. Н. Алехнович // Электрические станции. – 1995. – № 2. – С. 16–20.
36. Исследования шлакующих свойств смесей углей [Текст] / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов, Н. В. Артемьева, В. Е. Гладков // Теплоэнергетика. – 2000. – № 8. – С. 35–40.
37. Алехнович, А. Н. Расчет вязкости шлаковых расплавов и его использование для анализа применимости непроектных углей [Текст] / А. Н. Алехнович // Теплоэнергетика. – 2003. – № 12. – С. 20–25.
38. Алехнович, А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей [Текст] / А. Н. Алехнович; ОАО «Инженерный Центр Энергетики Урала», филиал «УралВТИ». – Челябинск: Цицеро, 2012. – 548 с.
39. Возможные нетрадиционные направления использования углей и торфов Томской области [Текст] / А. С. Заворин, А. А. Макеев, А. В. Казаков и другие // Обсуждение проблем и перспектив освоения Бакчарского железорудного, Георгиевского титан-циркониевого и Таловского буроугольного месторождений Томской области: материалы круглого стола, Томск, 16–17 марта 2006 года. – Томск: STT, 2006. – С. 70–79.

40. Ушаков, К. Ю. Изучение состава продуктов термической переработки углей [Текст] / К. Ю. Ушаков, А. Р. Богомолов, И. Я. Петров // Бурение и нефть. – 2019. – № 4. – С. 26.

41. Ушаков, К. Ю. Исследование термических превращений низкометаморфизованных кузбасских углей в различных средах и прогнозирование их гидрируемости в процессах прямого ожижения [Текст] / К. Ю. Ушаков, И. Я. Петров, А. Р. Богомолов // Химия твердого топлива. – 2021. – № 4. – С. 3–12.

42. Казаков, А. В. Конверсия некондиционных топлив в низкотемпературном режиме [Текст]: монография / А. В. Казаков, А. С. Заворин; Томский политехнический университет. – Томск: STT, 2011. – 255 с.

43. Бурнусов, М. Э. Генерация газов из бурого угля [Текст] / М. Э. Бурнусов // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной научной школы-конференции, Томск, 1–3 ноября 2016 года. – Томск: ЦРУ, 2016. – Т. 2. – С. 192–196.

44. Казаков, А. В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04: защищена 21.06.2002 / Казаков Александр Владимирович. – Томск, 2002. – 159 с.

45. Богомолов, А. Р. Направления переработки отходов угольной отрасли [Текст] / А. Р. Богомолов, Е. Ю. Темникова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014: материалы XV международной научно-практической конференции, Кемерово, 06–07 ноября 2014 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2014. – С. 22.

46. Топливные брикеты из кека [Текст] / Е. Ю. Темникова, А. Р. Богомолов, В. З. Горина, Н. Д. Вилисов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2022. – № 10. – С. 45–49.

47. Табакаев, Р. Б. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья [Текст] / Р. Б. Табакаев, А. С. Заворин // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 5. – С. 36–38.

48. Табакаев, Р. Б. Разработка инженерно-аппаратурного оформления энергосберегающей технологической схемы производства твёрдого композитного топлива из низкосортного сырья [Текст] / Р. Б. Табакаев, А. В. Казаков, А. С. Заворин // Химическая технология. – 2015. – № 6 – С. 363–369.

49. Табакаев, Р. Б. Оценка тепловых энергозатрат в технологии получения твёрдого композитного топлива из низкосортного сырья [Текст] / Р. Б. Табакаев, А. В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 110–117.

50. Thermal Energy Consumption in the Heat-Technology Production of Solid Composite Fuel From Low-Grade Raw Materials [Электронный ресурс] / R. Tabakaev A. Astafev, A. Kazakov, A. Zavorin // European Physical Journal Web of Conferences. – 2016. – Vol. 110. – P. 01057. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611001057>.

51. Табакаев, Р. Б. Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Табакаев Роман Борисович. – Красноярск, 2015. – 20 с.

52. Пат. 2490445 Российская Федерация, МПК E21B 43/295, C10J 3/00. Способ подземной газификации угля [Текст] / Заворин А. С., Казаков А. В., Табакаев Р. Б.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – № 2011128148/03; заявл. 07.07.2011; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 6 с.

53. Subbotin, A. N. Numerical analysis of the underground coal gasification syngas composition in dependence to supplied oxidizer properties [Электронный ресурс] / A. N. Subbotin, A. S. Tarazanov, K. Yu. Orlova // 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: State Technical University, 2017. – Pt. 2. – P. 303–307. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884253>.

54. Субботин, А. Н. Математическое моделирование тепломассопереноса при подземной газификации угля [Текст] / А. Н. Субботин, Р. Н. Кулеш, А. С. Мазаник // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 25–32.

55. Энергетическое использование местных низкосортных топлив на примере угля Таловского месторождения Томской области [Текст] / А. С. Заворин, Е. С. Воронцова, А. В. Гиль и другие // 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.

56. План электрификации РСФСР [Текст]: доклад VIII съезду Советов государственной комиссии по электрификации России. – Москва: Госполитиздат, 1955. – 660 с.

57. История энергетической техники: учебное пособие [Текст] / Л. Д. Белькинд, О. Н. Веселовский, И. Я. Конфедератов, Я. А. Шнейберг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 664 с.

58. Кнорре, Г. Ф. Топочные процессы [Текст] / Г. Ф. Кнорре. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. – 328 с.

59. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие [Текст] / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, С. А. Михайленко. – Красноярск: Сибирский федеральный университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 606 с.

60. Щеголев, М. М. Топливо, топки и котельные установки [Текст] / М. М. Щеголев. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. – 545 с.

61. Мадоян, А. А. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах [Текст] / А. А. Мадоян, В. Н. Балтян, А. Н. Гречаный. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.

62. А. с. 705197 СССР, МПК F23C 5/24. Топочное устройство с пересекающимися струями для сжигания различных видов топлива [Текст] /

М. А. Изюмов, В. И. Куприянов, П. В. Росляков (СССР). – № 2499436; заявл. 23.06.1977; опубл. 25.12.1979, Бюл. № 47. – 2 с.

63. Котлер, В. Р. Исследование полукотловой топки с встречно-наклонным расположением горелок [Текст] / В. Р. Котлер, С. Н. Миронов // Теплоэнергетика. – 1972. – № 3. – С. 76–78.

64. А. с. 288218 СССР, МПК F23J 1/08, F23C 5/24. Вихревая топка [Текст] / Н. В. Голованов, В. В. Померанцев (СССР). – № 691567/24-6; заявл. 02.01.1961; опубл. 03.12.1970, Бюл. № 36. – 2 с.

65. А. с. 483559 СССР, МПК F23C 99/00. Способ работы топки [Текст] / В. В. Померанцев, Ю. А. Рундыгин, С. М. Шестаков и другие (СССР). – № 1911302; заявл. 17.05.1973; опубл. 05.09.1975, Бюл. № 33. – 2 с.

66. Высокоэффективные огневые процессы / под ред. М.А. Наджарова. – М.: Энергия, 1967. – 295 с

67. Опыт освоения вихревой технологии сжигания твердого топлива [Текст] / А. Н. Штым, Е. Г. Воротников, О. В. Распутин, К. А. Штым // Энергетик. – 2011. - № 9. – С. 23–26.

68. Результаты освоения опытно-промышленного котла производительностью 820 т/ч с кольцевой топкой при сжигании азейских и ирша-бородинских бурых углей [Текст] / Ф. А. Серант, О. И. Будилов, В. Е. Остапенко, В. П. Сеннов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 8. – С. 2–10.

69. Пат. 2377465 Российская Федерация, МПК F23C 5/08. Топка парогенератора [Текст] / Серант Ф. А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «КОТЭС-Сибирь» – № 2008149717/06; заявл. 16.12.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 7 с.

70. Серант, Ф. А. Разработка котла с кольцевой топкой П-образной компоновки [Текст] / Ф. А. Серант, А. И. Цепенюк // Новое в российской электроэнергетике: ежемесячный электронный журнал. – 2012. - № 6. – С. 11–27.

71. Серант, Ф. А. Пылеугольные котлы с кольцевой топкой для крупных энергоблоков. Издание второе, переработанное и дополненное результатами освоения и испытаний первого промышленного котла 820 т/ч с кольцевой топкой

[Текст] / Ф. А. Серант. – Новосибирск: Издательство ООО «Фортуна Принт», 2021. – 265 с.

72. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 1. Аэродинамика течения в вихревой топке [Текст] / Д. В. Красинский, В. В. Саломатов, И. С. Ануфриев и другие // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 41.

73. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке [Текст] / Д. В. Красинский, В. В. Саломатов, И. С. Ануфриев и другие // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 54.

74. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220-100 [Текст] / К. А. Григорьев, В. Е. Скудицкий, Ф. Р. Валиев, В. В. Литвиненко // Энергетик. – 2009. – № 1. – С. 24–26.

75. Григорьев, К. А. Разработка и внедрение технологических решений, повышающих эффективность низкотемпературного вихревого сжигания топлива [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14: защищена 26.04.2011 / Григорьев Константин Анатольевич. – СПб., 2010. – 227 с.

76. Пат. 2253799 Российская Федерация, МПК F23C 5/24, F23C 3/00, F23C 7/02. Вихревая топка [Текст] / Григорьев К. А., Скудицкий В. Е., Рундыгин Ю. А. и другие; заявители и патентообладатели Григорьев Константин Анатольевич, Скудицкий Виталий Ефимович. – № 2004120099/06; заявл. 28.06.2004; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 7 с.

77. Пат. 2253800 Российская Федерация, МПК F23C 5/24, F23C 3/00, F23C 7/02. Вихревая топка [Текст] / Григорьев К. А., Скудицкий В. Е., Рундыгин Ю. А. и другие; заявители и патентообладатели Григорьев Константин Анатольевич, Скудицкий Виталий Ефимович. – № 2004121073/064; заявл. 02.07.2004; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 8 с.

78. Пат. 2253801 Российская Федерация, МПК F23C 5/24, F23C 7/02. Вихревая топка [Текст] / Григорьев К. А., Скудицкий В. Е., Рундыгин Ю. А. и другие; заявители и патентообладатели Григорьев Константин Анатольевич,

Скудицкий Виталий Ефимович. – № 2004121805/06; заявл. 12.07.2004; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 6 с.

79. Рябов, Г. А. Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14: защищена 10.11.2016 / Рябов Георгий Александрович. – М., 2016. – 291 с.

80. Неуймин, В. М. Тенденции совершенствования основных оборудования и технологий ТЭС [Текст] / В. М. Неуймин // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. - № 11. – С. 5–16.

81. Алексеенко, С. В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив [Текст] / С. В. Алексеенко, С. Э. Пащенко, В. В. Саломатов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – № 4. – С. 682–693.

82. Зажигание капель водоугольного топлива в потоке воздуха [Текст] / А. В. Захаревич, В. В. Саломатов, П. А. Стрижак, С. В. Сыродой // Химия твердого топлива. – 2016. – № 3. – С. 25–29.

83. Влияние теплофизических свойств водоугольного топлива на условия его воспламенения [Текст] / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов, А. В. Захаревич, В. В. Саломатов // Химия твердого топлива. – 2017. – № 3. – С. 31–37.

84. Анализ сжигания водоугольного топлива в котле малой мощности с использованием численного моделирования [Текст] / В. А. Кузнецов, Л. И. Мальцев, А. А. Дектерев, М. Ю. Чернецкий // 7 Российская национальная конференция по теплообмену: труды конференции, Москва, 22–26 октября 2018 года. – М.: МЭИ, 2018. – Т. 1. – С. 410–412.

85. Маслов, В. Е. Пылеконцентраторы в топочной технике [Текст] / В. Е. Маслов. – М.: Энергия, 1977. – 283 с.

86. Лейкин, В. З. Современные технологии эффективного сжигания топлива на ТЭС [Текст] / В. З. Лейкин, Н. С. Шестаков // Надёжность и безопасность энергетики. – 2013. - № 3(22). – С. 20–27.

87. Распоряжение Губернатора Томской области от 29.04.2022 № 103-р «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Томской

области на период 2023–2027 годов» [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – 2022. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/467977592>.

88. ООО «Сибэнергомаш – БКЗ» [Электронный ресурс] // b2b платформа для поставщиков. – 2023. – Режим доступа: <https://energybase.ru/vendor/sibenergomash>.

89. Сибэнергомаш – производство котлов, котельного оборудования [Электронный ресурс] // Барнаульский котельный завод СибЭМ БКЗ – 2023. – Режим доступа: <http://www.sibem-bkz.com>.

90. Математическое моделирование топочных процессов при модернизации топки котла БКЗ-210-140Ф на вир-технологиию [Электронный ресурс] / Т. М. Бетхер, Б. В. Лебедев, А. В. Гиль; науч. рук. А. С. Заворин // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12–16 апреля 2010 года. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – Т. 3. – С. 162–163. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2010/C01/V1/075.pdf>.

91. Заворин, А. С. Анализ топочной среды котла БКЗ-210-140 на основе численного моделирования [Текст] / А. С. Заворин, Т. М. Бетхер, Б. В. Лебедев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 50–55.

92. Котлы большой мощности [Текст]: каталог-справочник К2-69. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 142 с.

93. Вакджира, М. Б. Исторический аспект математического моделирования [Текст] / М. Б. Вакджира // Вестник РУДН. Психология и педагогика. – 2012. – № 4. – С. 66–70.

94. Корешкова, И. А. История математического моделирования и технологии вычислительного эксперимента [Текст] / И. А. Корешкова // Научные исследования в образовании. – 2009. – № 4. – С. 33–44.

95. Ковеня, В. М. Некоторые тенденции развития математического моделирования [Текст] / В. М. Ковеня // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7. – № 2. – С. 59–73.

96. Воронцова, Е. С. Особенности использования непроектных углей на ТЭС [Текст] / Е. С. Воронцова, Т. С. Тайлашева // Теплоэнергетика: материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2012», Иваново, 17–19 апреля 2012 года. В 7 т. Т. 1, Ч. 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2012. – С. 3–6.

97. Ansys Fluent [Электронный ресурс] // Интегратор технологий ANSYS в России и странах СНГ. – 2023. – Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-fluent>.

98. Симцентр STAR-CCM+ [Электронный ресурс] // Программное обеспечение Сименс. – 2023. – Режим доступа: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/>.

99. FLOW-3D [Электронный ресурс] // Решение самых сложных проблем CFD в мире. – 2023. – Режим доступа: <https://www.flow3d.com/>.

100. OpenFOAM [Электронный ресурс] // Программное обеспечение CFD. – 2023. – Режим доступа: <https://www.openfoam.com/>.

101. Flow Vision [Электронный ресурс] // Российский CAE-пакет для междисциплинарного моделирования устройств и физических процессов. – 2023. – Режим доступа: <https://flowvision.ru/ru/>.

102. ЛОГОС [Электронный ресурс] // Пакет программного обеспечения для математического моделирования и инженерного анализа. – 2023. – Режим доступа: <http://www.logos.vniief.ru/>.

103. Зибаров, А. В. Пакет прикладных программ GAS DYNAMICS TOOL и его применение в задачах численного моделирования газодинамических процессов [Текст]; дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: 05.13.16: защищена 15.07.2000 / Зибаров Алексей Владимирович. – Тула, 2000. – 317 с.

104. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619439 Российская Федерация. Программный комплекс «VP2/3 Thermophysics» для численного моделирования вихревой интенсификации термогидродинамических процессов в теплообменных установках [Текст] / Исаев С. А., Баранов П. А., Усачев А. Е. – Заявка № 2015616220. Дата поступления 08 июля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 сентября 2015 г.

105. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611921 Российская Федерация. Программный модуль для моделирования гидродинамики SigmaFlow-GPGPU [Текст] / Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Сентябов А. В. и другие. – Заявка № 2017662894. Дата поступления 12 декабря 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2018 г.

106. Опыт параллелизации вычислений при расчете отрывных течений на основе трехмерных нестационарных формулировок [Текст] / Д. К. Зайцев, Е. М. Смирнов, П. Е. Смирнов и другие // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – № 1. – С. 95–102.

107. Bubenchikov, A. M. Numerical analysis of the aerodynamics and combustion of a turbulent pulverized-coal burner jet [Текст] / A. M. Bubenchikov, A. V. Starchenko // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1997. – Vol. 33. – № 1. – P. 41–48.

108. Воронцова, Е. С. Численное исследование процессов горения в топке энергетического котла с вихревыми горелочными устройствами [Текст] / Е. С. Воронцова, А. В. Гиль, М. О. Кокшарев // XI Семинар вузов по теплофизике и энергетике: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–23 октября 2019 года. – СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. – С. 100–101.

109. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками [Текст] / А. В. Гиль, А. С. Заворин, О. М. Кокшарев,

Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.

110. Сравнительный анализ CFD-пакетов SigmaFlow и Ansys Fluent на примере решения ламинарных тестовых задач [Текст] / Д. В. Платонов, А. В. Минаков, А. А. Дектерев, Е. Б. Харламов // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 1(21). – С. 84–94.

111. Дектерев, А. А. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач [Текст] / А. А. Дектерев, А. А. Гаврилов, А. В. Минаков // Сборник научных статей: современная наука. – 2010. – № 2(4). – С. 117–122.

112. Специализированное программное обеспечение для решения прикладных теплофизических задач [Текст] / А. А. Дектерев, К. Ю. Литвинцев, А. А. Гаврилов, Д. В. Бойков // Цифровые средства производства инженерного анализа: сборник материалов Первой всероссийской конференции с международным участием, Тула, 27 ноября – 01 декабря 2017 года. – Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, 2017. – С. 72–79.

113. Применение пакета прикладных программ FIRE 3D для исследования вариантов перевода котлов на непроектное топливо [Текст] / А. В. Старченко, А. С. Заворин, А. В. Гиль и другие // Горение твердого топлива: сборник докладов VI Всероссийской конференции, Новосибирск, 8–10 ноября 2006 года. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 1. – С. 214–220.

114. Старченко, А. В. Численная оценка улавливания шлака в топке открытого типа с жидким шлакоудалением [Текст] / А. В. Старченко, А. С. Заворин, С. В. Красильников // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 127–133.

115. Старченко, А. В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания в пылеугольных топках [Текст] / А. В. Старченко, А. С. Заворин, С. В. Красильников // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.

116. Визгавлюст, Н. В. Моделирование образования оксидов азота в пылеугольных топках при сжигании органического топлива [Текст] / Н. В. Визгавлюст // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 57–61.

117. Гиль, А. В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D [Текст] / А. В. Гиль, А. В. Старченко // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 655–671.

118. Старченко, А. В. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах [Текст] / А. В. Старченко, Р. Б. Нутерман, Е. А. Данилкин; Томский государственный университет. – Томск: Издательство Томского университета, 2015. – 252 с.

119. Гиль, А. В. Моделирование топочной среды при переводе пылеугольных котлов с твердым шлакоудалением на непроектное топливо [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14: защищена 23.12.2008 / Гиль Андрей Владимирович. – Томск, 2008. – 171 с.

120. Красильников, С. В. Численное исследование пространственных двухфазных течений и горения в пылеугольной топке с учетом шлакоулавливания [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 : 05.13.18 / Красильников Сергей Витальевич. – Томск, 2003. – 21 с.

121. Тайлашева, Т. С. Теплофизические аспекты работоспособности испарительных элементов двухбарабанных промышленных котлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14: защищена 22.12.2009 / Тайлашева Татьяна Сергеевна. – Томск, 2009. – 151 с.

122. Бетхер, Т. М. Совершенствование факельно-вихревых схем сжигания твердого топлива на основе численного моделирования (на примере котла БКЗ-210-140Ф) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14: защищена 27.12.2012 / Бетхер Татьяна Михайловна. – Томск, 2012. – 196 с.

123. Визгавлюст, Н. В. Численное моделирование образования оксидов азота в пылеугольных топках котлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 :

05.13.18: защищена 22.12.2014 / Визгавлюст Наталья Викторовна. – Томск, 2014. – 129 с.

124. Мальцев, К. И. Численное исследование возможности повышения экологических параметров котла паропроизводительностью 220 т/ч [Текст] / К. И. Мальцев, А. В. Гиль, Е. С. Воронцова // Бутаковские чтения: материалы I Всероссийской с международным участием молодежной конференции, Томск, 15–16 декабря 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики, 2021. – С. 310–313.

125. Численные исследования топочного процесса в пылеугольных котлах крупных энергоблоков [Текст] / А. Р. Кривишвили, Ф. А. Серант, О. И. Ставская и другие // Горение твердого топлива: материалы VIII Всероссийской конференции, Новосибирск, 13–16 ноября 2012 года. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2012. – С. 48.1–48.8.

126. Технический отчет по результатам балансовых испытаний котлоагрегата БКЗ-220-100-4 ст. № 3 при сжигании Кузнецкого каменного угля, установленного на СП ГРЭС-2 АО «Томская генерация» [Текст]. – Краснодар: ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг», 2016. – 71 с.

127. Программа «ТРАКТ» [Текст]: справочные материалы. – Подольск: Машиностроительный завод имени Орджоникидзе, 1984. – 29 с.

128. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) [Текст] / под редакцией Н. В. Кузнецова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.

129. Гидравлический расчет котельных агрегатов (нормативный метод) [Текст] / под редакцией В. А. Локшина. – М.: Энергия, 1978. – 255 с.

130. Сёмушкин, В. П. Исследование особенностей горения высоковлажного бурого угля в топке энергетического котла [Текст] / В. П. Сёмушкин, Е. С. Воронцова // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, Томск, 28 сентября – 2 октября 2015 года. В 3 т. Т. 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 255–258.

131. Сёмушкин, В. П. Обоснование характеристик бурого угля Таловского месторождения для численного моделирования среды в топке пылеугольного котла [Текст] / В. П. Сёмушкин, Е. С. Воронцова, А. В. Гиль // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5–9 октября 2015 года. В 2 т. Т. 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 160–163.

132. Гиль, А. В. Численное исследование сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке [Текст] / А. В. Гиль, Е. С. Воронцова // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: тезисы докладов IX Всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 16–18 ноября 2015 года. – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2015. – С. 43.

133. Сёмушкин, В. П. Численное исследование сжигания низкосортного бурого угля Таловского месторождения в топочной камере котла БКЗ-220-100 [Текст] / В. П. Сёмушкин, Е. С. Воронцова // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием, Санкт-Петербург, 30 ноября – 5 декабря 2015 года. Ч. 1. – СПб.: Институт энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого, 2015. – С. 133–137.

134. Тайлашева, Т. С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования [Текст] / Т. С. Тайлашева, А. В. Гиль, Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 128–135.

135. Сёмушкин В. П. Предварительное исследование возможности использования непроектного топлива [Текст] / В. П. Сёмушкин, Е. С. Воронцова // Тинчуринские чтения: сборник трудов XI Международной молодежной научной конференции, Казань, 23–25 марта 2016 года. В 3 т. Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2016. – С. 93–94.

136. Vorontsova, E. Research of parameters of the steam boiler BKZ-220-100 at joint burning of natural gas and low-grade fuel [Электронный ресурс] / E. Vorontsova, A. Gil, A. Romanenko // 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. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401020>.

137. Application of numerical analysis for physical and chemical combustion processes in design of boiler units [Электронный ресурс] / A. V. Gil, A. S. Zavorin, E. S. Vorontsova, G. A. Nizkodubov // Applied Mechanics and Materials Scientific Journal. – 2015. – Vol. 770. – P. 365–370. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.365>.

138. Firing a coal with different moisture content in tangentially-fired pulverised coal furnace [Электронный ресурс] / A. V. Gil, E. S. Vorontsova, T. S. Tailasheva, A. V. Starchenko // 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 552–556. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884319>.

139. Моделирование параметров топочной среды для факельного сжигания низкосортного угля в широком диапазоне влажности [Текст]: дипломный проект / Сёмушкин В. П. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – 145 с.

140. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 24 с.

141. Нормативы удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / О. Н. Брагина, А. Н. Чугаева, А. А. Иванова и другие // Всероссийский теплотехнический институт. – Москва, 2013. – 31 с. – Режим доступа: https://vti.ru/files/public/uchebno-metod_posobie-k_soglasheniyu_0665.pdf.

142. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) [Текст]. – Спб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

143. Заворин, А. С. Исследования направлений использования местного низкосортного топлива [Текст] / А. С. Заворин, Е. С. Воронцова // 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.

144. Технологические подходы к энергетическому использованию местных низкосортных топлив [Текст] / Е. С. Воронцова, А. Ю. Долгих, А. С. Заворин, К. В. Буваков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – № 16(5). – С. 524–534.

145. Алехнович, А. Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов [Текст] / А. Н. Алехнович // Библиотечка электротехника. – 2013. – № 8(176). – С. 003–112.

146. Отчет «Исследование котла Томской ГРЭС-2 при сжигании каменного угля с целью определения экологических характеристик и разработки рекомендаций по снижению вредных выбросов» [Текст]. – Москва: ОАО «ВТИ», 2004. – 80 с.

147. Тарифное регулирование локальных рынков теплоснабжения Томской области на основе функционально-стоимостного и технологического анализа: научно-информационное издание [Текст] / Л. Г. Красильникова, А. А. Лукянец, М. Г. Нечай, И. И. Федецкий; под редакцией А. А. Лукянца. – Томск: Изд-во ГУП РПО СО РАСХН, 2004. – 360 с.

148. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара час или менее 20 Гкал в час [Текст]. – М.: Фирма Интеграл, 1999. – 75 с.

149. Тайлашева, Т. С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области [Текст] / Т. С. Тайлашева, Л. Г. Красильникова, Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 52–55.

150. Актуализированные ГИС-пакеты оперативной геологической информации (ГИС-Атлас «Недра России») [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <http://atlaspacket.vsegei.ru/>.

151. Ranz, W. E. Evaporation from Drops [Текст] / W. E. Ranz, W. R. Jr. Marshall // Chem. Eng. Progr. – 1952. – Vol. 48. – P. 141-146.

152. Peters, N. Laminar Diffusion Flame let Models in Non Premixed Combustion [Электронный ресурс] / N. Peters // Progress in Energy and Combustion Science. – 1984. – Vol. 10. – Is. 3. – P. 319–339. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(84\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0360-1285(84)90114-X).

153. Pillai, K. K. The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds [Текст] / K. K. Pillai // Journal of the Energy Institute. – 1981. – Vol. 54. – P. 142–150.

154. Baum, M. M. Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles [Текст] / M. M. Baum, P. J. Street // Combustion Science and Technology. – 1971. – Vol. 3. – P. 231–243.

155. Badzioch, S. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles [Электронный ресурс] / S. Badzioch, P. G. W. Hawksley // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1970. – Vol. 9. – P. 521–530. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1021/i260036a005>.

156. Бубенчиков, А. М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах [Текст] / А. М. Бубенчиков, А. В. Старченко; Томский государственный университет. – Томск: Изд-во Томского университета, 1998. – 236 с.

157. Хзмаян, Д. М. Теория горения и топочные устройства [Текст] / Д. М. Хзмаян, Я. А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

158. Трехмерное численное и экспериментальное моделирование аэродинамики топочных камер современных котлоагрегатов в изотермических условиях [Текст] / С. В. Алексеенко, В. И. Борисов, В. Д. Горячев, М. В. Козелев // Теплофизика и аэромеханика. – 1994. – Т. 1. – № 4. – С. 347–354.

159. Заворин, А. С. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов [Текст] / А. С. Заворин, С. В. Красильников, А. В. Старченко // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: доклады Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 21–23 ноября 2000 года. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.

160. Magnusen, B. F. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion [Электронный ресурс] / B. F. Magnusen, B. H. Hjertager // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – Vol. 16. – Is. 1. – P. 719–729. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4).

161. Математическое моделирование высокотемпературного турбулентного газового потока над поверхностью с интенсивной абляцией [Текст] / С. Ока, Д. Милошевич, П. Павлович, П. Стефанович // Теплофизика и аэромеханика. – 1994. – Т. 1. – № 4. – С. 265–277.

162. Fischer, K. Three-dimensional of the gas-solid flow in coal-dust fired furnace [Текст] / K. Fischer, R. Leithner, H. Muller // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Rome, 09–11 October 1995. – Rome, 1995. – Vol. 1. – P. 1387–1393.

163. Бубенчиков, А. М. Численный анализ аэродинамики и горения турбулентной пылеугольной горелочной струи [Текст] / А. М. Бубенчиков, А. В. Старченко // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33. – № 1. – С. 51–59.

164. Spalding, D. B. Mathematical models of turbulent flames: a review [Электронный ресурс] / D. B. Spalding // Combustion Science and Technology. – 1976. – Vol. 13. – Is. 1–6. – P. 3–25. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/00102207608946727>.

165. Кроу, С. Численное исследование газокапельных потоков с помощью модели «капля–внутренний источник» [Текст] / С. Кроу, М. Шарма, Д. Сток // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1977. – Т. 99. – № 2. – С. 150–159.

166. Ярин, Л. П. Основы теории горения двухфазных сред [Текст]/ Л. П. Ярин, Г. С. Сухов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.

167. Виленский, Т. В. Динамика горения пылевидного топлива [Текст] / Т. В. Виленский, Д. М. Хзмалян. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.

168. Бабий, В. И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела [Текст]/ В. И. Бабий, Ю. Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

169. Теория топочных процессов [Текст] / Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев, Е. А. Блох и другие. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 491 с.

Приложение I. Распределение горючих полезных ископаемых на территории Томской области

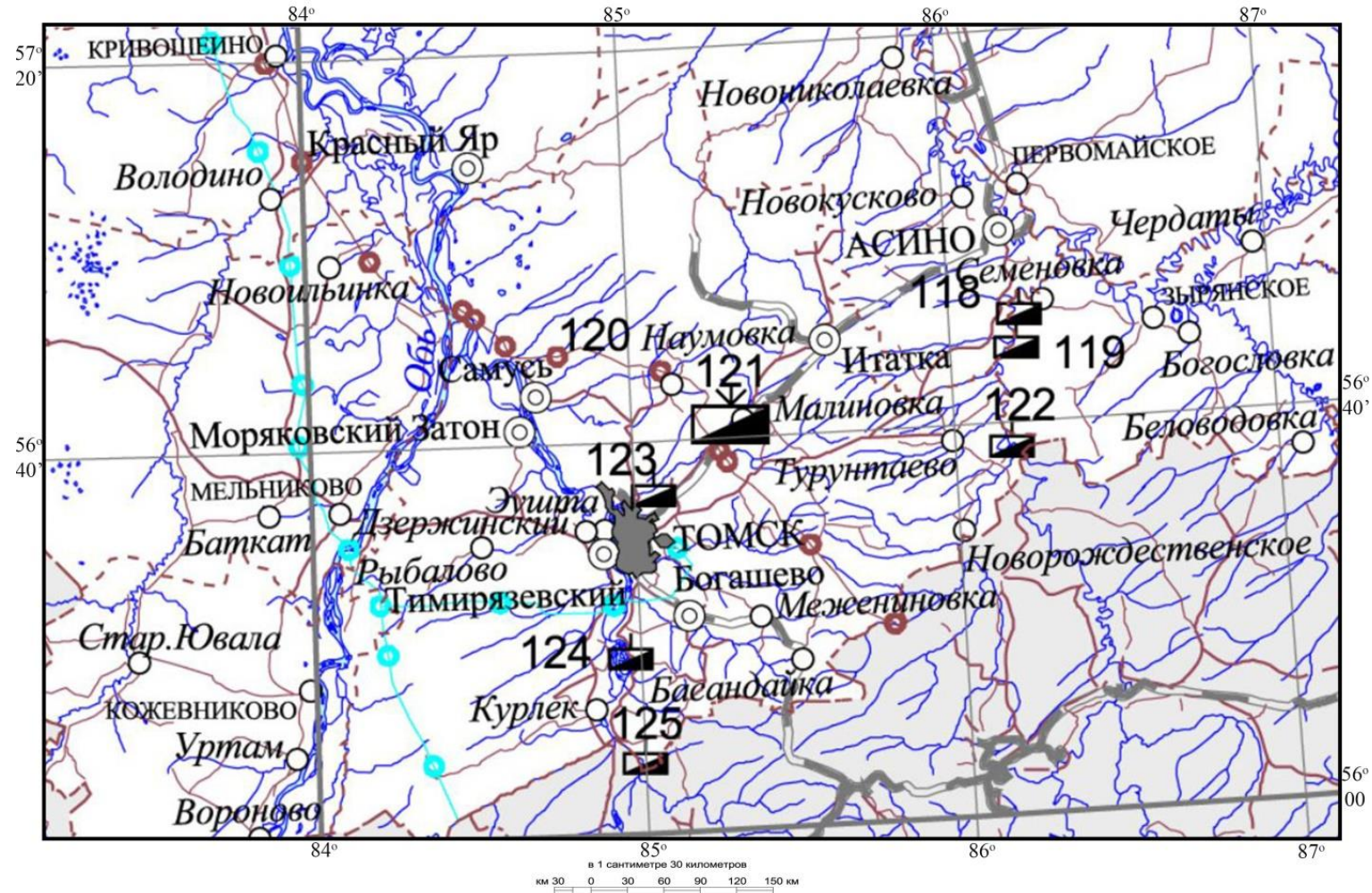


Рисунок I.1 – Карта горючих полезных ископаемых Томской области [150]

Малые не осваиваемые месторождения бурого угля: 118, 119, 122 – Яйское, 123 – Реженское, 124 – Казанское, 125 – Ярское. Крупные месторождения: 120 – Таловское (разведываемое), 121 – Малиновское (Туганское) (неосваиваемое).

Приложение II. Основные технические данные котлоагрегатов [92]

Наименование	БКЗ-220-100-4	БКЗ-210-140Ф
Общая характеристика		
Тип котла по способу организации движения воды и пароводяной смеси	Барабанный с естественной циркуляцией	
Тип котла по относительному движению сред	Вертикально-водотрубный	
Компоновка котла	П-образная	
Конструкция топочной камеры	Твердотопливная, камерная	
Расположение горелок	Встречное с боковых стен, треугольником вниз	Угловое с тангенциальным направлением струй (диаметр)
Тип горелок	Пылеугольные вихревые (лопаточно-лопаточные)	Пылеугольные прямоточные щелевые
Количество, шт.	6	4
Способ шлакоудаления	Твердое	
Вид проектного топлива	Каменный, бурый угли	Бурый уголь
Система пылеприготовления	Замкнутая с пылевым бункером	С прямым вдуванием
Тип мельницы	Шаровые барабанные мельницы (ШБМ)	Мельницы-вентиляторы (МВ)
Сушильный агент	Горячий воздух и дымовые газы	Дымовые газы
Технические характеристики		
Производительность по пару, т/ч	220	210
Давление перегретого пара, МПа	9,8	14,2
Температура, °С:		
- перегрева пара	540	570
- питательной воды	215	230
Расчетный КПД, %:		
- на буром угле	91,15	90,3
- на каменном угле	89,2	-

Продолжение приложения II

Габаритные размеры топки: - ширина, мм - глубина, мм	9536 6656	7808 7424
Барабан	Сварной конструкции, внутренним диаметром 1600 мм	
Тепловоспринимающие элементы		
Радиационные	Испарительные экраны диаметром 60 мм при шаге 64 мм	
	Потолочный пароперегреватель из труб диаметром 38 мм при шаге 40 мм	
Полурадиационные	Ширмовый пароперегреватель (трубы диаметром 32 мм), шаг ширм 585 мм	Ширмовый пароперегреватель (трубы диаметром 32 мм), шаг ширм 600 мм
Конвективные	Первая по ходу пара ступень – змеевики из труб диаметром 38 мм	Первая по ходу пара ступень – змеевики из труб диаметром 32 мм
	Вторая по ходу пара ступень – змеевики из труб диаметром 38 мм	Третья по ходу пара ступень – змеевики из труб диаметром 32 мм
	Четвертая ступень – змеевики из труб диаметром 38 мм	Четвертая ступень – змеевики из труб диаметром 32 мм
Ступень водяного экономайзера	Параллельные фронту котла гладкотрубные змеевики из труб диаметром 32 мм	
Ступень воздухоподогревателя	Рекуперативные «кубы» из труб диаметром 40 мм	

Приложение III. Описание используемой математической модели

Описание преобразования угольной частицы

1. При температуре частицы T_p менее состояния кипения воды происходит процесс нагрева и сушки, при котором изменение температуры и массы частицы описывается балансовыми соотношениями [151]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) + L_{vap} \frac{dm_p}{dt}, \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{dm_p}{dt} = h_c A_p \left[(\rho C_{H_2O})_s - (\rho C_{H_2O})_\infty \right], \quad (\text{III.2})$$

где T_p и m_p – соответственно текущие значения температуры и массы частицы, h_c и h – соответственно коэффициенты тепло- и массообмена, c_p – теплоемкость, A_p – площадь поверхности частицы, ε_p – степень черноты частицы, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_∞ – локальная температура сплошной среды, θ_R – температура излучения, L_{vap} – теплота парообразования, $(C_{H_2O})_s$ и $(C_{H_2O})_\infty$ – соответственно концентрация водяных паров у поверхности частицы и в газовой среде.

2. По достижении частицей состояния, соответствующего температуре кипения, полагается все потери от быстрого влагоиспарения считать скомпенсированными тепловыми потоками, поступающими за счет конвекции и радиации. В результате этого температура частицы считается неизменной, при этом масса определяется соотношением (III.2) до тех пор пока не будет выполняться условие $m_p = (1 - W^H / 100) m_p^0$, в котором m_p^0 – начальная масса частицы, W^H – влажность готовой угольной пыли, %.

3. После сушки по достижению определенной температуры T_{vap} начинается выход летучих веществ. Это – результат термической деструкции органической массы, газообразные продукты которой поступают в окружающую сплошную среду. Выход летучих моделируется аналогично п. 2 [152–155].

4. Воспламенение и догорание коксового остатка происходит по окончании выхода летучих и определенном уровне местных температур. В этом случае уравнения теплового баланса и изменения массы (III.1, III.2) принимают вид:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - Q \frac{dm_p}{dt} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4), \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -h_D A_p (\rho C_{O_2})_\infty, \quad (\text{III.4})$$

где Q – тепловой эффект от горения коксового остатка, $(C_{O_2})_\infty$ – локальная концентрация молекулярного кислорода в окружающей газовой среде, h_D – скорость диффузионного горения кокса, лимитируемая диффузией кислорода к поверхности частицы.

Описание аэродинамических условий, теплообмена и горения

Численная модель базируется на ряде фундаментальных физических законов и соотношений. Соответственно, математическая модель включает в себя дифференциальные уравнения, алгебраические отношения, а также граничные условия. С учетом вышеперечисленного при описании внутритопочных процессов математическая модель имеет вид [113, 115, 156–159]:

1) Изменение массы газовой смеси за счет выхода влаги, выхода летучих, горения коксового остатка:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = J_{\text{evap}} + J_{\text{vap}} + J_{\text{char}}, \quad (\text{III.5})$$

где ρ – плотность смеси газов, $U_i (i = 1, 2, 3)$ – составляющие скорости газа, $x_i (i = 1, 2, 3)$ – декартовы координаты, $J_{\text{evap}} + J_{\text{vap}} + J_{\text{char}}$ – массовые скорости соответственно влагоиспарения, выхода летучих и горения кокса.

2) Изменение массы компонентов газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho C_{N_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x_i} \right), \quad (\text{III.6})$$

$$\frac{\partial \rho C_{O_2} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x_i} \right) - \beta_{vol} J_{vol} - \beta_{CO} J_{CO} - J_{char}^{O_2}, \quad (III.7)$$

$$\frac{\partial \rho C_{vol} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{vol}}{\partial x_i} \right) - \alpha_{vap} J_{vap} - J_{vol}, \quad (III.8)$$

$$\frac{\partial \rho C_{CO} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{CO}}{\partial x_i} \right) + J_{char}^{CO} - J_{CO}, \quad (III.9)$$

$$\frac{\partial \rho C_{H_2O} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x_i} \right) + J_{evap} + \gamma(1 + \beta_{vol}) J_{vol}, \quad (III.10)$$

$$\sum_{j=N_2, O_2, vol, CO, CO_2, H_2O} C_j = 1, \quad (C_{N_2} + C_{O_2} + C_{vol} + C_{CO} + C_{CO_2} + C_{H_2O} = 1). \quad (III.11)$$

Здесь C_j – концентрации компонентов газовой смеси; μ_t – турбулентная вязкость газа; Sc_t – турбулентное число Шмидта; β_{vol} – количество кислорода, теоретически необходимое для сгорания 1 кг летучих; β_{CO} – количество кислорода, теоретически необходимое для сгорания 1 кг оксида углерода; J_{vol} – массовая скорость горения летучих, определяемая скоростью химического реагирования углеводородов $C_m H_n$ при горении; J_{CO} – массовая скорость реакции горения оксида углерода ($CO + 1/2 O_2 = CO_2$); α_{vap} – массовая доля горючих в составе летучих; γ – доля водяных паров в продуктах горения летучих.

Массовая скорость горения летучих J_{vol} зависит от скорости химической реакции углеводородов ($C_m H_n$) $J_{vol, ch}$ и от интенсивности турбулентного смесеобразования реагирующими компонентами $J_{vol, dif}$ [160, 161]:

$$J_{vol} = \min(J_{vol, dif}, J_{vol, ch}), \quad (III.12)$$

$$J_{vol, ch} = k_{vol} \rho^2 C_{vol} C_{O_2} \exp(-E_{vol} / R_o T), \quad (III.13)$$

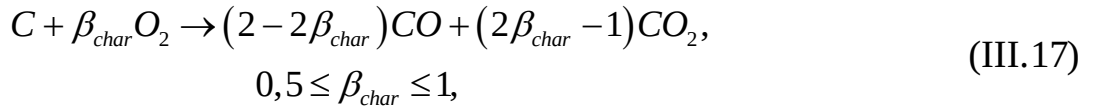
где $k_{vol} = 10^{10} (\text{м}^3 / \text{кг} \cdot \text{с})$ – предэкспоненциальный множитель скорости горения летучих, E_{vol} – энергия активации скорости горения летучих ($E_{vol} = 153000 \cdot \text{Дж/моль}$), R_o – универсальная газовая постоянная ($R_o = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$).

$$J_{vol,dif} = \min \left[4C_{vol}, \frac{4C_{O_2}}{\beta_{vol}}, \frac{2(C_{H_2O} + C_{CO_2} + C_{CO})}{1 + \beta_{vol}} \right] \frac{\rho \varepsilon}{k}, \quad (III.14)$$

$$J_{CO} = \min \left[\min \left[4C_{CO}, \frac{4C_{O_2}}{\beta_{CO}}, \frac{2C_{CO_2}}{1 + \beta_{CO}} \right] \frac{\rho \varepsilon}{k}, \right. \quad (III.15)$$

$$\left. \rho^2 C_{CO} \sqrt{C_{O_2} C_{H_2O}} k_{CO} \exp(-E_{CO} / R_0 T) \right]. \quad (III.16)$$

Здесь $k_{CO} = 5,42 \cdot 10^9 \cdot \text{м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$, $E_{CO} = 126000 \text{ Дж/моль}$, $J_{char}^{O_2}$, J_{char}^{CO} – массовая скорость поглощения O_2 и образования CO при горении коксового остатка угольной частицы, β_{char} – количество кислорода, теоретически необходимое для сгорания 1 кг коксового остатка. Эта величина учитывается моделью химического реагирования кокса [162] в соответствии с размером и температурой коксовых частиц, соотношением CO / CO_2 в продуктах реагирования:



где

$$\beta_{char} = \begin{cases} (f + 2) / (2f + 2), & d_p \leq 50 \text{ мкм}, \\ \left[\frac{2f + 2}{f + 2} - \frac{f(d_p - 50 \text{ мкм})}{(f + 2)950 \text{ мкм}} \right]^{-1}, & 50 \text{ мкм} \leq d_p \leq 1000 \text{ мкм}, \\ 1, & d_p > 1000 \text{ мкм}, \end{cases}$$

$f = 2500 \exp[-6240 / T_p]$, d_p – размер частиц, T_p – температура частиц.

Данная модель устанавливает, что для крупных частиц ($d_p > 1000 \text{ мкм}$), а также при относительно низких температурах любых частиц продуктом горения кокса является только CO_2 . Для мелких ($d_p < 1000 \text{ мкм}$) частиц в зависимости от их температуры могут образовываться как CO_2 , так и CO .

3) Уравнения, описывающие количество движения для составляющих газовой фазы:

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho g_j + F_j +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + (\mu + \mu_T) \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] \right], j = 1, 2, 3, \quad (\text{III.18})$$

где ρ – давление; μ_T – турбулентная вязкость; μ – молекулярная вязкость; k – энергия турбулентности; δ_{ij} – символы Кронеккера ($\delta_{ij} = 1$; $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$); g_j – декартовы проекции ускорения свободного падения; F_j – компоненты силы межфазного взаимодействия между частицами и несущей средой.

4) Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho U_i c T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right] c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_{vol} J_{vol} + Q_{CO} J_{CO} - \frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} + \Theta, \quad (\text{III.19})$$

где c – теплоемкость смеси газов, Pr и Pr_t – соответственно молекулярное и турбулентное числа Прандтля ($Pr_t = 0,9$); Q_{vol} и Q_{CO} – тепловые эффекты реакций горения соответственно летучих и оксида углерода; q_i^{rad} – составляющие вектора радиационного теплового потока; T – температура газовой смеси; Θ – интенсивность теплообмена между средой и частицами.

5) Уравнение состояния для газовой смеси:

$$\rho = \frac{p}{R_0 T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{vol}}{M_{vol}} + \frac{C_{CO}}{M_{CO}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}, \quad (\text{III.20})$$

где M_j – молекулярные веса компонентов газа; R_0 – универсальная газовая постоянная, p – давление.

6) Турбулентная структура среды моделируется с использованием $k - \varepsilon$ модели турбулентности, т.е. с учетом наличия дисперсных частиц [156, 160, 164, 164]:

$$\frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon - S_k, \quad (\text{III.21})$$

$$\frac{\partial \rho U_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 3} S_k \frac{\varepsilon}{k}, \quad (\text{III.22})$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (\text{III.23})$$

Здесь $G_k = \left[\mu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$, S_k – дополнительная

диссипация энергии турбулентности, вызванная влиянием дисперсной фазы, k – энергия турбулентности газовой смеси, ε – скорость диссипации энергии турбулентности $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_{\varepsilon 1} = 1,44$, $\sigma_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_{\varepsilon 3} = 1,83$, $C_\mu = 0,09$.

7) Перенос излучением описывается Р1-приближением метода сферических гармоник [156]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{3\chi_e} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) = -a_g (4\sigma T^4 - H) - S_H, \quad (\text{III.24})$$

$$\frac{\partial q_i^{rad}}{\partial x_i} = a_g (4\sigma T^4 - H), \quad (\text{III.25})$$

Здесь a_g – коэффициент поглощения излучения трехатомными газами продуктов сгорания, H – пространственная плотность падающего потока излучения, χ_e – коэффициент ослабления излучения трехатомными газами и дисперсными частицами, σ – постоянная Стефана–Больцмана.

В основе описания движения полидисперсных частиц топлива лежит лагранжев подход, при котором полное количество частиц разбивается на группы, поведение каждой группы описывается поведением одной частицы. Эта частица является представителем группы или частицей-маркером, свойства которой в определенный временной промежуток распространяются на всю группу. Исходя из этого подхода, теплофизические параметры частицы-маркера рассчитываются по нижеследующим уравнениям [165]:

8) Уравнение движения частицы-маркера i –ой группы ($i = 1, \dots, N$):

$$\frac{\partial U_j^i}{\partial t} = \frac{(U_j - U_j^i)}{\tau_i} + g_j, \quad j=1,2,3, \quad (\text{III.26})$$

$$\text{Здесь } \tau_i = \frac{4\rho_p d_{pi}}{3c_{D_i} |\bar{U}^i - \bar{U}|}, \quad c_{D_i} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_i} (1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,687}), & \text{Re}_i \leq 1000, \\ 0,44, & \text{Re}_i > 1000, \end{cases}$$

$$\text{Re}_i = \frac{\rho \sqrt{\sum_{j=1}^3 (U_j^i - U_j)^2} d_{pi}}{\mu}, \quad (\text{III.27})$$

где U_j^i – составляющие скорости частиц, U_j – составляющие скорости газа, g_j – декартова проекция ускорения свободного падения на оси координат, ρ_p , c_{D_i} , d_{pi} – соответственно плотность и коэффициент сопротивления частиц, размер частиц i -ой группы.

9) Изменение массы и температуры частицы-маркера [165, 166]:

$$\frac{dm_i}{dt} = -M_i^{evap} - M_i^{vap} - M_i^{char}, \quad (\text{III.28})$$

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = Q_{char} M_i^{char} + \pi d_{pi}^2 [\alpha_{conv} (T - T_i) + \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4)] - Q_{vap} M_i^{vap} - L_{evap} M_i^{evap}. \quad (\text{III.29})$$

Здесь m_i – масса одиночной частицы с размером d_{pi} , c_p – теплоемкость частицы, Q_{char} – теплота сгорания коксового остатка, Q_{vap} – тепло, необходимое для выхода летучих, L_{evap} – скрытая теплота парообразования, ε_p – степень черноты частицы, T и T_i – соответственно температура дымовых газов и температура i -ой частицы, α_{conv} – коэффициент теплоотдачи конвекцией для одиночной частицы ($\frac{\alpha_{conv} d_{pi}}{\lambda} = 2 + 0,459 \text{Re}_i^{0,55} \text{Pr}^{0,33}$, где $\lambda = \frac{\mu c}{\text{Pr}}$ – коэффициент теплопроводности газовой фазы).

10) Вычисление массовой скорости сушки частицы ведется на основе следующего закона [162]:

$$M_i^{evap} = \pi d_{pi}^2 k_c \left((\rho C_{H_2O})_{surf} - (\rho C_{H_2O}) \right), \quad (III.30)$$

где $k_c = \left(\frac{D_{H_2O}}{d_{pi}} \right) (2 + 0,6 Re_i^{0,5} Sc^{0,33})$ – коэффициент массопереноса, D_{H_2O} – коэффициент диффузии водяного пара, $(\rho C_{H_2O})_{surf}$ – концентрационная плотность водяных паров на поверхности угольной частицы.

Массовая скорость выхода летучих вычисляется по закону Аррениуса [156, 167]:

$$M_i^{evap} = k_{vap} \exp\left(\frac{-E_{vap}}{R_0 T_i}\right) f_{vo} \cdot m_{0i}, \quad (III.31)$$

где m_{0i} – начальная масса сухой частицы размером d_{pi} в сухом состоянии, f_{vo} – массовая доля летучих в сухой частице, k_{vap} – предэкспоненциальный множитель, E_{vap} – энергия активации выхода летучих.

Скорость горения коксового остатка лимитируется двумя факторами: кинетикой химического окисления углерода и диффузией окислителя к поверхности частицы [162],

$$M_i^{char} = \pi d_{pi}^2 \rho C_{O_2} \frac{K_K K_D}{K_K + K_D}, \quad (III.32)$$

где $K_K = k_{char} \exp\left(\frac{-E_{char}}{R_0 T_i}\right)$, K_K , k_{char} , E_{char} – задаются по виду сжигаемого топлива

[167]. K_D определяется по формуле $K_D = \frac{D_{O_2}}{d_{pi}} (2,0 + 0,16 Re_i^{0,667})$, в которой:

$$D_{O_2} = 16 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{237} \right)^{1,9} \quad [168].$$

Если происходит столкновение частицы-маркера со стенкой и при этом она имеет температуру меньше температуры начала шлакования, то такая частица отскакивает от стенки обратно в топочную среду. При этом меняются температура, направление движения и модуль скорости частицы. Если в момент столкновения

температура частицы превышает температуру начала шлакования, то такая частица считается прилипшей к отражающей поверхности топочной камеры и отслеживание ее параметров и движения прекращается. После чего для поверхности, на которую прилипает частица, производится расчет скорости осаждения [120, 166, 167, 169].

При движении частиц-представителей по объему топки их положение, компоненты скорости, масса и температура, а также обратное влияние дисперсной фазы определяются приближенно-аналитическим методом решения системы дифференциальных уравнений.

В уравнениях переноса, входящих в вышеприведенную математическую модель, требуется определение членов, характеризующих влияние частиц на характеристики среды.

11) Значения J_{evap} , J_{vap} , J_{char} , F_j , Θ , S_k , S_H вычисляются по формулам:

$$J_{evap} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{evap}}{m_{0i}} \dot{m}_{0i}, \quad (III.33)$$

$$J_{vap} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{vap}}{m_{0i}} \dot{m}_{0i}, \quad (III.34)$$

$$J_{char} = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i^{char}}{m_{0i}} \dot{m}_{0i}, \quad (III.35)$$

$$F_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \gamma_i (U_j^i - U_j) \dot{m}_i t_i, \quad (III.36)$$

$$\begin{aligned} \Theta = & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[Q_{char} \Delta m_i^{char} + \bar{m}_i c_p \Delta T_i - Q_{vap} \Delta m_i^{vap} - L_{vap} \Delta m_i^{vap} \right] \frac{\dot{m}_{0i}}{m_{0i}} - \\ & -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[c_p T_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 \right] \dot{m}_{0i} + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i} \sum_{j=1}^3 (U_j - U_j^i)^2 + \\ & + \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\pi d_{pi}^2}{m_{0i}} \varepsilon_p (H - 4\sigma T_i^4) \right] \dot{m}_{0i} t_i, \end{aligned} \quad (III.37)$$

$$S_k = \frac{2k}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\dot{m}_i t_i}{\tau_i + T_L}, \quad T_L = \frac{0,41k}{\varepsilon}, \quad (III.38)$$

$$S_H = \frac{\varepsilon_p}{V} \sum_{i=1}^N \pi d_{pi}^2 (4\sigma T_i^4 - H) \frac{\dot{m}_{0i}}{m_{0i}} t_i. \quad (\text{III.39})$$

Здесь N – количество частиц-маркеров, прошедших через конечный объем, V – конечный объем, $\Delta m_i = \Delta m_i^{evap} + \Delta m_i^{vap} + \Delta m_i^{char}$ – убыль массы i -ой частицы за счет выхода летучих и горения коксового остатка за период пребывания частицы в данном конечном объеме, m_{0i} – начальная масса частицы-маркера, $\dot{m}_{0i}$ и $\dot{m}_i$ – соответственно начальный и текущий массовые расходы частиц данной фракции, t_i – время полета i -ой частицы через конечный объем, $\bar{m}_i$ – средняя масса частицы i -ой фракции в объеме V , T_i – температура частицы i -ой фракции, ΔT_i – изменение температуры частицы i -ой фракции в конечном объеме V , S_H – поглощение излучения угольными частицами.

Граничные условия

Граничные условия для приведенной выше системы уравнений (III.1, III.5–III.11, III.18–III.25) определяются следующими типами границы [120, 156]: на входе – известные однородные распределения для заданных характеристик; на выходе – мягкие граничные условия при условии, что положение выходных границ находятся в удалении от зон ожидаемой рециркуляции потока; на стенках, ограничивающих топочный объем – для скорости – условия прилипания, для температуры газовой среды – граничные условия первого рода, для концентраций составляющих газовой среды – равенство нулю производной по нормали.

Метод пристеночных функций [156] используется для определения конвективной составляющей теплового потока, энергии турбулентности и скорости ее диссипации в пристеночных областях, а также трения на ограждающих поверхностях топочной камеры. Этот метод позволяет уйти от необходимости учета большого числа точек разностной сетки при вычислении поведения потока вблизи от твердых границ. Метод пристеночных функций допустимо применять к однофазным течениям в условиях пылеугольных топочных камер [120].

$$\tau_w = \frac{\rho_s u_s C_\mu^{1/4} \kappa k_s^{1/2}}{\ln(EC_\mu^{1/4} k_s^{1/2} \rho_s y_s / \mu)}, \quad \kappa = 0,42, \quad E = 9,0, \quad C_\mu = 0,09, \quad (III.40)$$

$$\varepsilon_s = \frac{(k_s C_\mu^{1/2})^{3/2}}{\kappa y_s}, \quad (G_k)_s = \frac{(\mu_T)_s |\tau_w|}{\rho_s (\kappa y_s)}, \quad (III.41)$$

$$q_w^{conv} = \frac{\rho_s (T_s - T_w) c C_\mu^{1/4} k_s^{1/2}}{\text{Pr}_t \frac{\ln(EC_\mu^{1/4} k_s^{1/2} \rho_s y_s / \mu)}{\kappa} + 8,74 \text{Pr}_t f\left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t}\right)}, \quad (III.42)$$

$$f\left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t}\right) = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} - 1,0\right) \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t}\right)^{1/4}, \quad \text{Pr}_t = 0,9, \quad (III.43)$$

где y_s – расстояние от стенки до ближайшего узла расчетной сетки; $(\mu_T)_s$, ε_s , $(G_k)_s$, u_s – турбулентная вязкость газа, диссипация и генерация энергии турбулентности при $y = y_s$; значение k_s определимо из уравнения $k - \varepsilon$ модели турбулентности исходя из условия отсутствия диффузионного потока через грань конечного объема, которая совпадает с поверхностью стенки.

Граничные условия для уравнения (III.24, III.25) имеют вид:

$$\frac{1}{3\chi_y} \frac{\partial H}{\partial n_w} = \frac{\varepsilon_w}{2(2 - \varepsilon_w)} (H - 4\sigma T_w^4), \quad (III.44)$$

где n_w – координата расстояния по нормали к поверхности стенки, $\varepsilon_w = \varepsilon_T \psi$ – степень черноты топочных экранов, ε_T , ψ – степень черноты топки и коэффициент тепловой эффективности тепловоспринимающих поверхностей топочной камеры, определяемые по нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов [142, 156].

Приложение IV. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания таловского угля в исходном виде

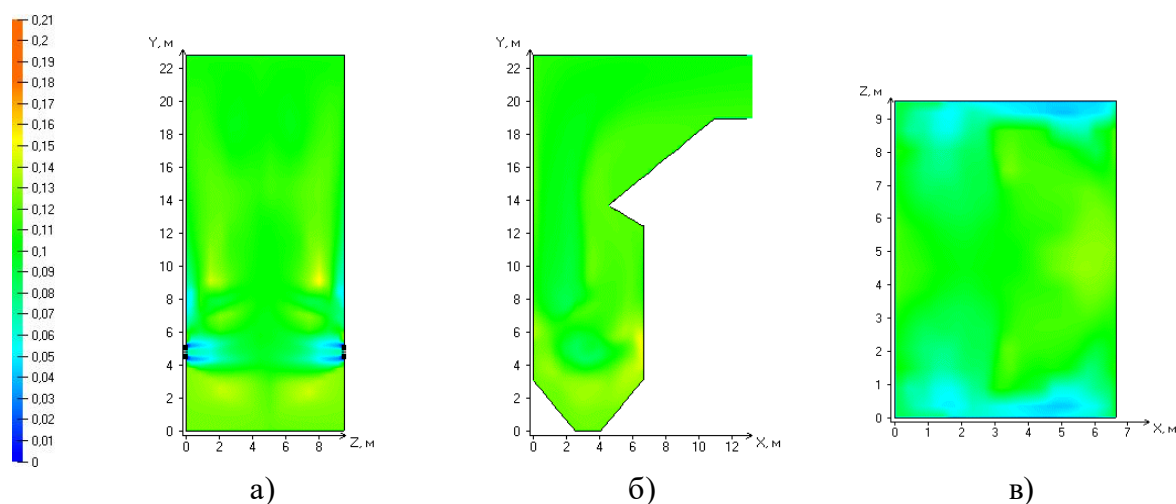


Рисунок IV.1 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 20\%$)

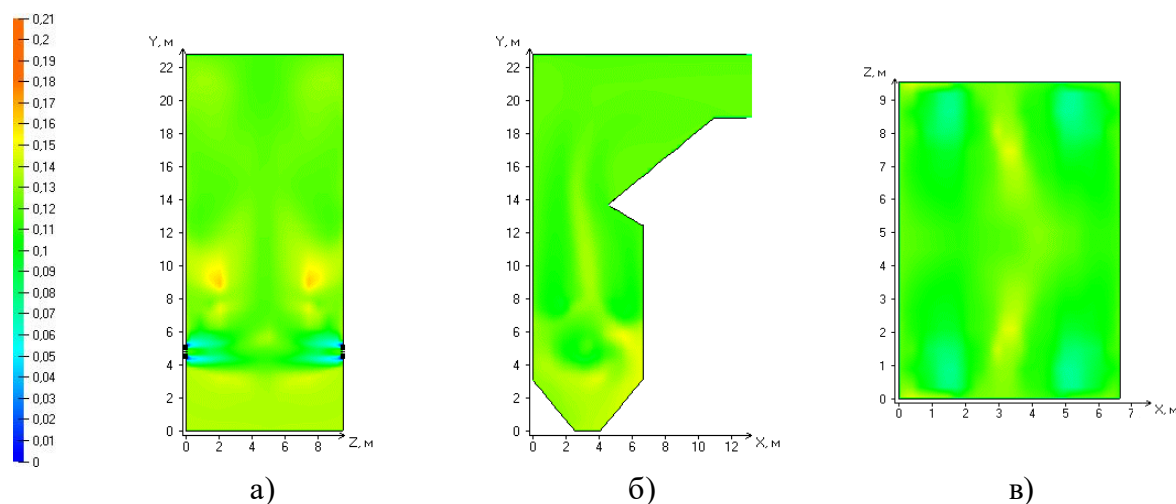


Рисунок IV.2 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 25\%$)

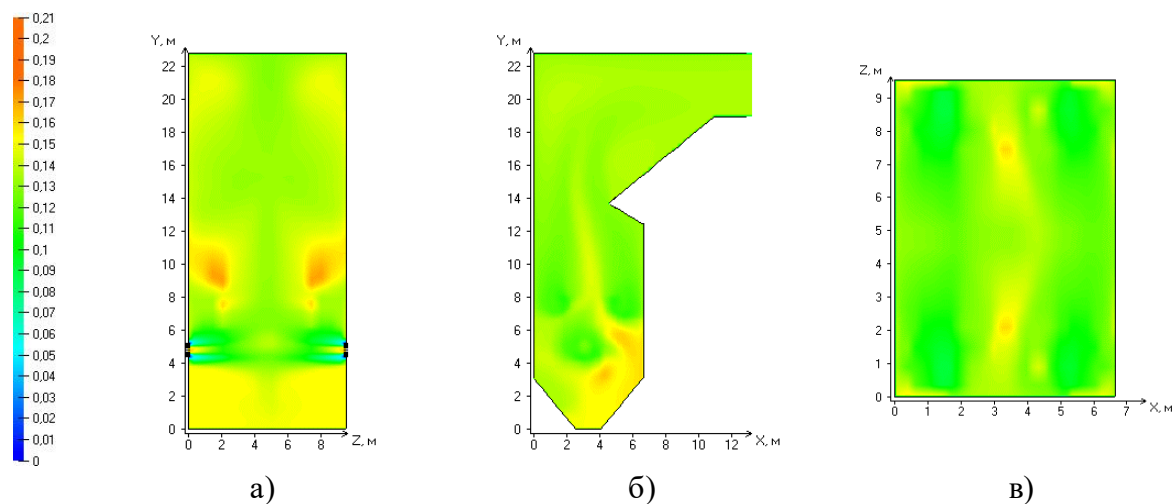


Рисунок IV.3 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 30\%$)

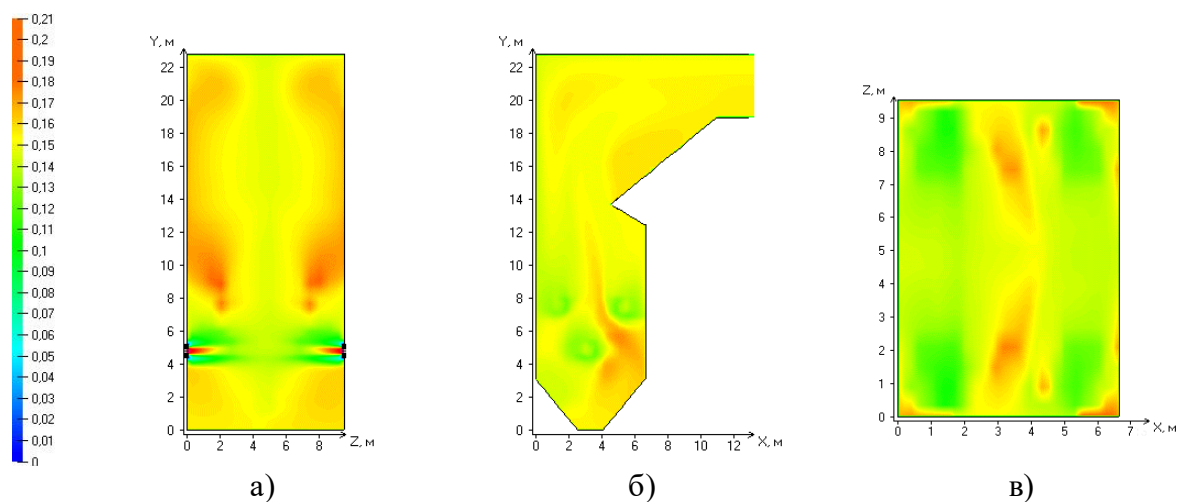


Рисунок IV.4 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 35 \%$)

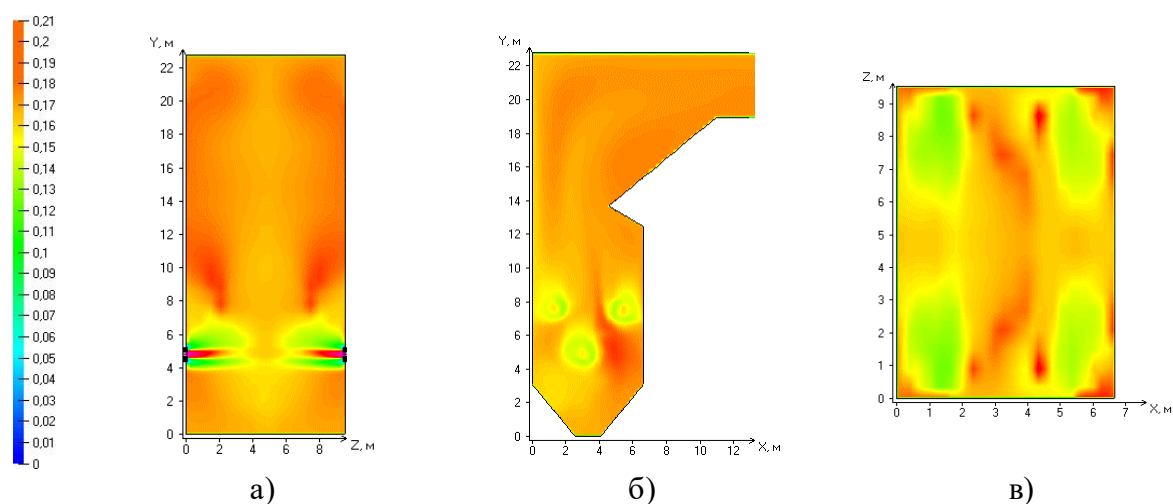


Рисунок IV.5 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 40 \%$)

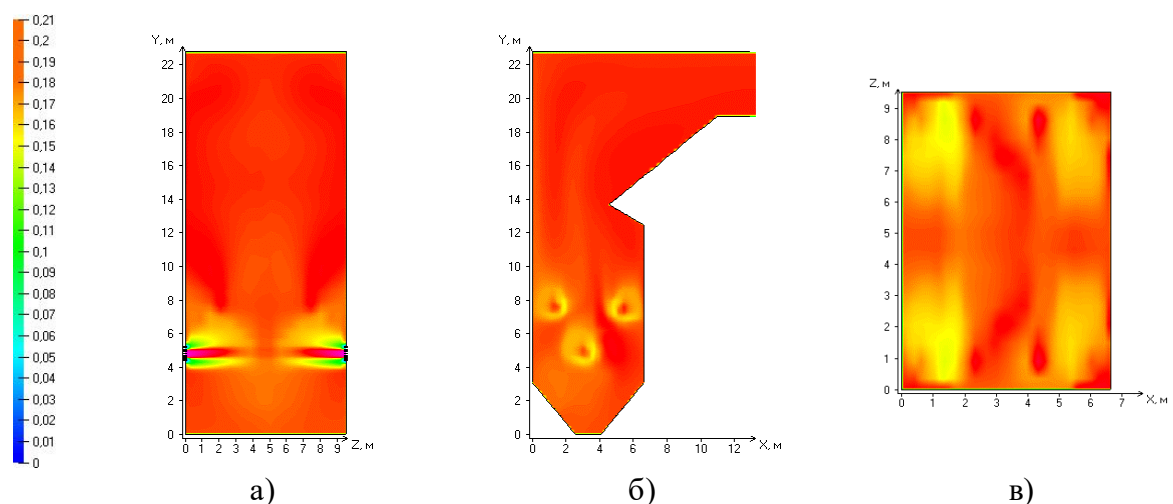


Рисунок IV.6 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 45 \%$)

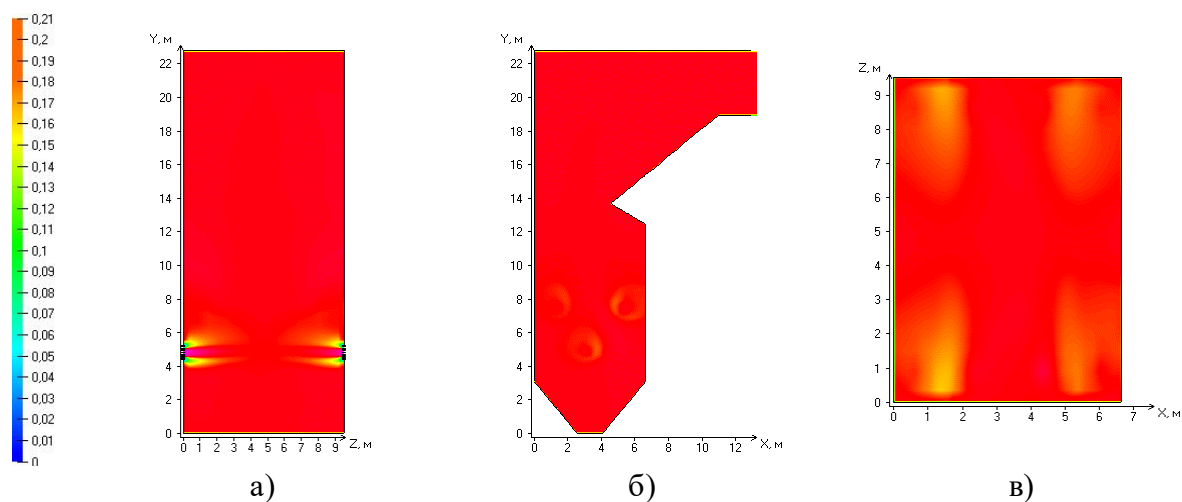


Рисунок IV.7 – Концентрация водяных паров (%) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 50\%$)

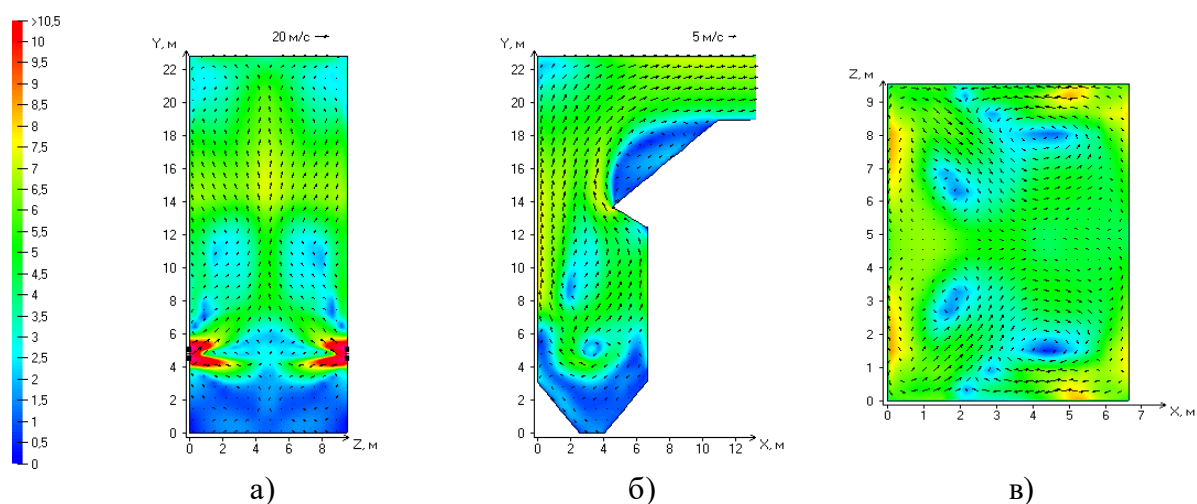


Рисунок IV.8 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 20\%$)

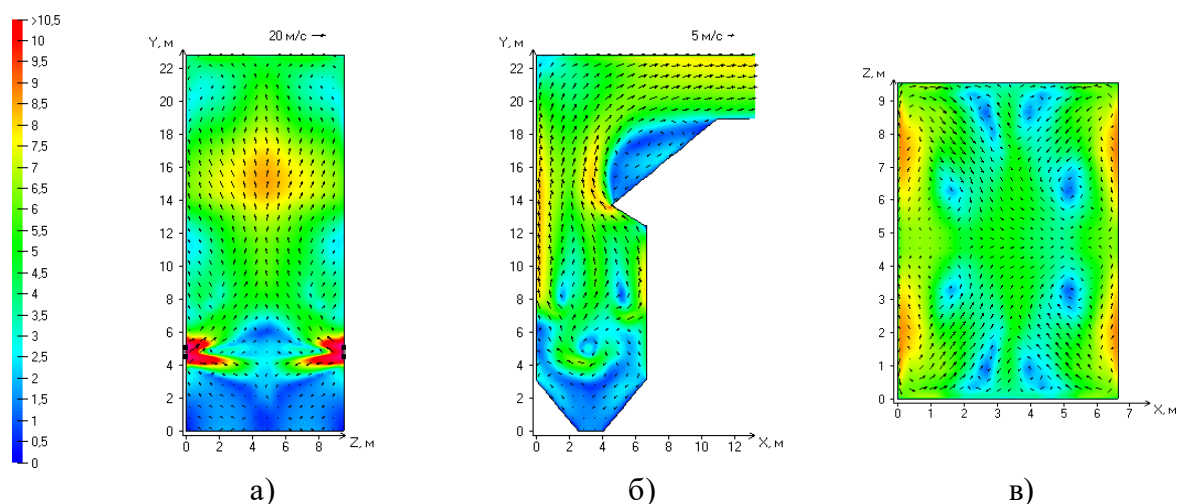


Рисунок IV.9 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 25\%$)

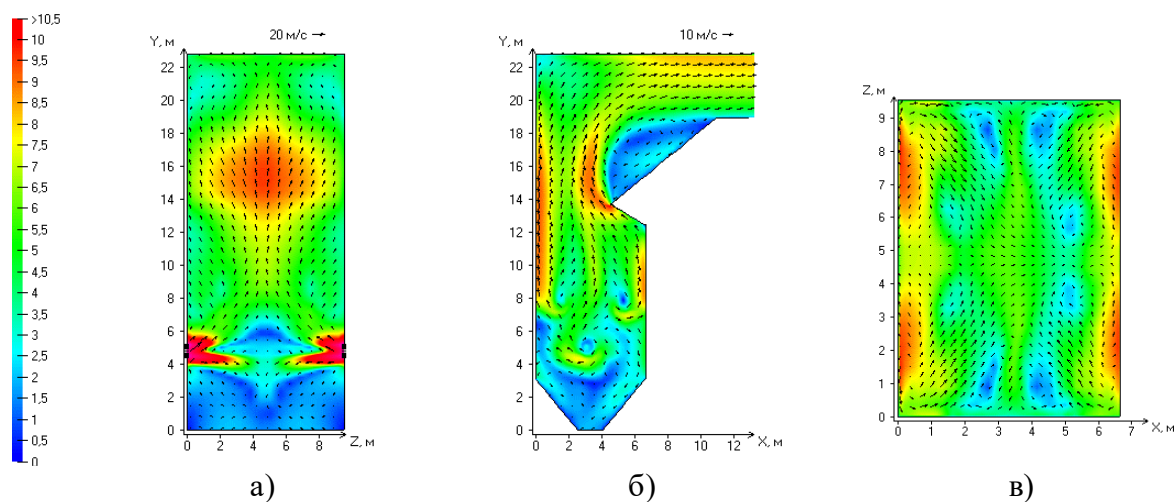


Рисунок IV.10 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 30\%$)

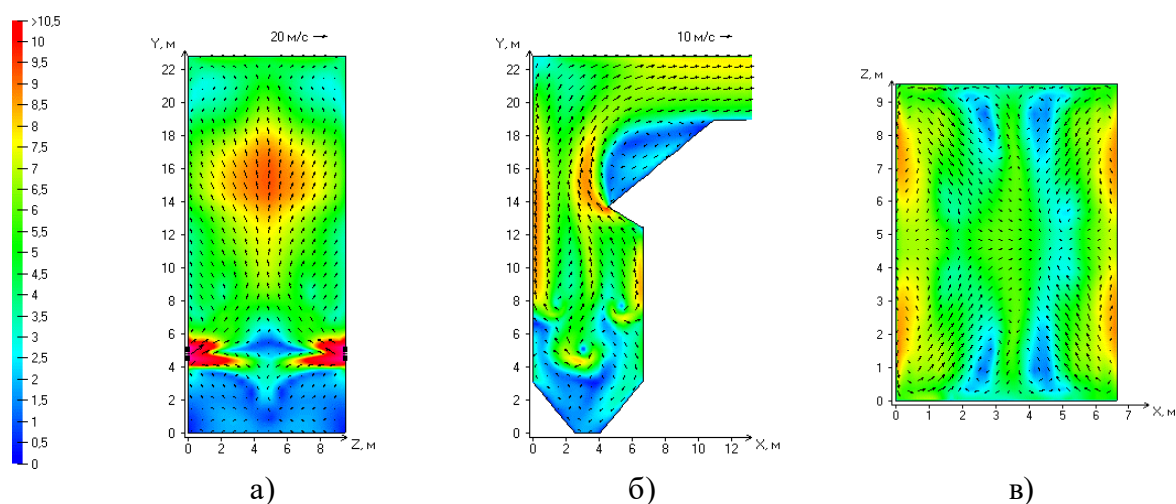


Рисунок IV.11 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 35\%$)

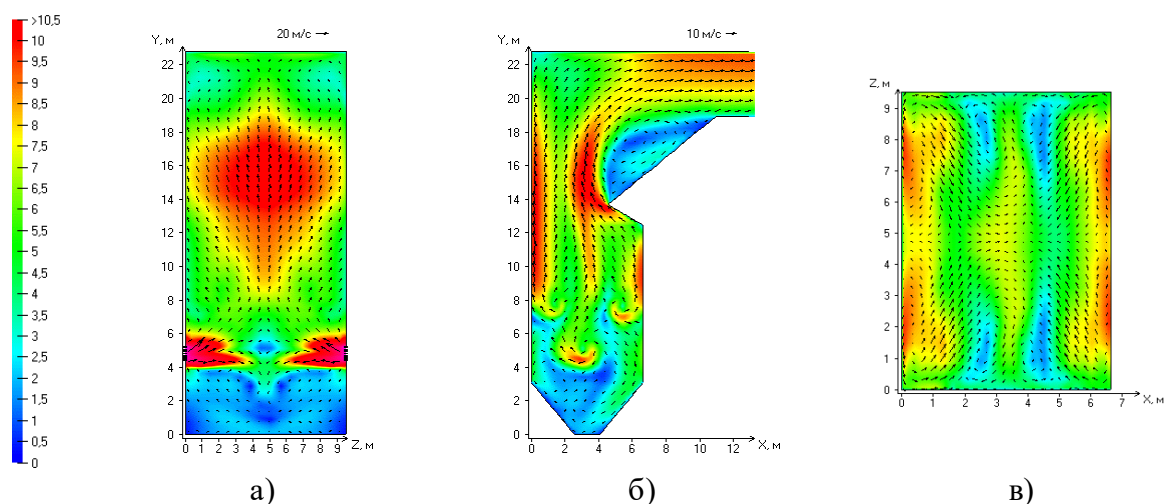


Рисунок IV.12 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 40\%$)

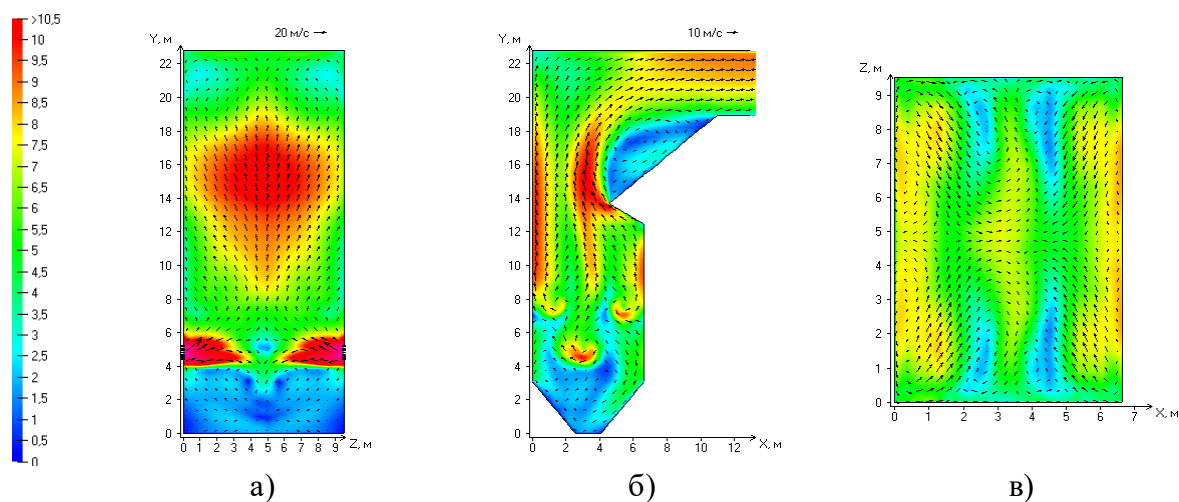


Рисунок IV.13 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 45\%$)

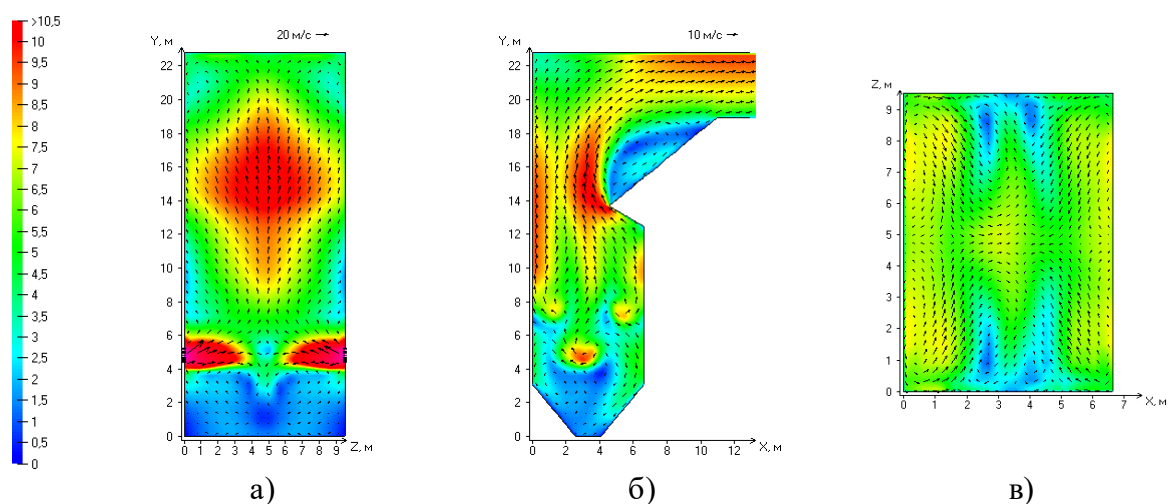


Рисунок IV.14 – Аэродинамическая структура потока (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 50\%$)

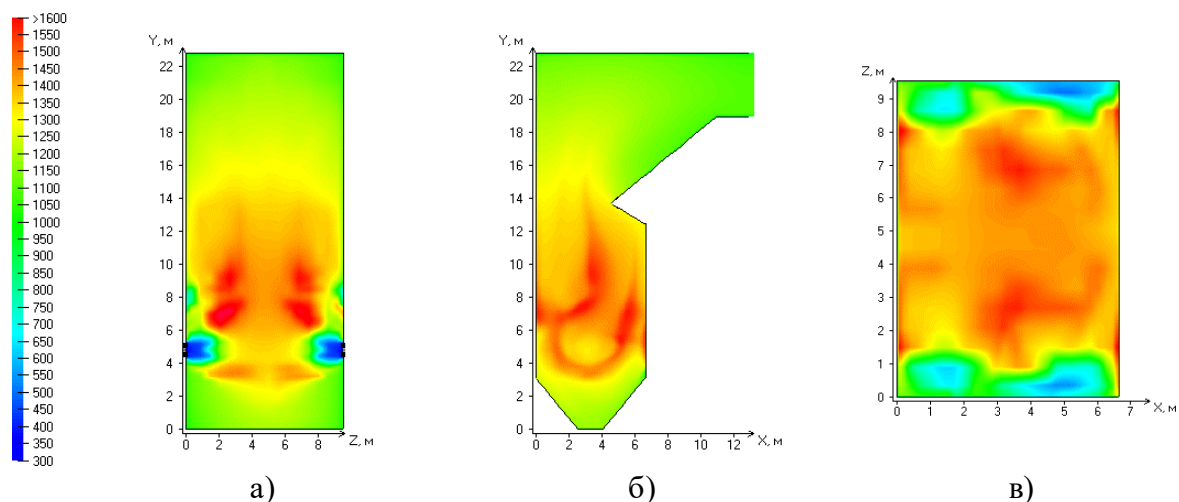


Рисунок IV.15 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 20\%$)

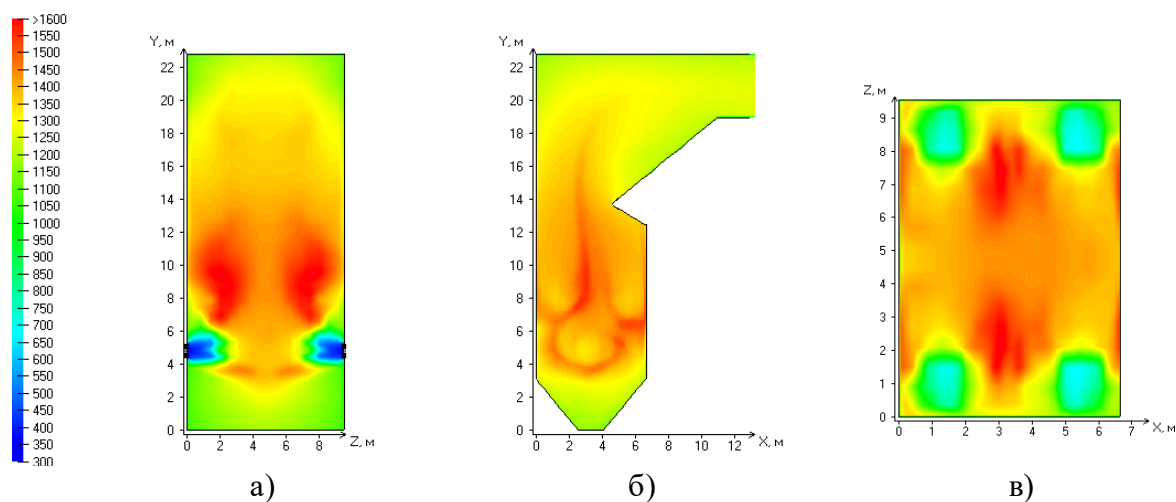


Рисунок IV.16 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 25\%$)

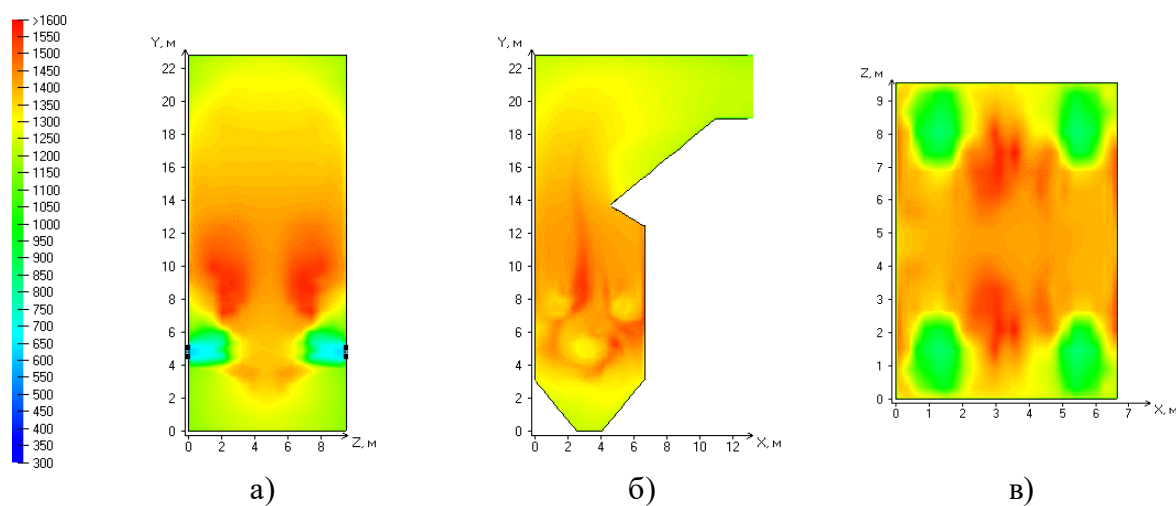


Рисунок IV.17 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 30\%$)

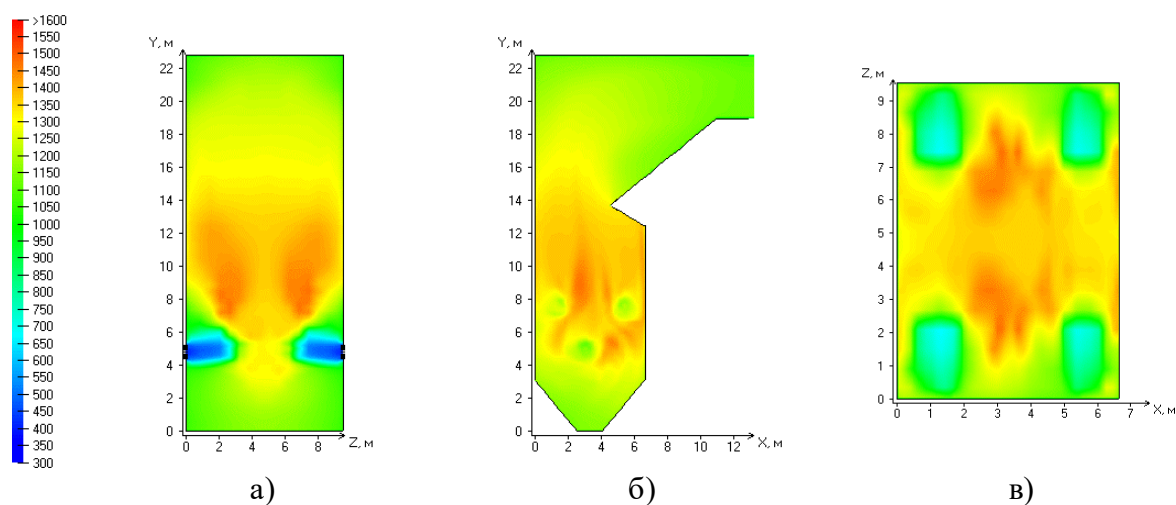


Рисунок IV.18 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 35\%$)

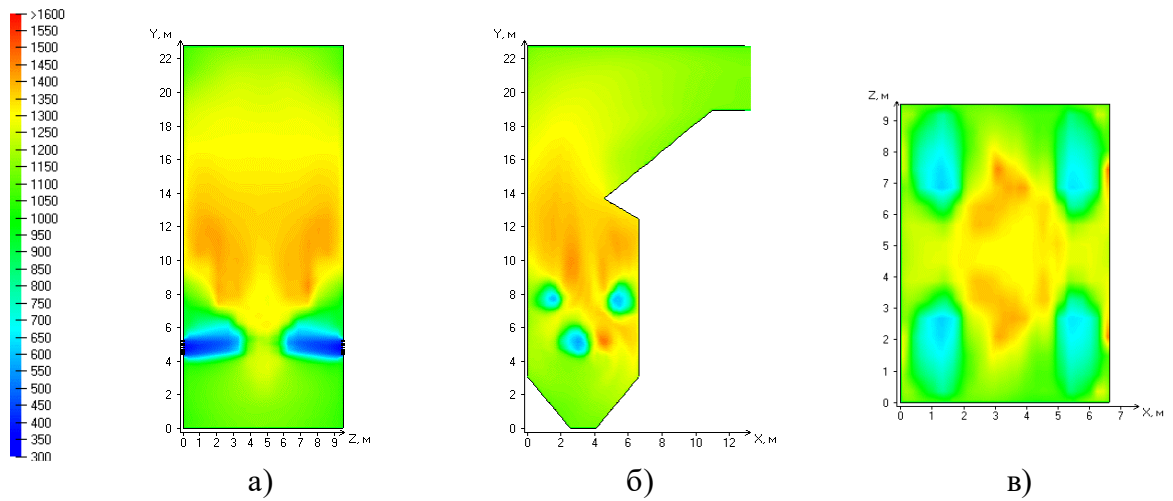


Рисунок IV.19 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 40\%$)

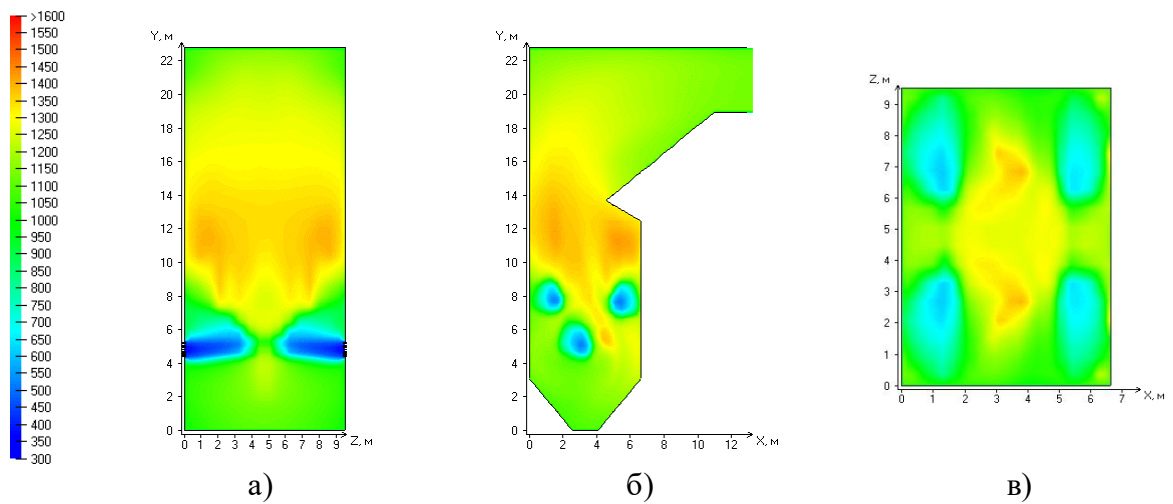


Рисунок IV.20 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 45\%$)

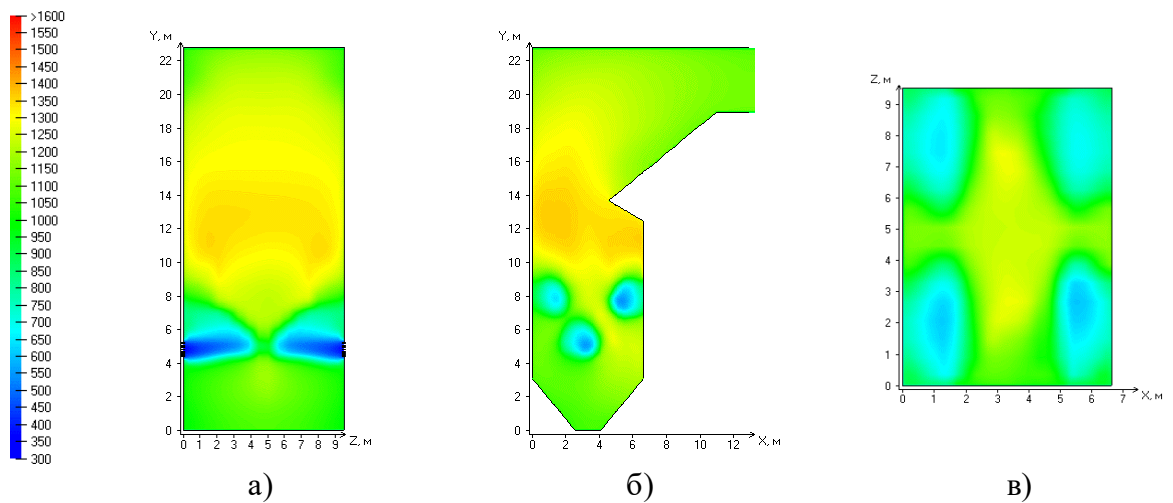


Рисунок IV.21 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 50\%$)

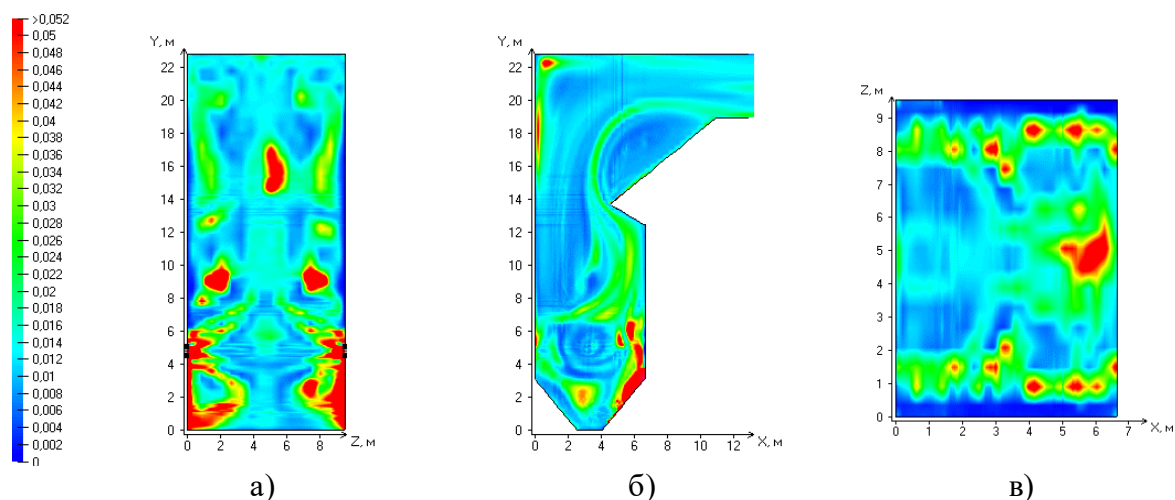


Рисунок IV.22 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 20\%$)

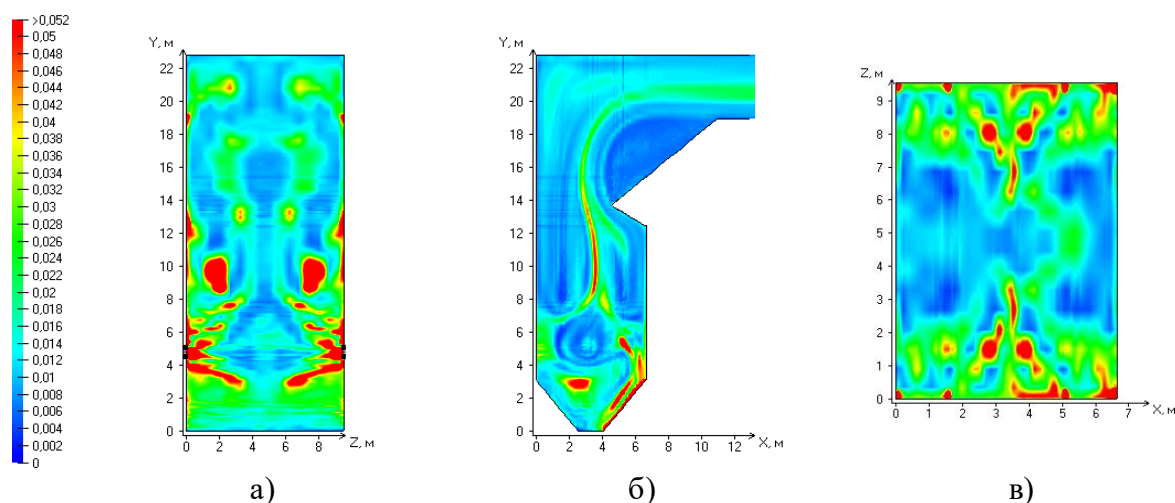


Рисунок IV.23 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 25\%$)

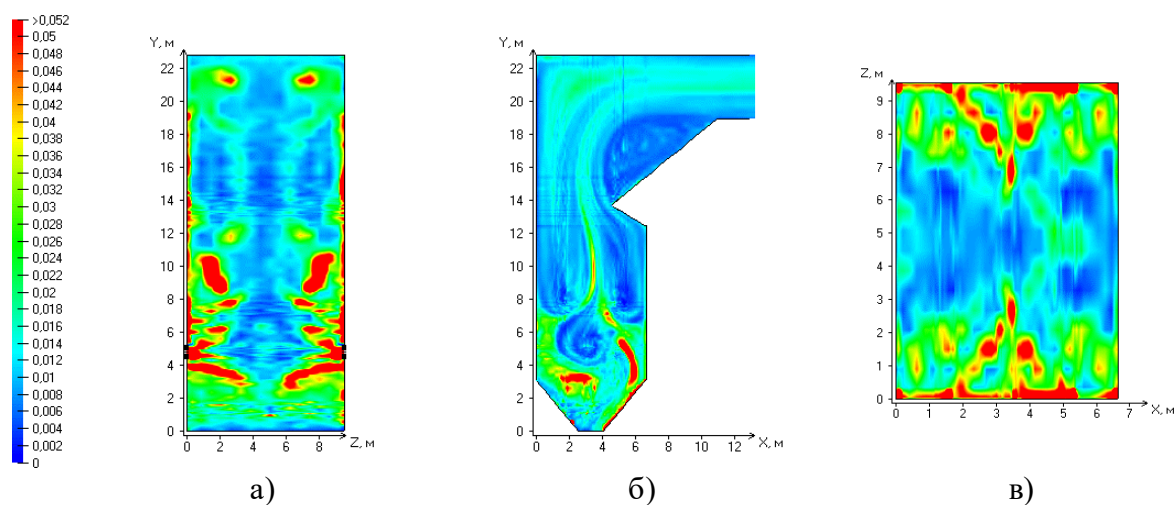


Рисунок IV.24 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 30\%$)

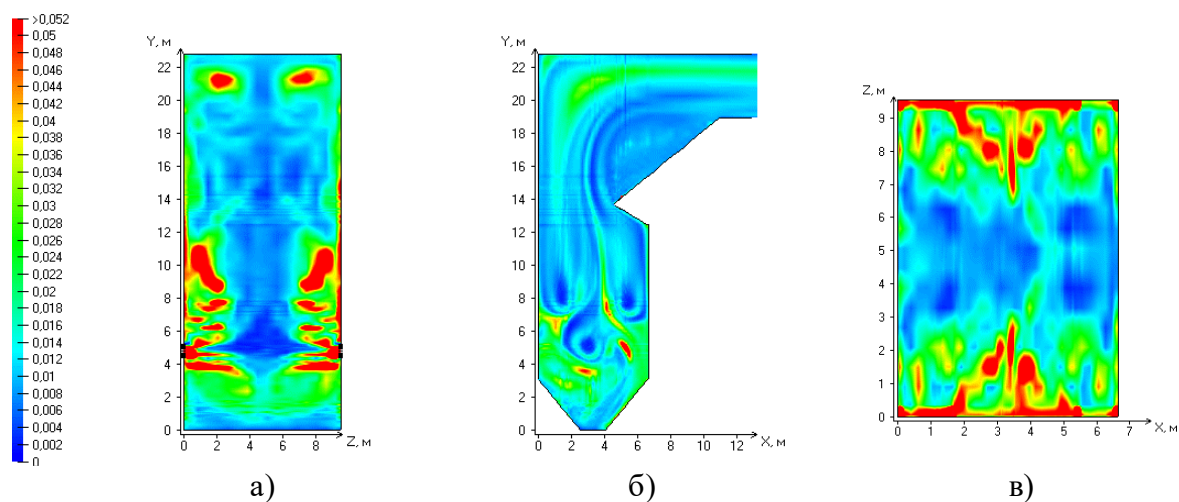


Рисунок IV.25 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 35\%$)

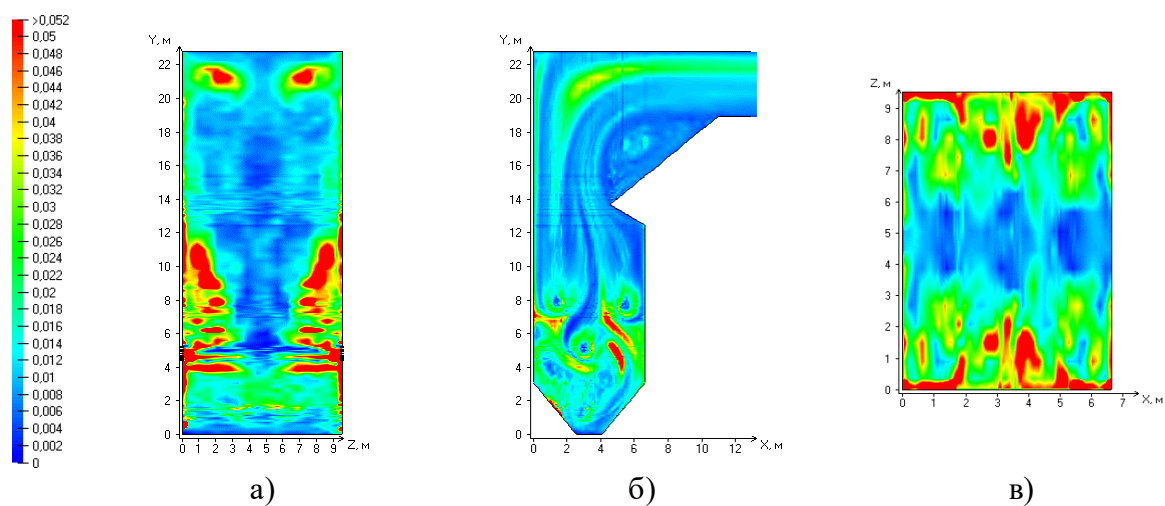


Рисунок IV.26 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 40\%$)

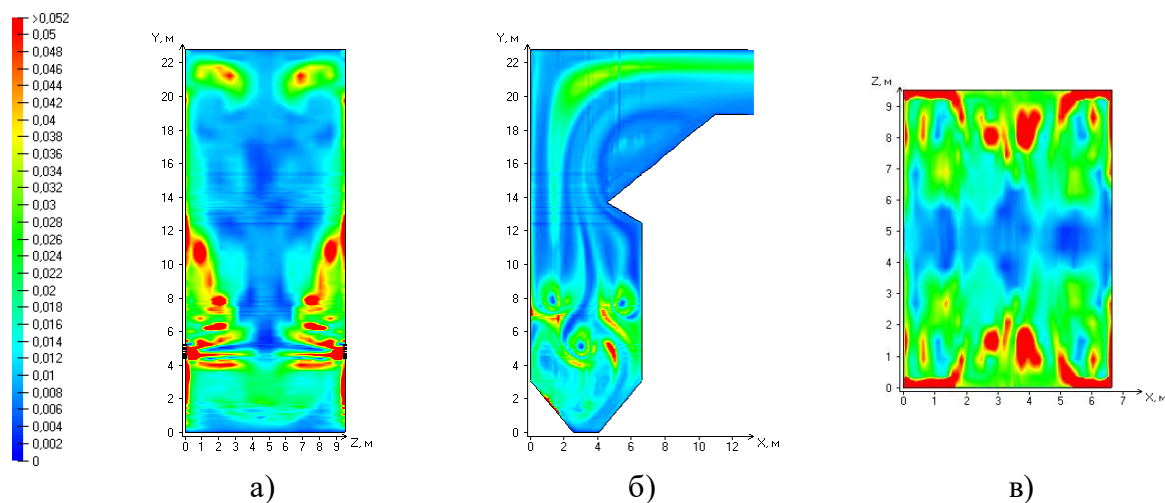


Рисунок IV.27 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 45\%$)

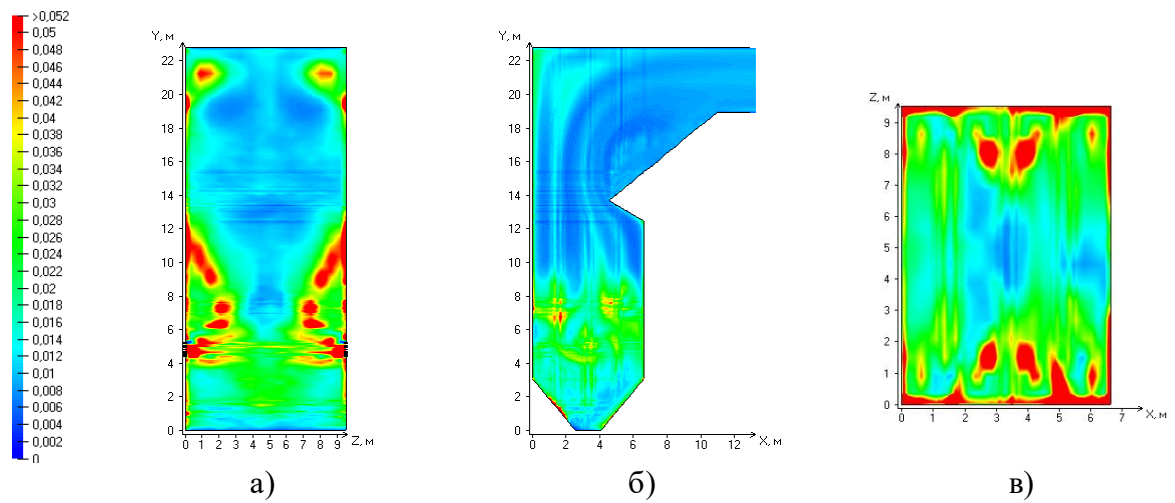


Рисунок IV.28 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – влажность угля $W_t^r = 50 \%$)

Приложение V. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания смеси таловского и кузнецкого углей

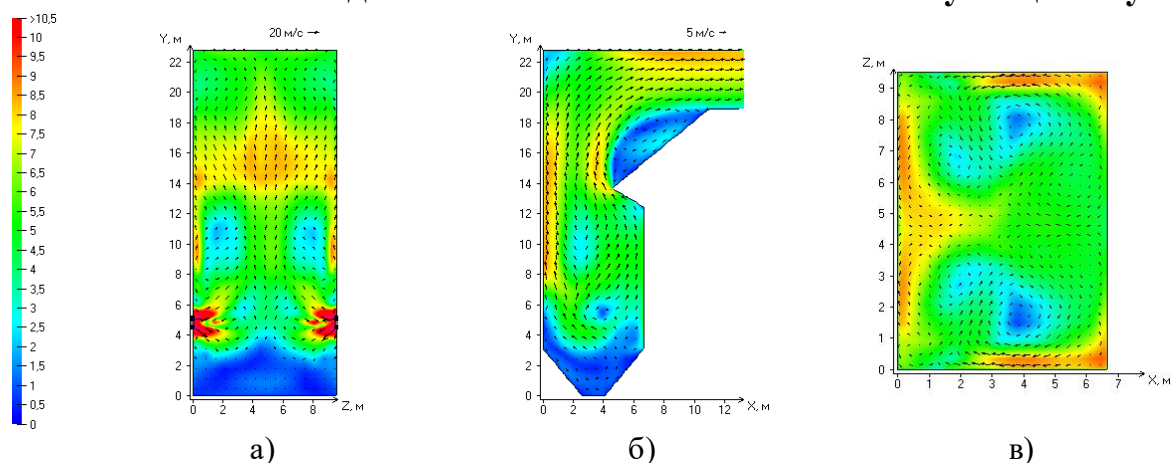


Рисунок V.1 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

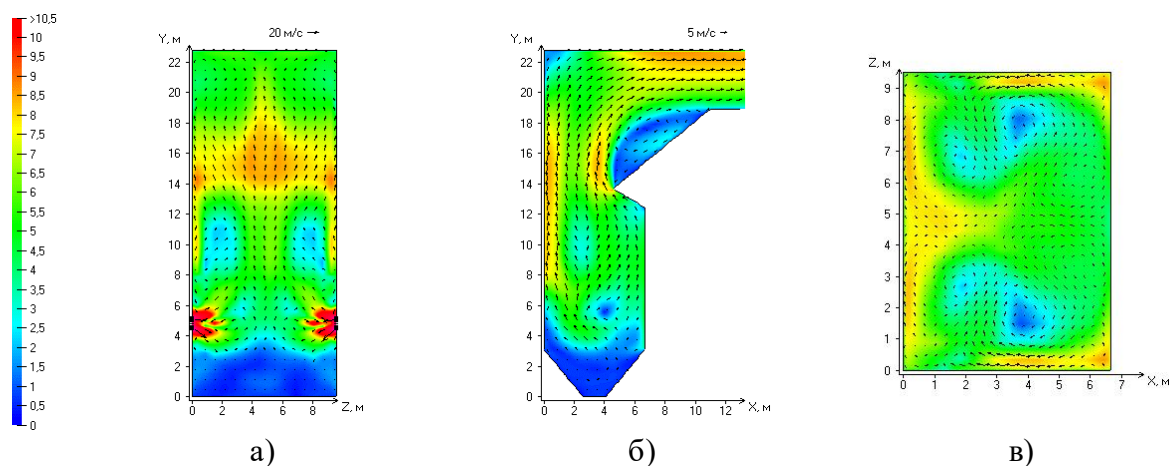


Рисунок V.2 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 20:80)

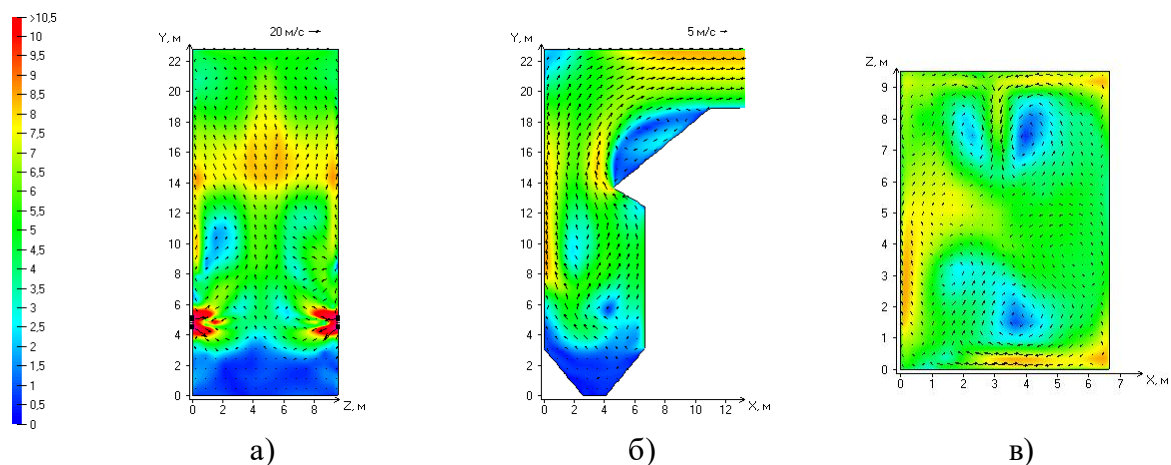


Рисунок V.3 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 30:70)

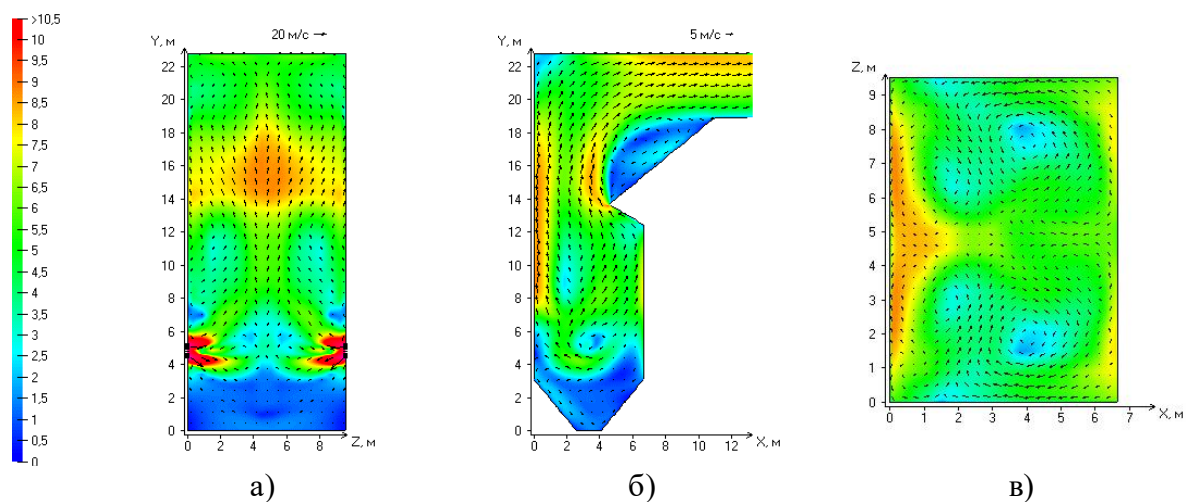


Рисунок V.4 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 40:60)

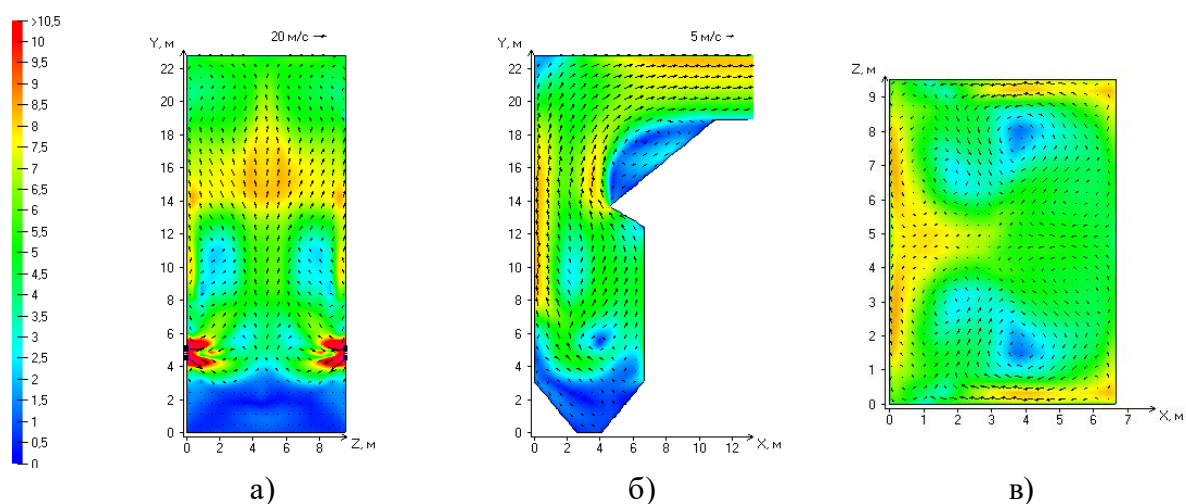


Рисунок V.5 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

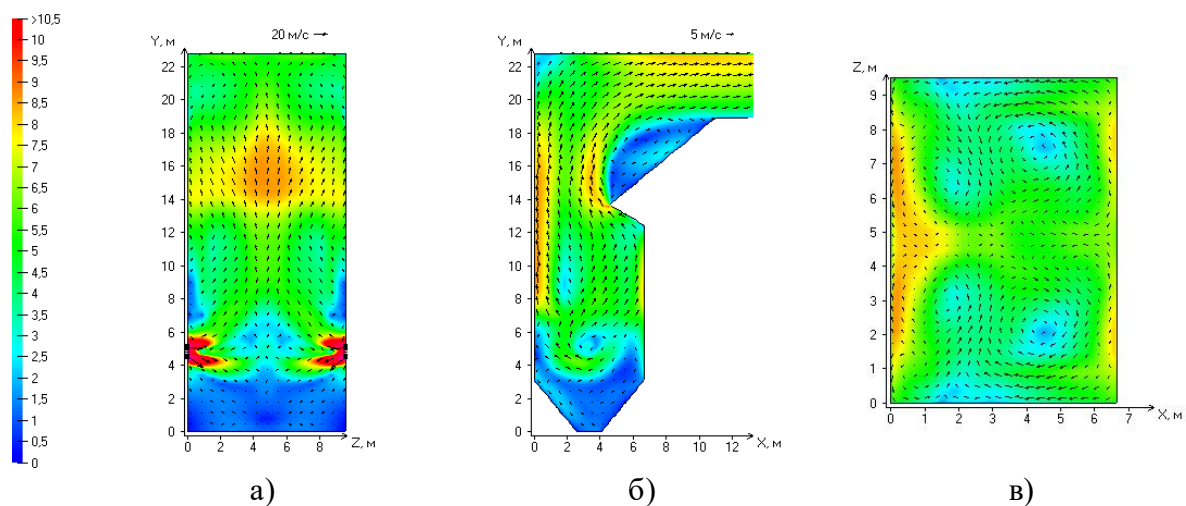


Рисунок V.6 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 60:40)

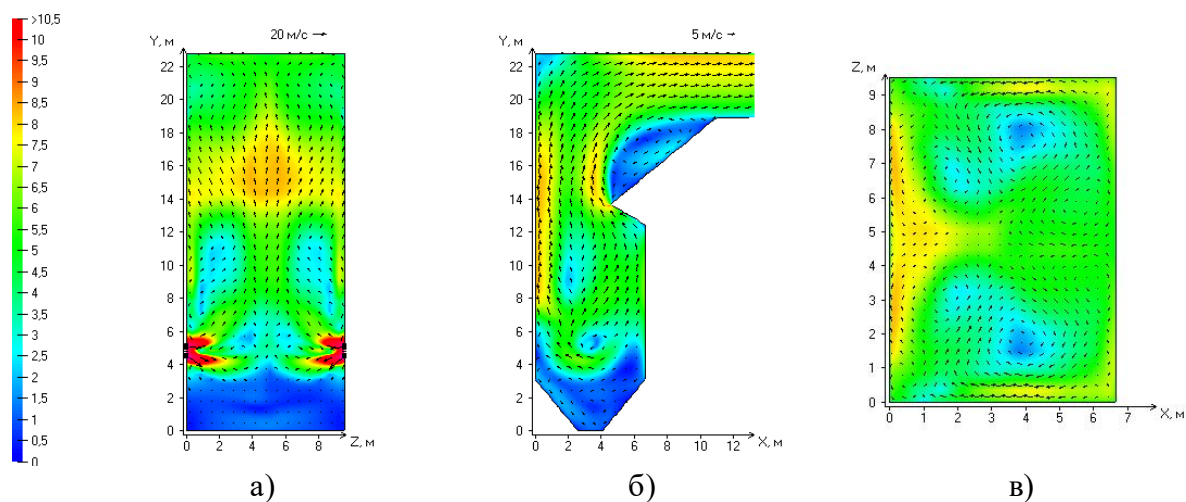


Рисунок V.7 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 70:30)

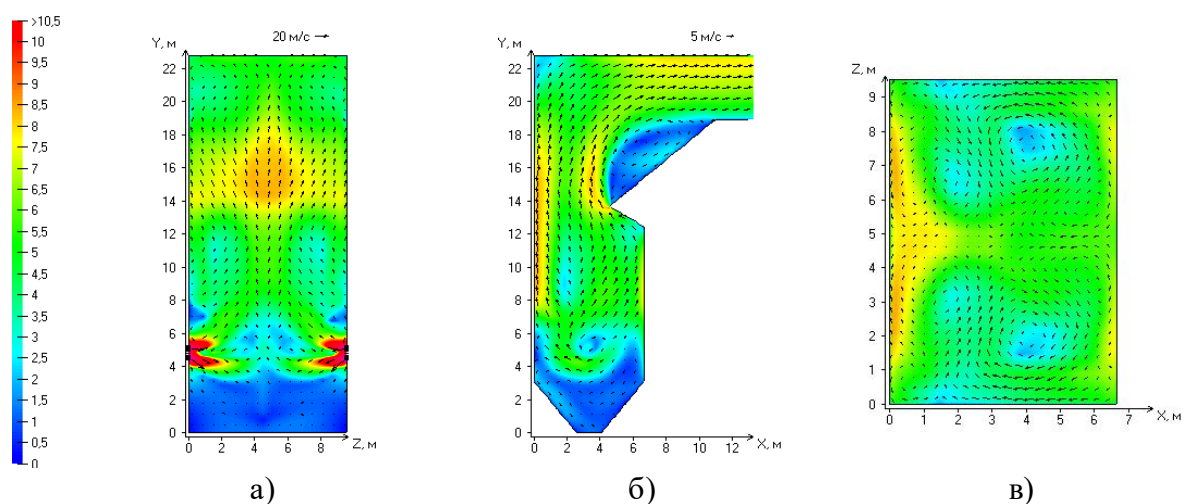


Рисунок V.8 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 80:20)

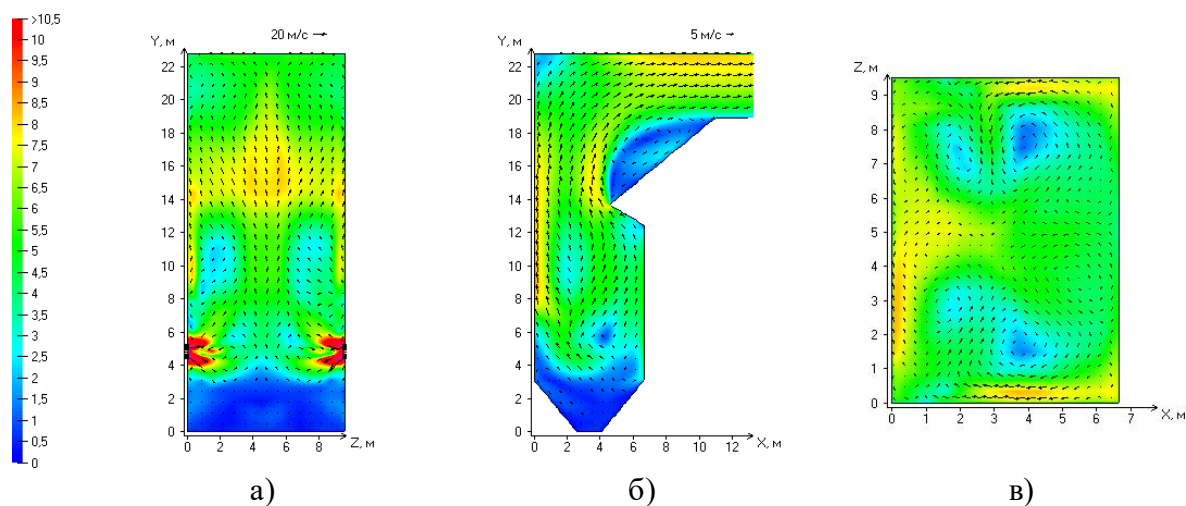


Рисунок V.9 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

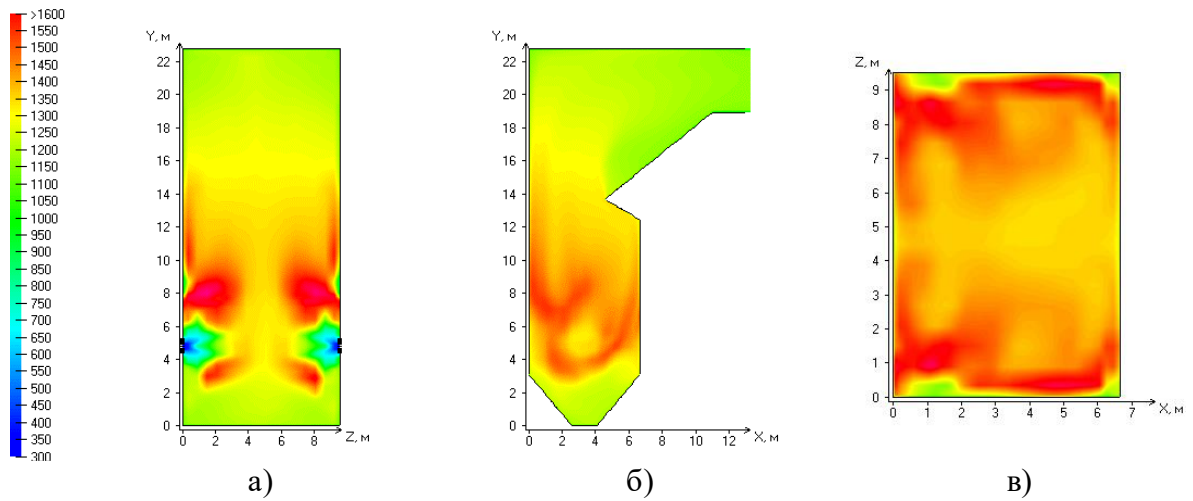


Рисунок V.10 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

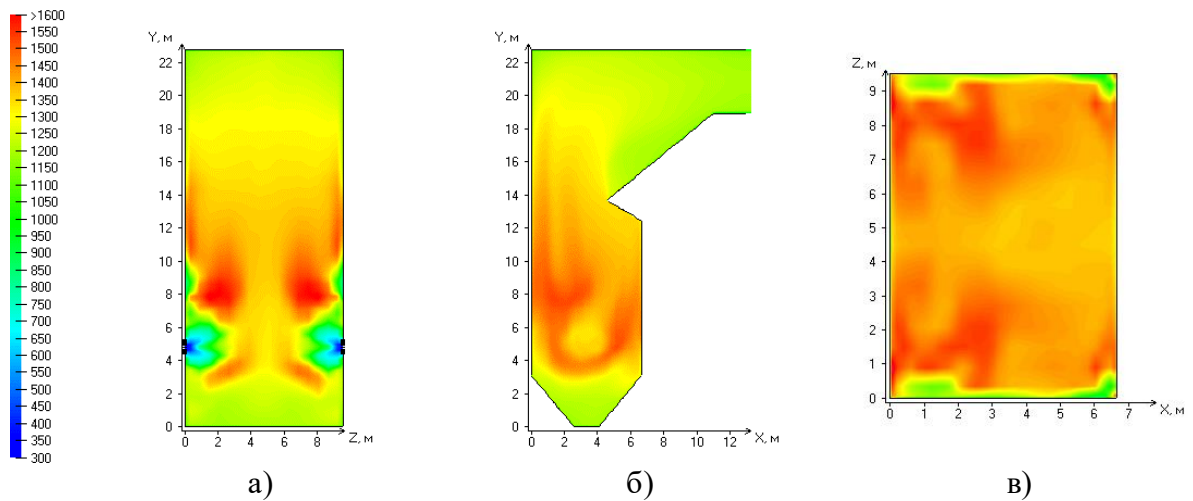


Рисунок V.11 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 20:80)

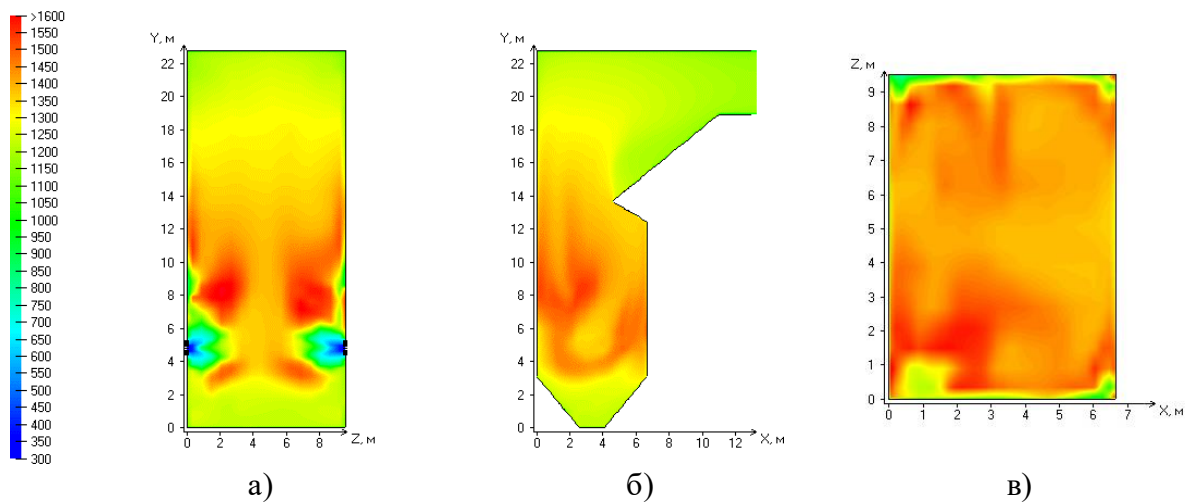


Рисунок V.12 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 30:70)

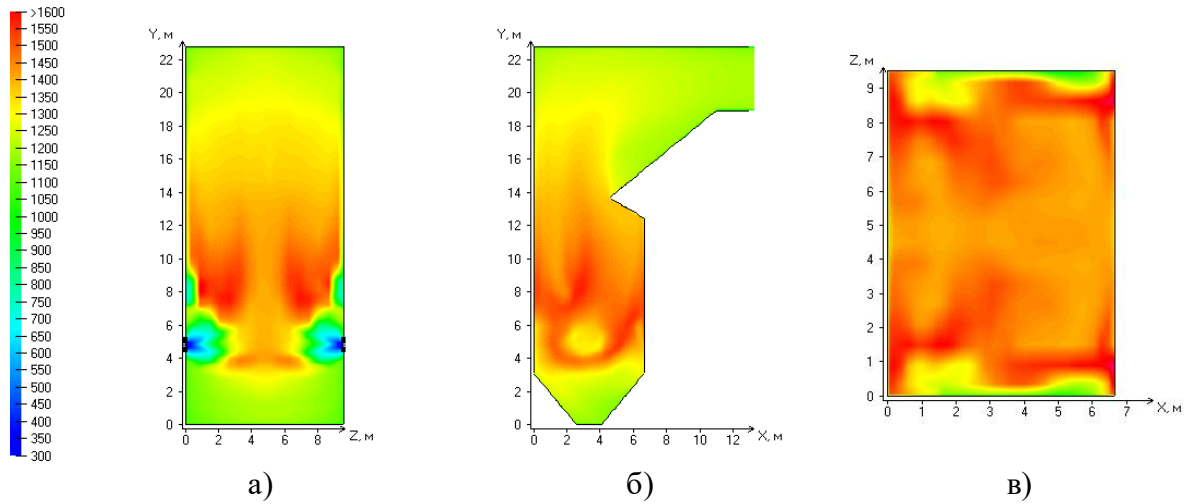


Рисунок V.13 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 40:60)

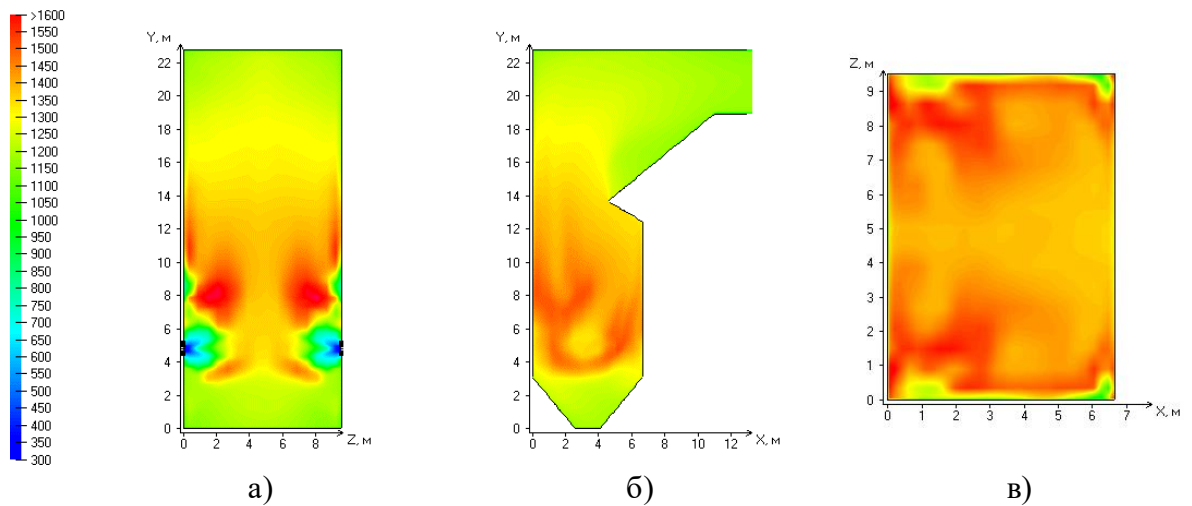


Рисунок V.14 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

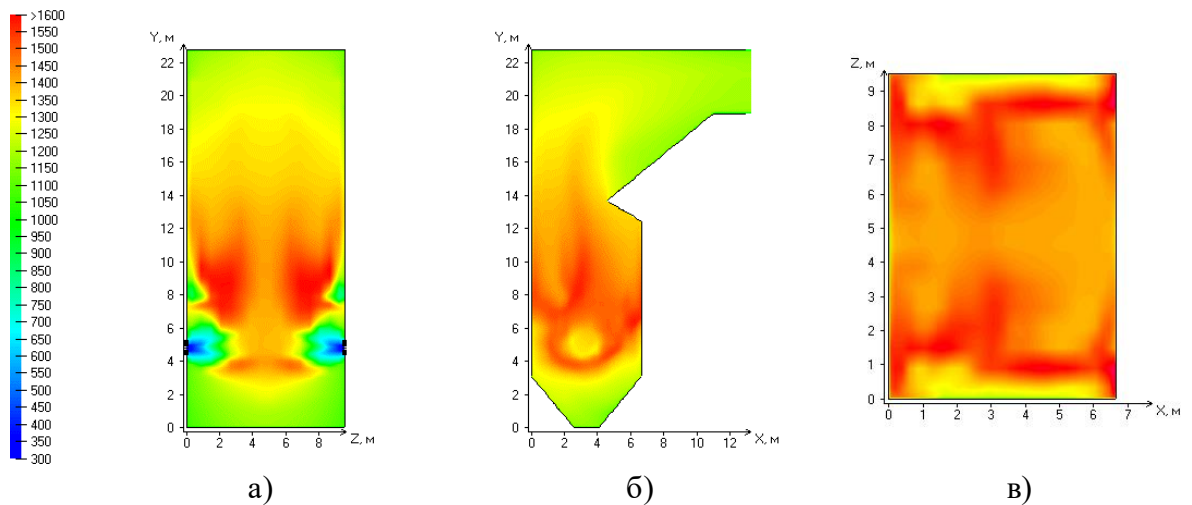


Рисунок V.15 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 60:40)

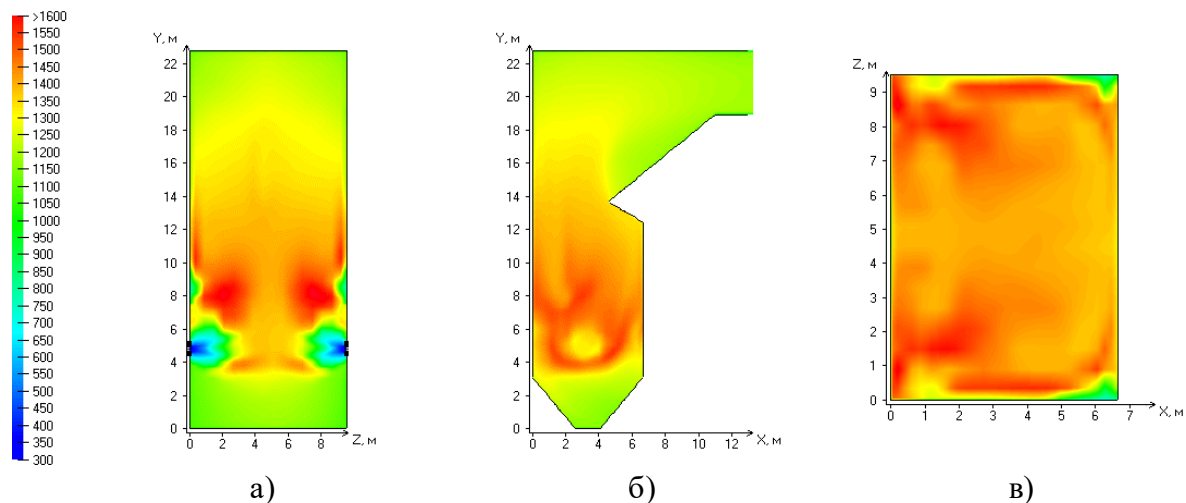


Рисунок V.16 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 70:30)

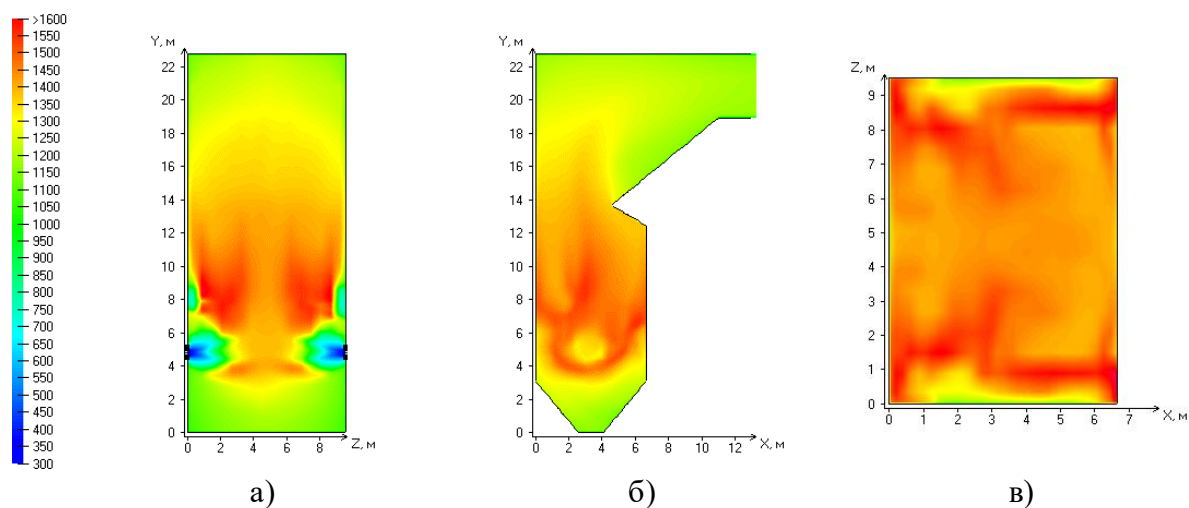


Рисунок V.17 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 80:20)

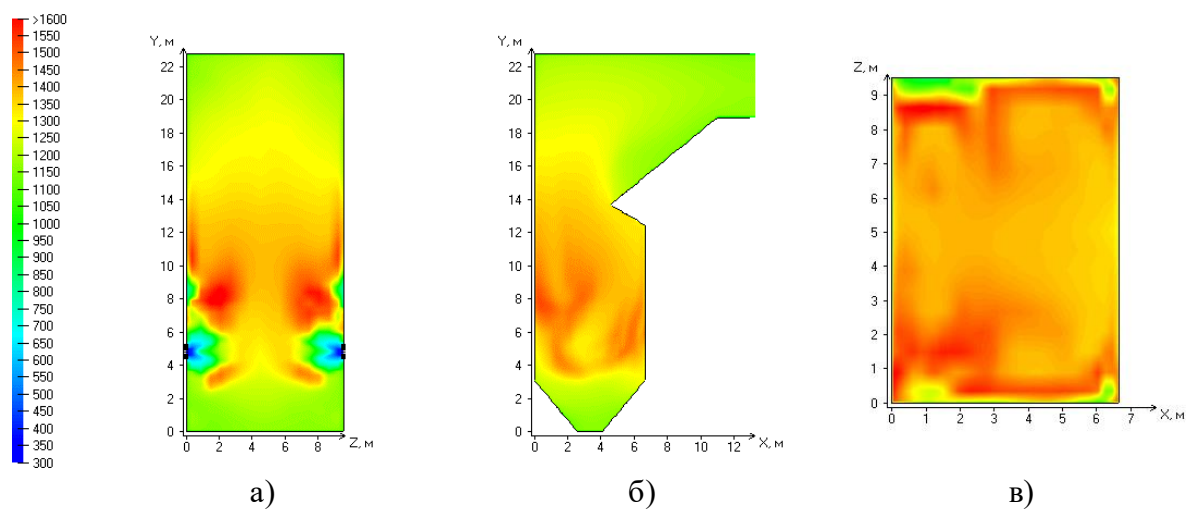


Рисунок V.18 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

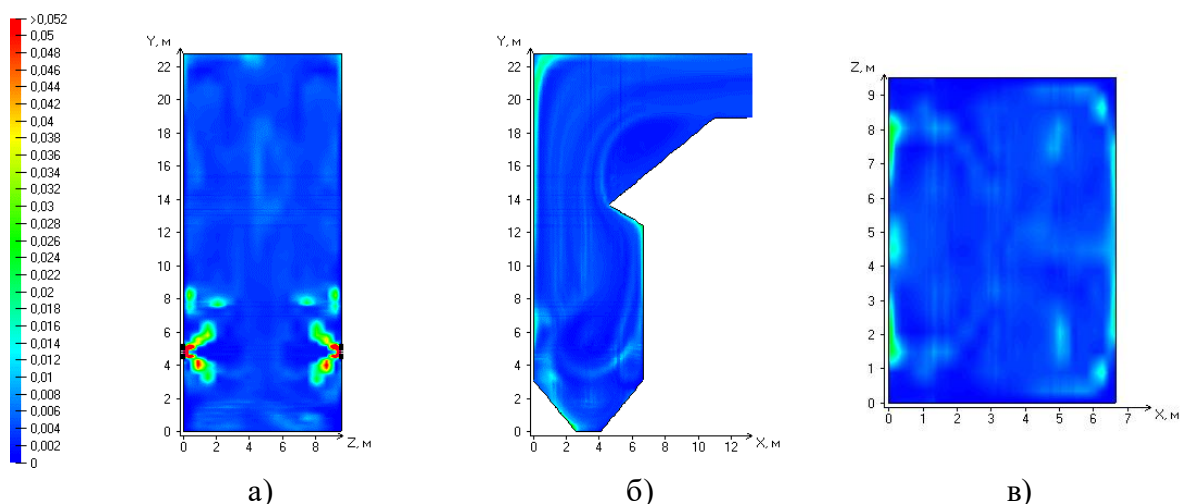


Рисунок V.19 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 10:90)

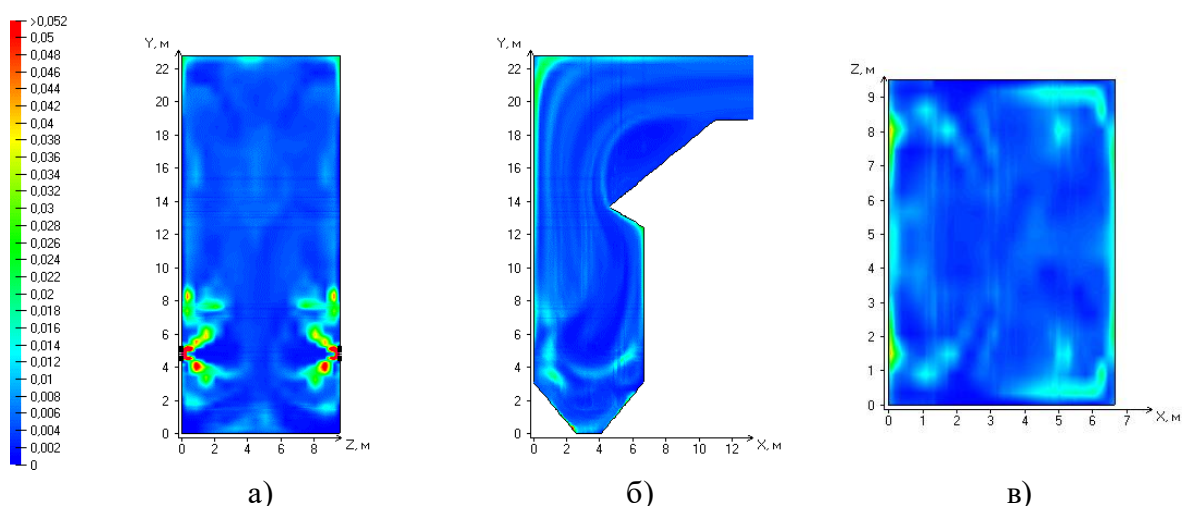


Рисунок V.20 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 20:80)

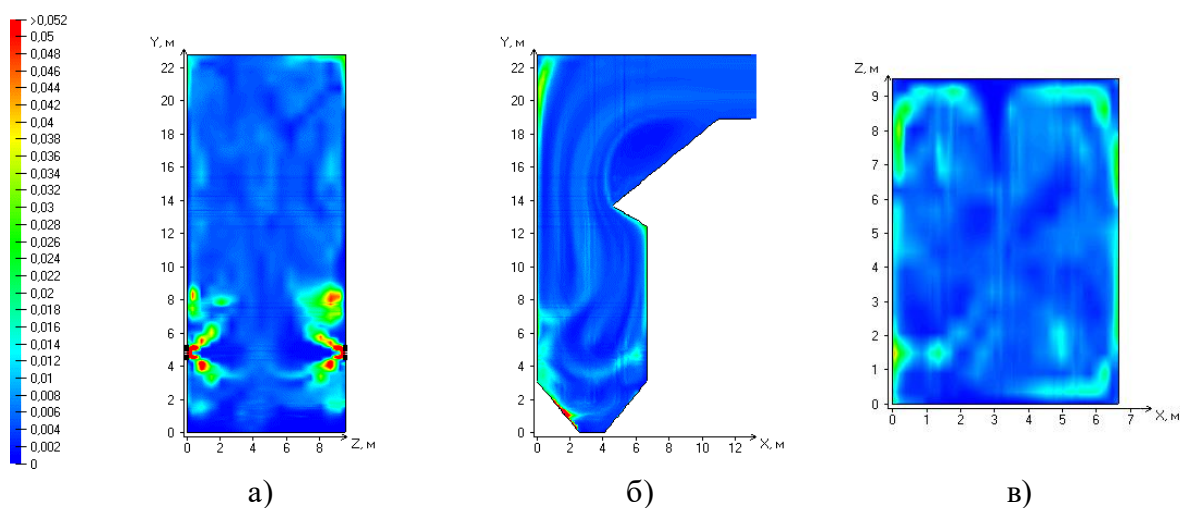


Рисунок V.21 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 30:70)

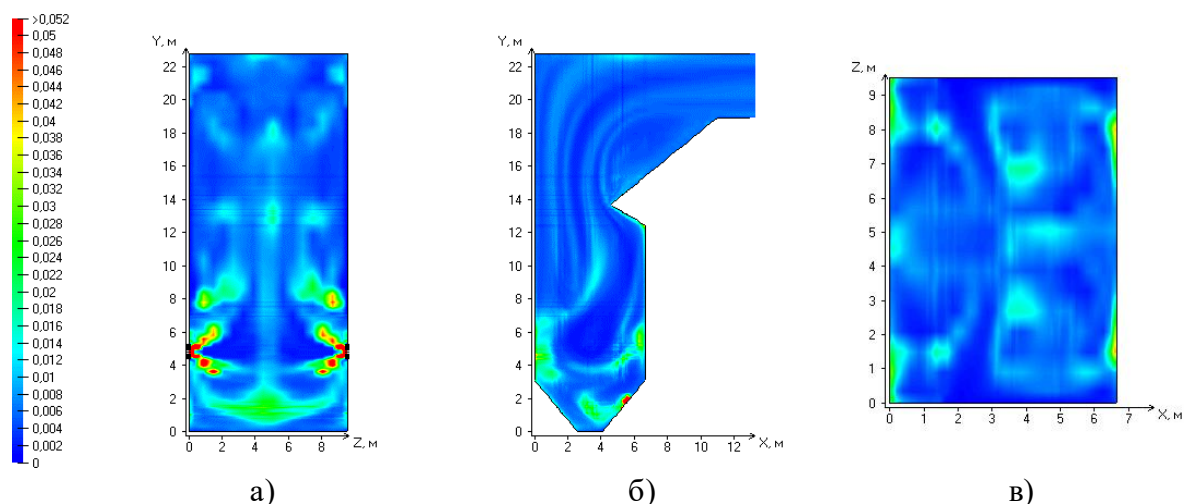


Рисунок V.22 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 40:60)

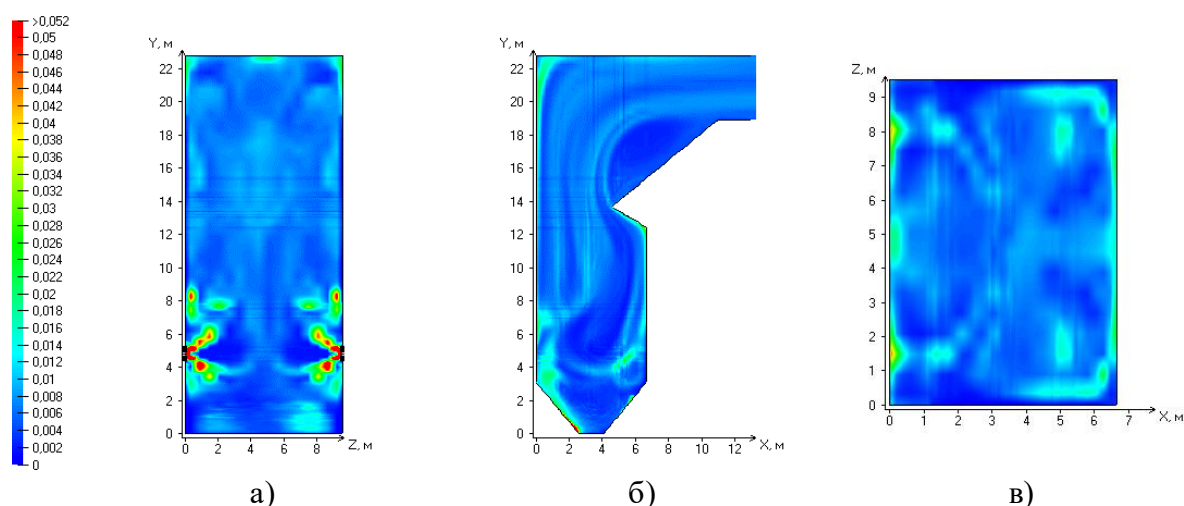


Рисунок V.23 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 50:50)

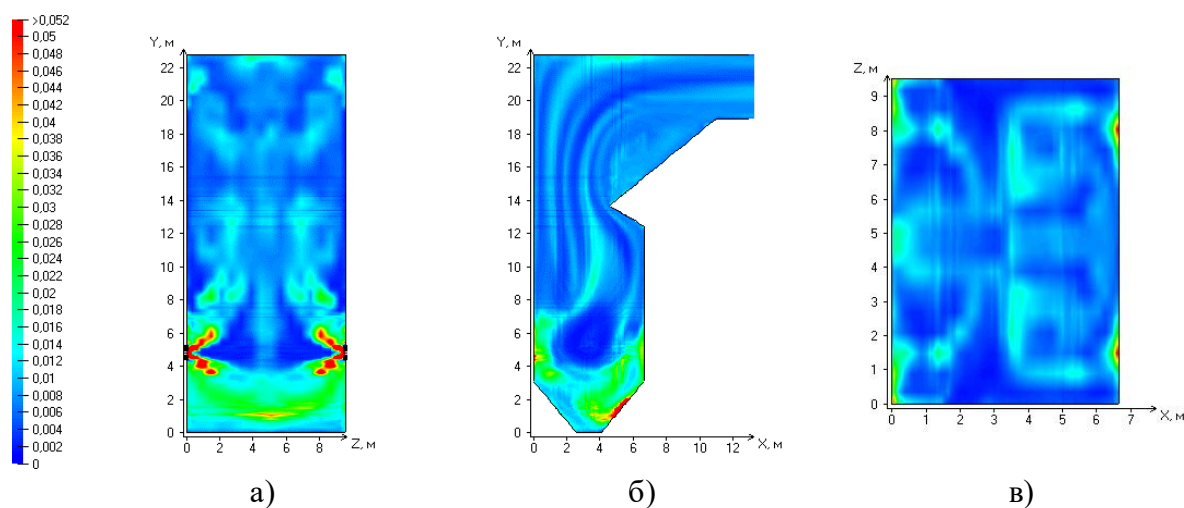


Рисунок V.24 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 60:40)

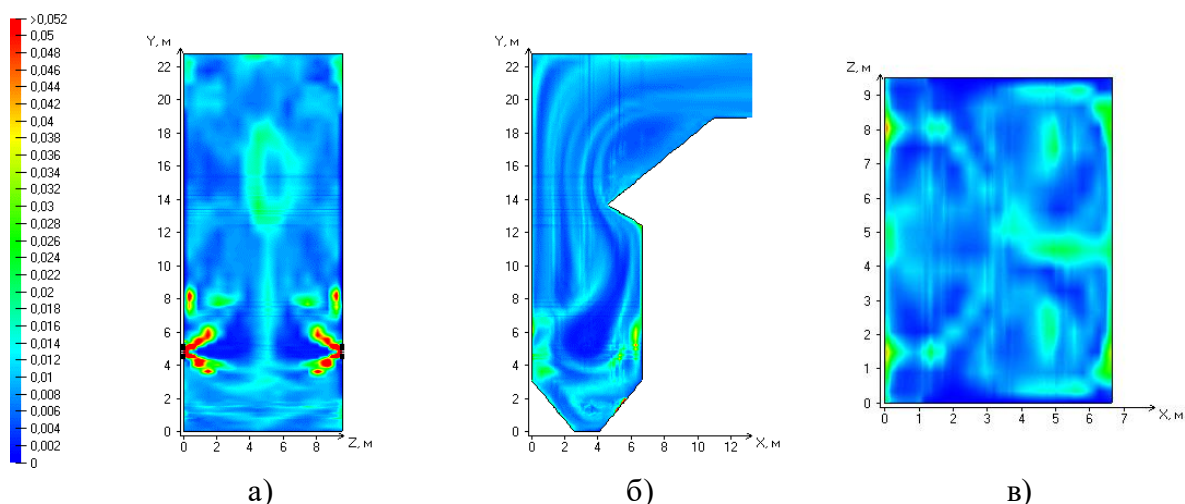


Рисунок V.25 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 70:30)

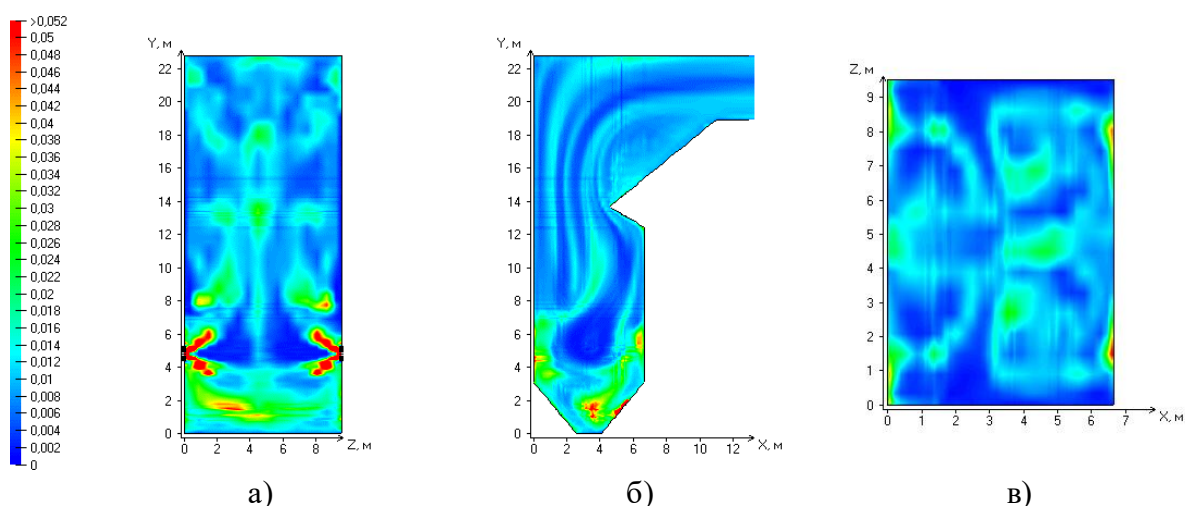


Рисунок V.26 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 80:20)

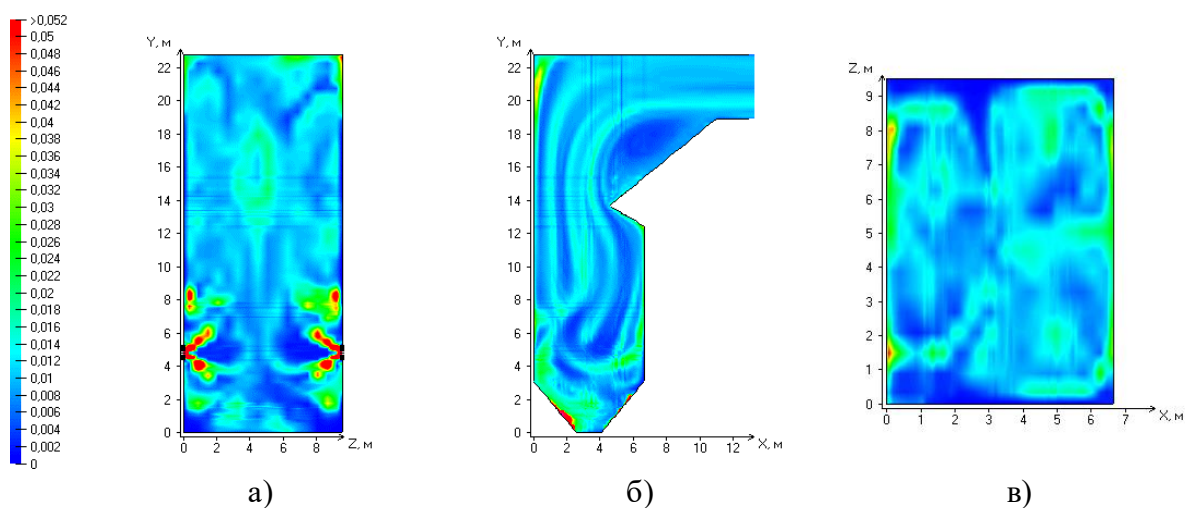


Рисунок V.27 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь углей в соотношении 90:10)

Приложение VI. Результаты численного исследования топочной камеры котла БКЗ-220-100-4 для сжигания смеси полукокса таловского угля и кузнецкого угля

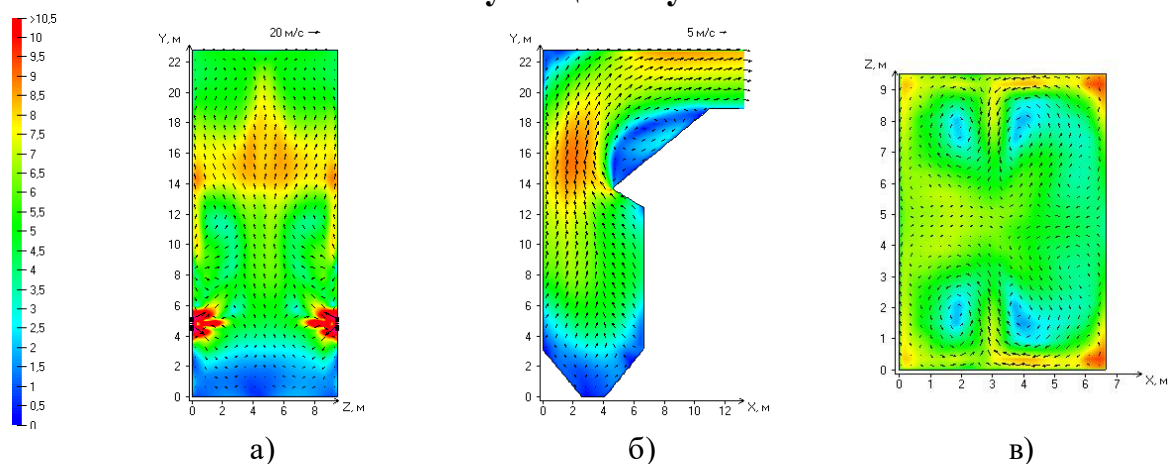


Рисунок VI.1 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

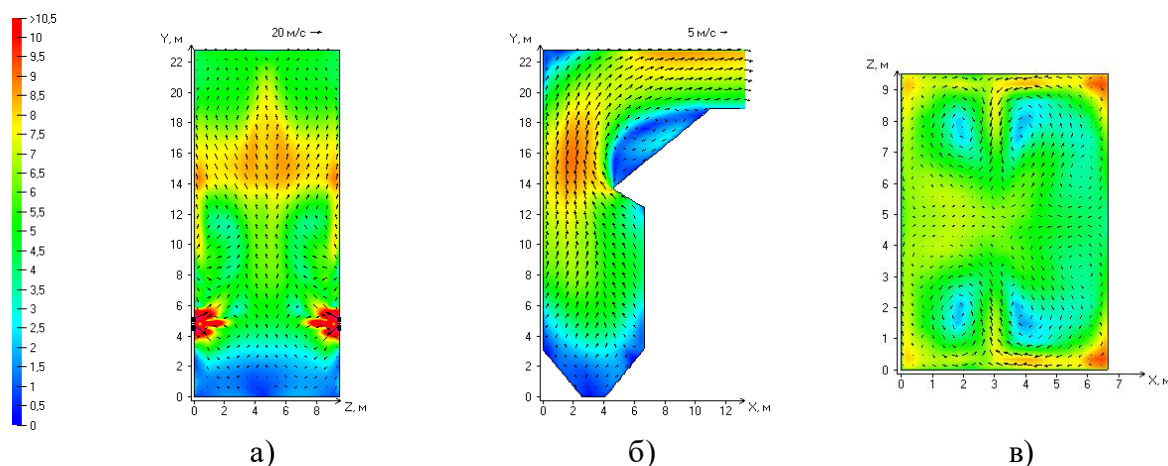


Рисунок VI.2 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 20:80)

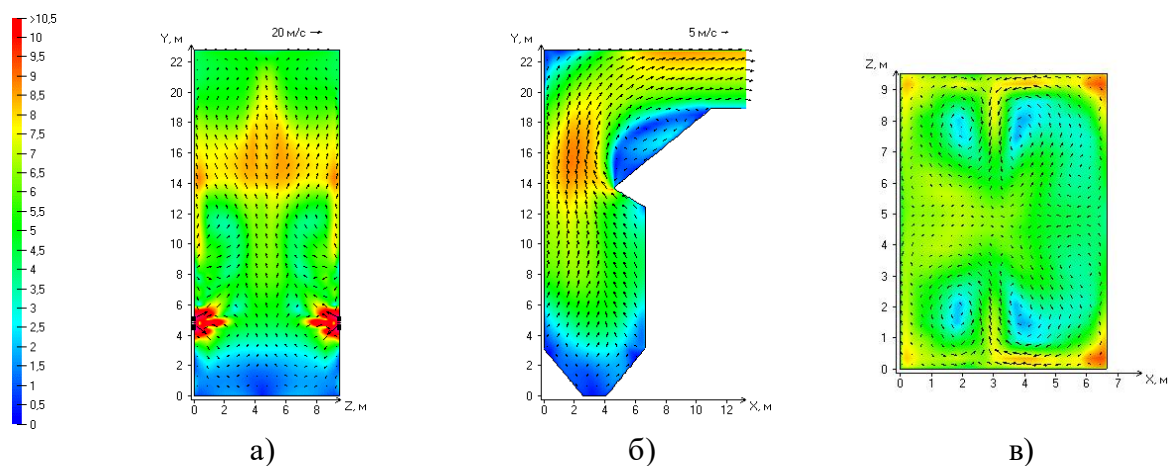


Рисунок VI.3 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 30:70)

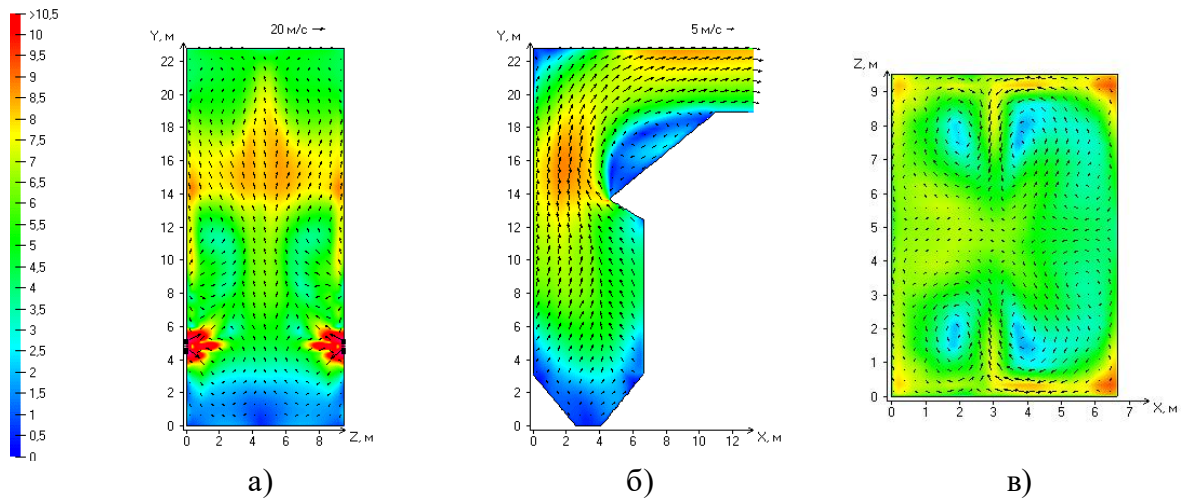


Рисунок VI.4 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 40:60)

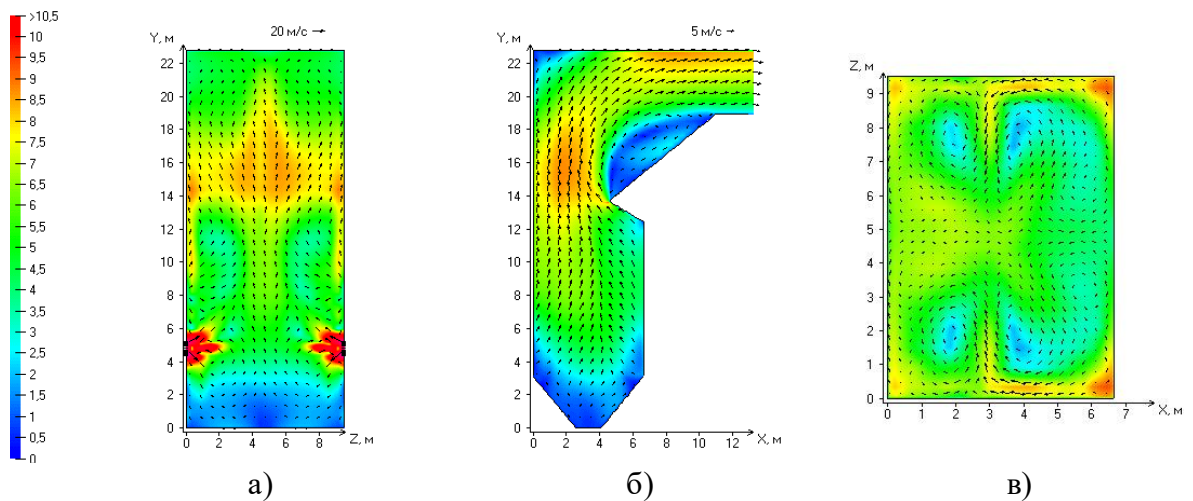


Рисунок VI.5 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

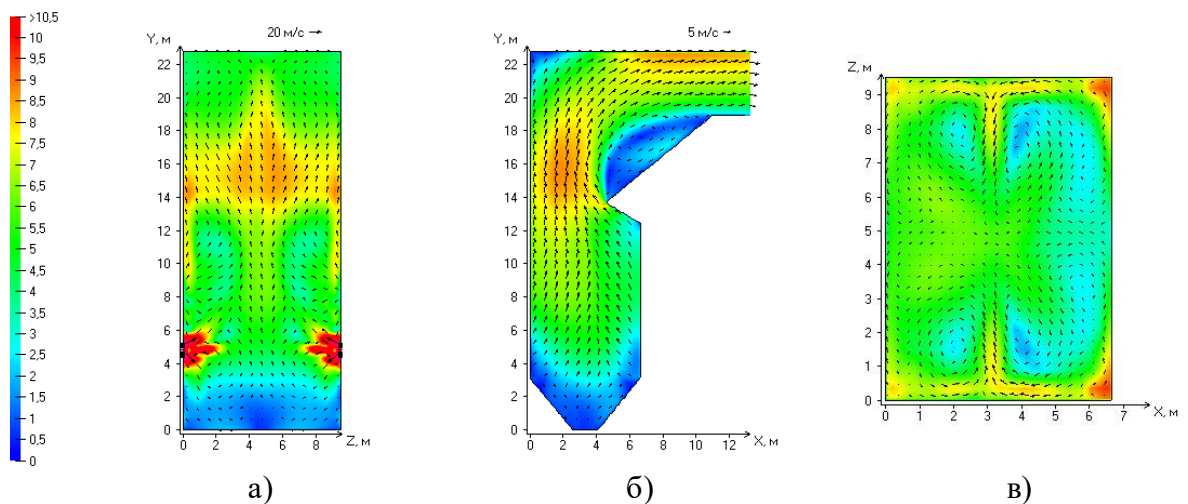


Рисунок VI.6 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 60:40)

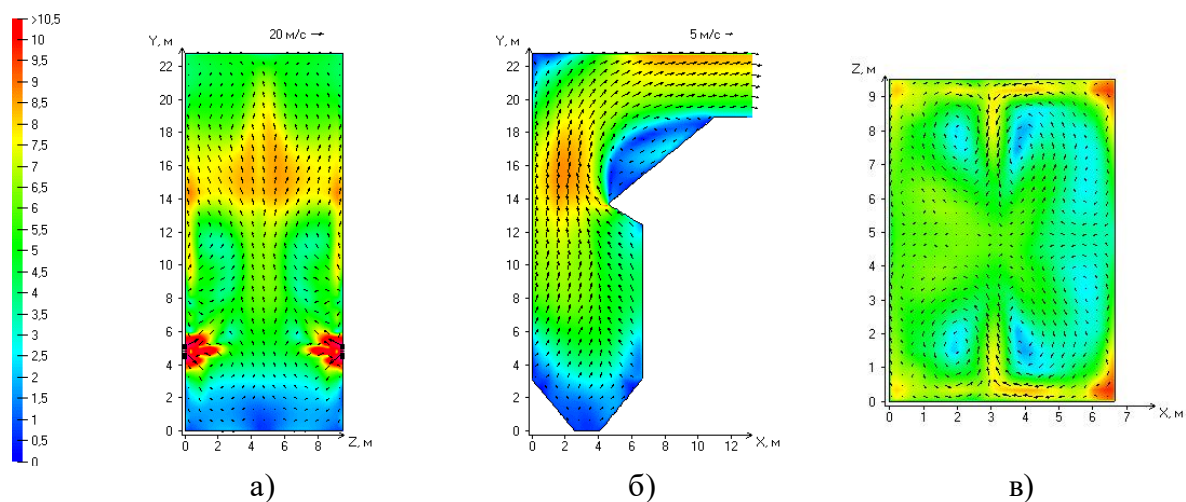


Рисунок VI.7 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 70:30)

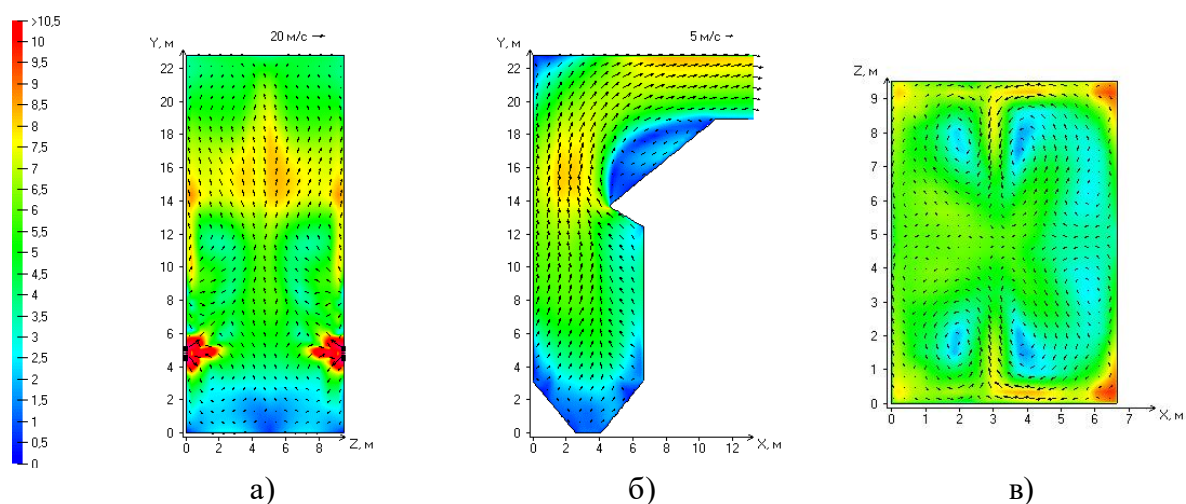


Рисунок VI.8 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 80:20)

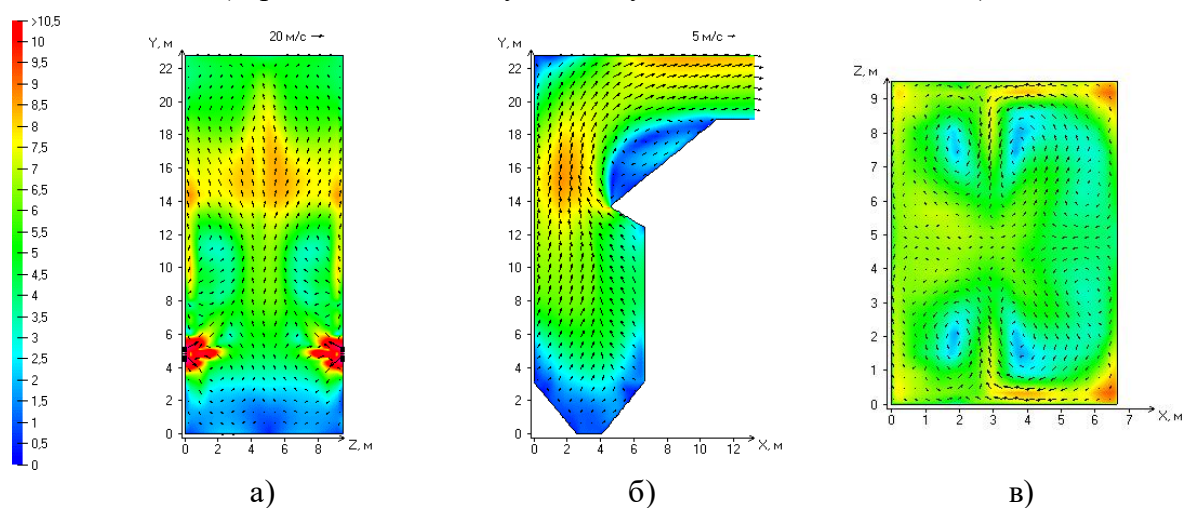


Рисунок VI.9 – Заполнение топочной камеры аэродинамическим потоком и его скорость (м/с) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

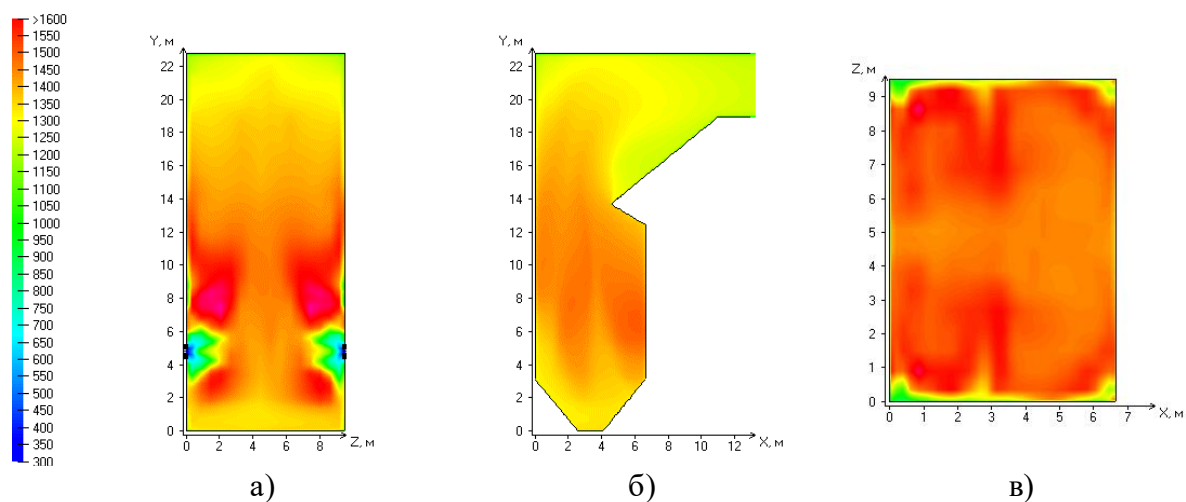


Рисунок VI.10 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

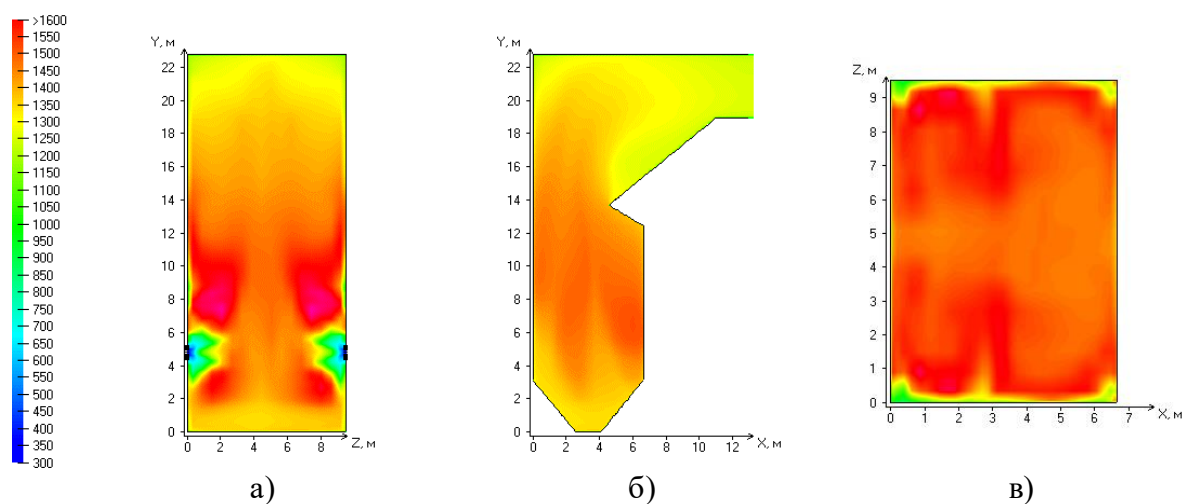


Рисунок VI.11 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 20:80)

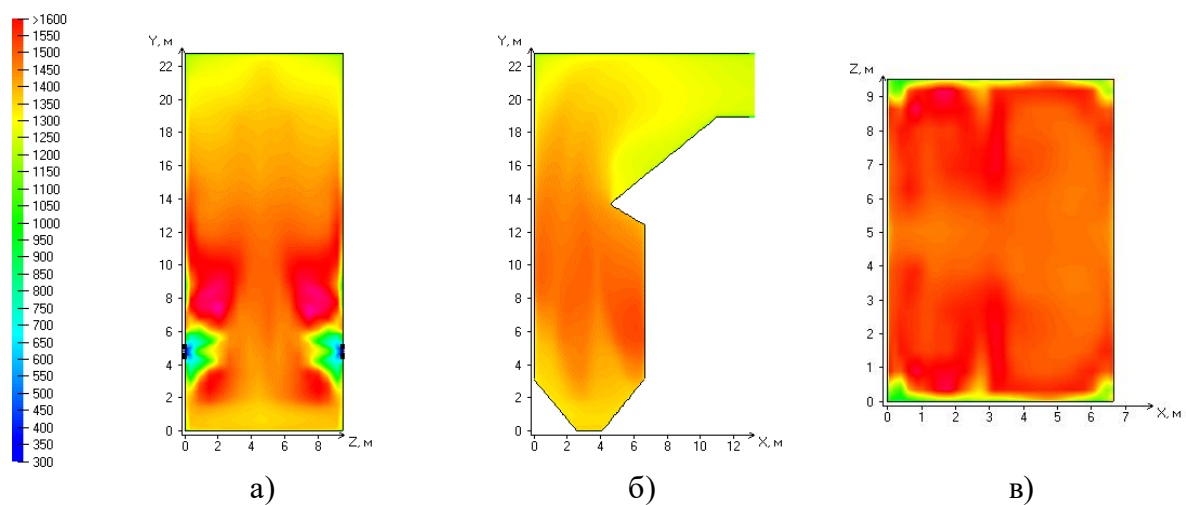


Рисунок VI.12 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 30:70)

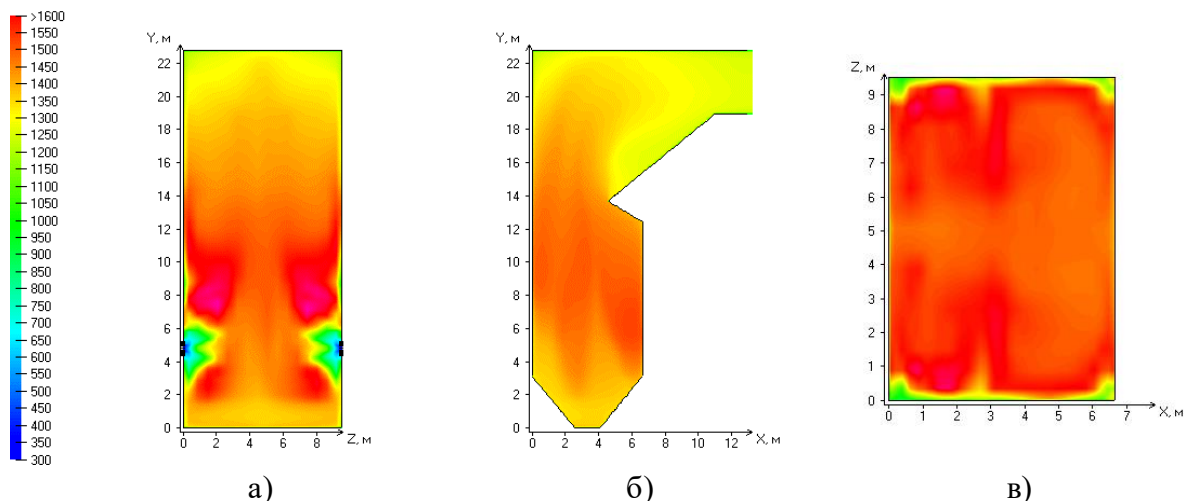


Рисунок VI.13 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 40:60)

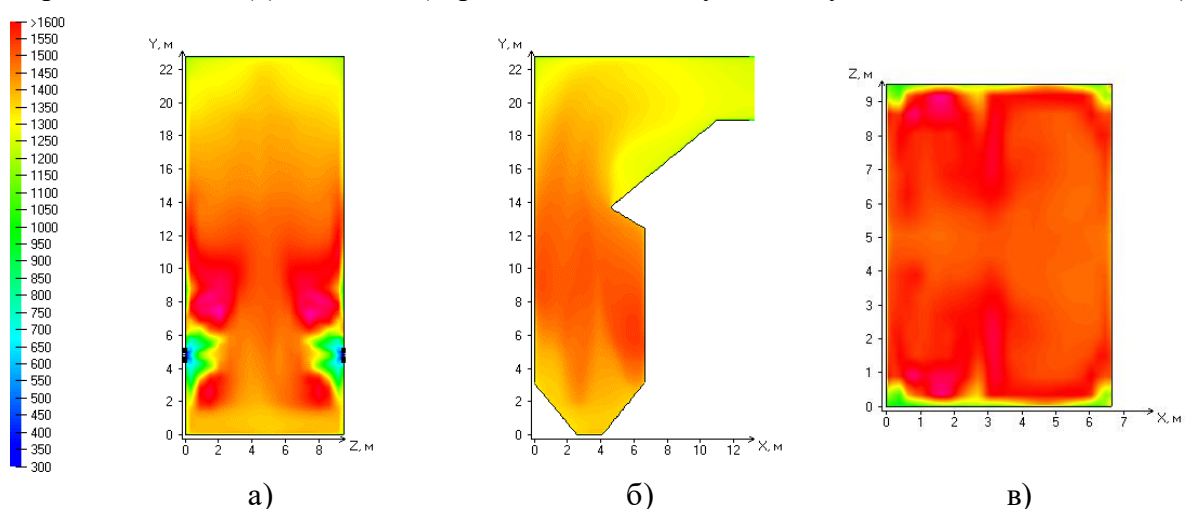


Рисунок VI.14 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

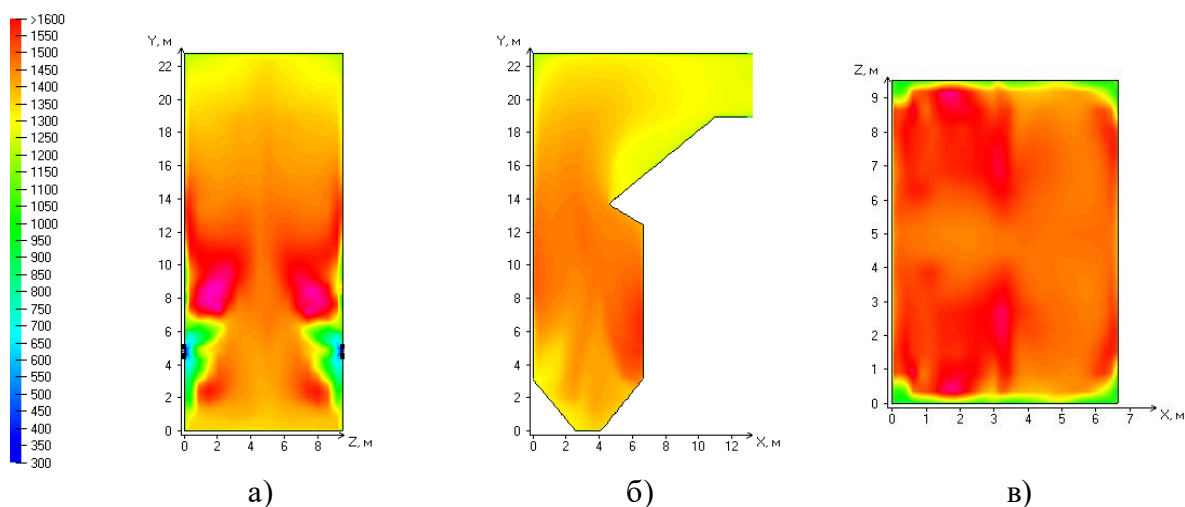


Рисунок VI.15 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 60:40)

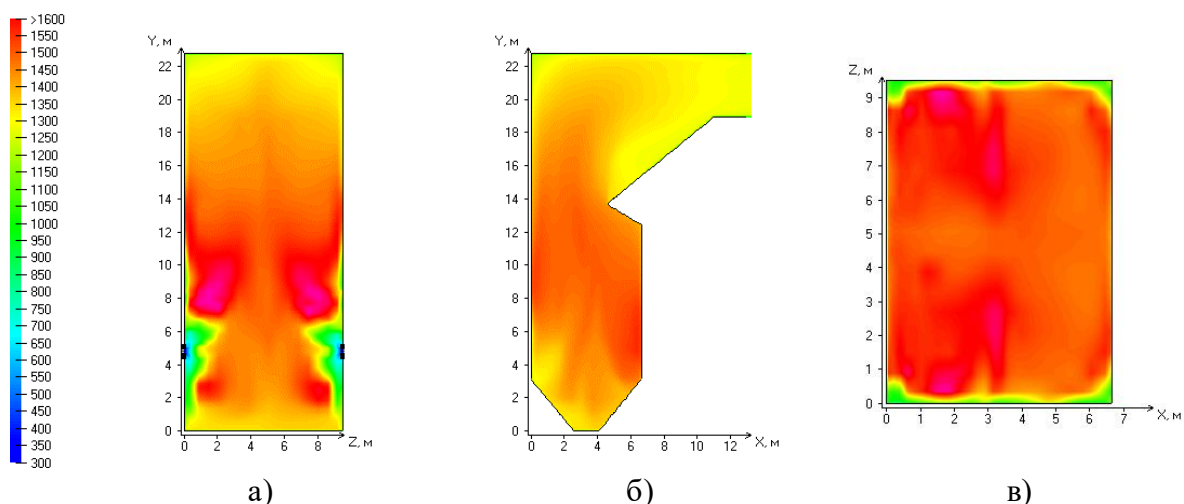


Рисунок VI.16 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 70:30)

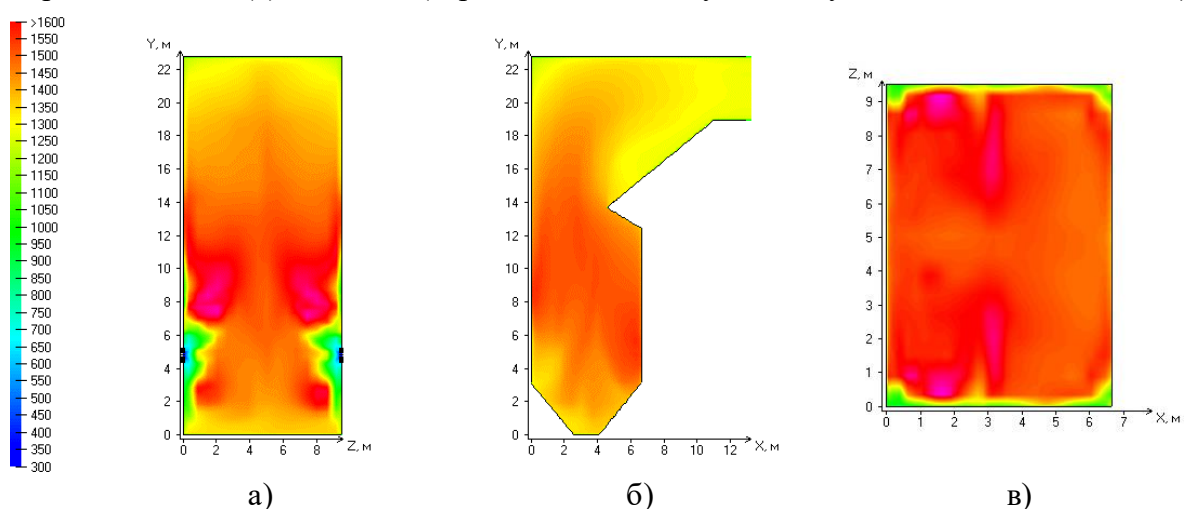


Рисунок VI.17 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 80:20)

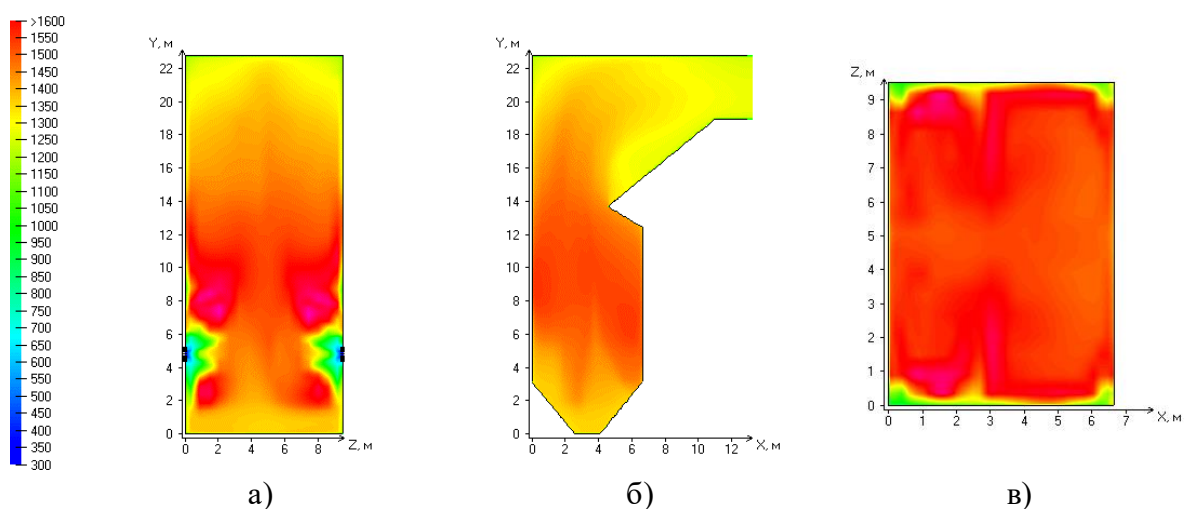


Рисунок VI.18 – Распределение температур (К) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

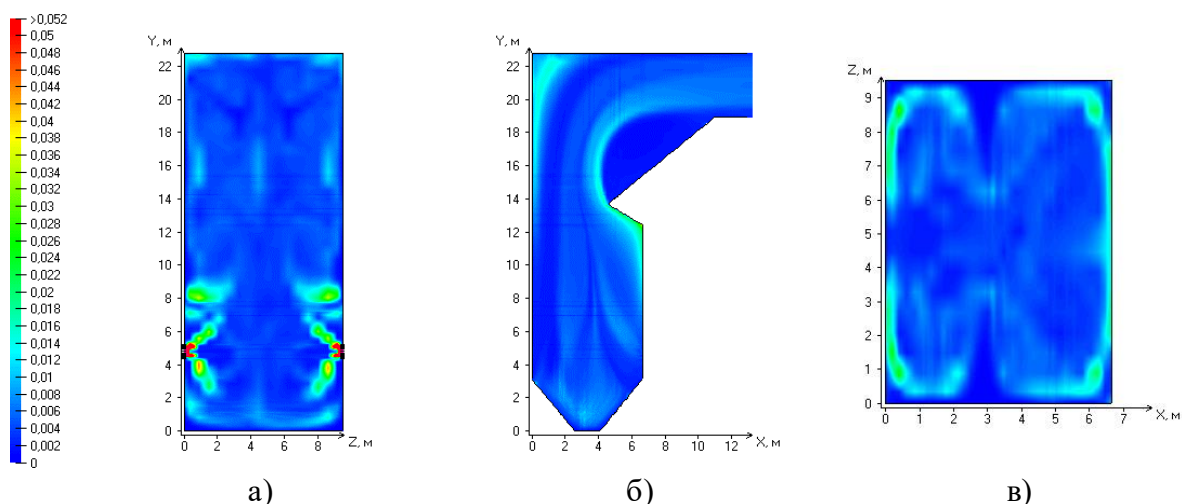


Рисунок VI.19 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 10:90)

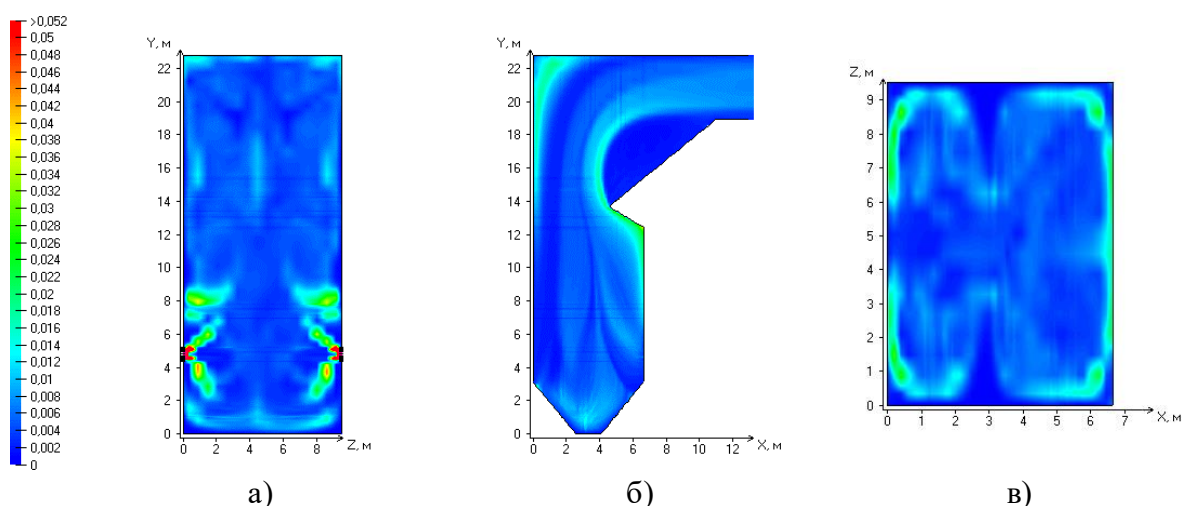


Рисунок VI.20 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 20:80)

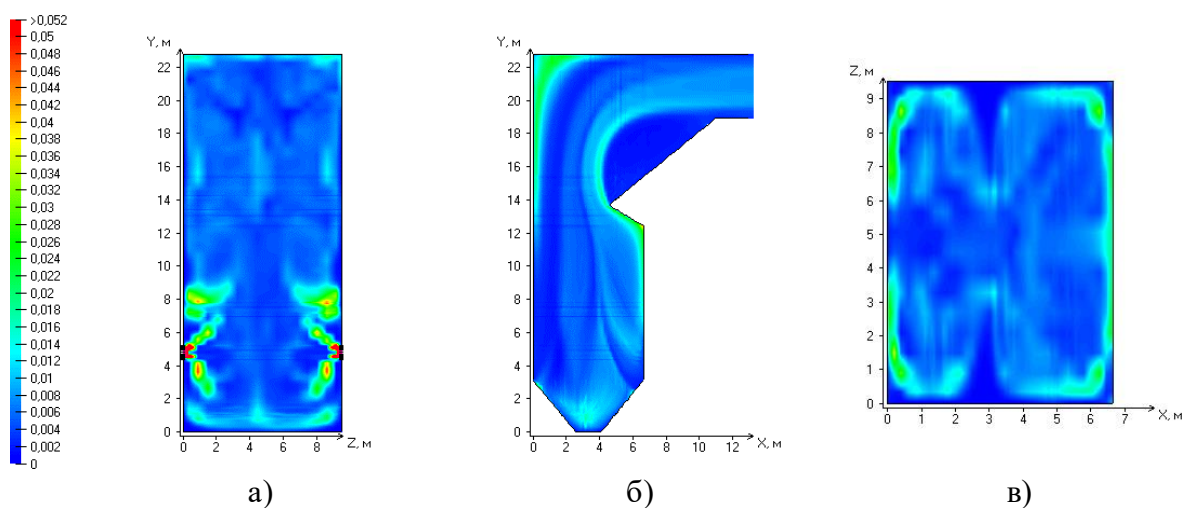


Рисунок VI.21 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 30:70)

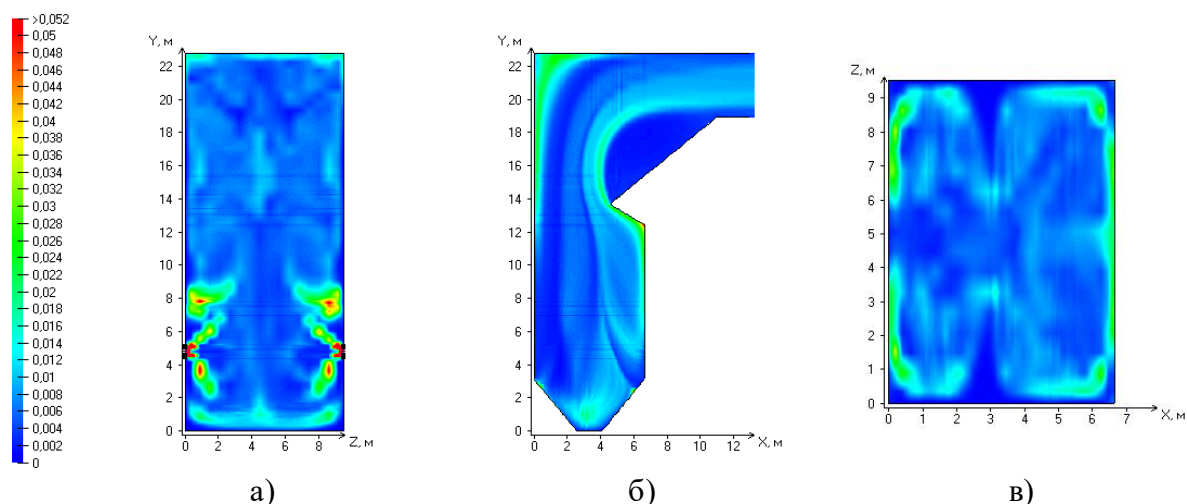


Рисунок VI.22 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 40:60)

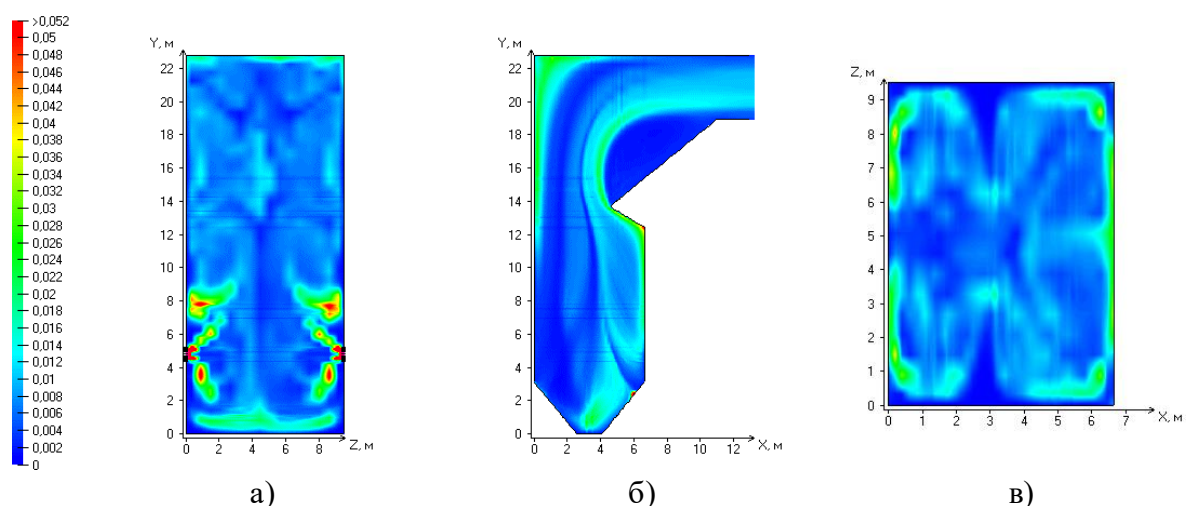


Рисунок VI.23 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 50:50)

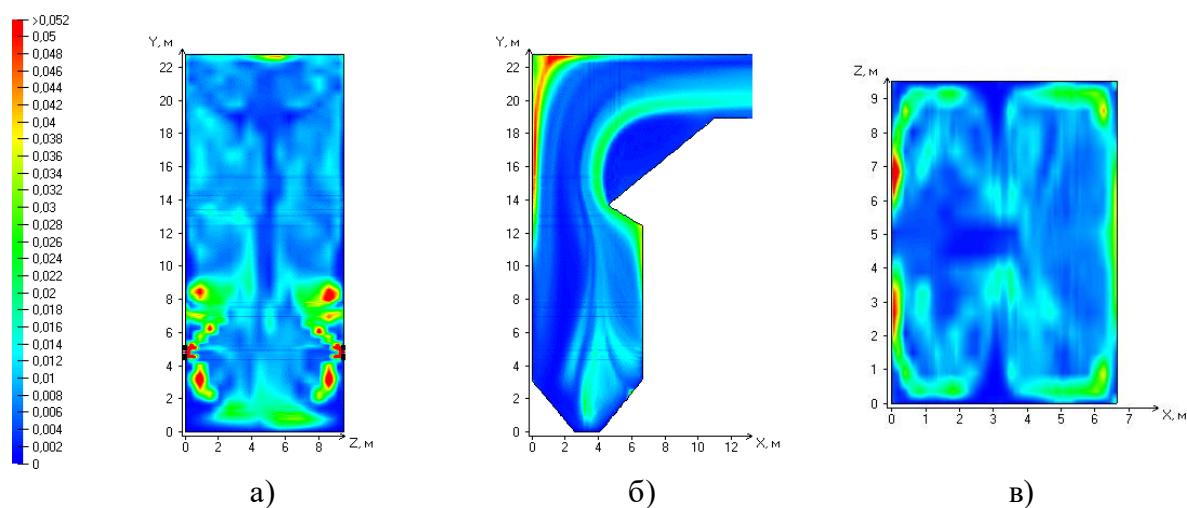


Рисунок VI.24 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 60:40)

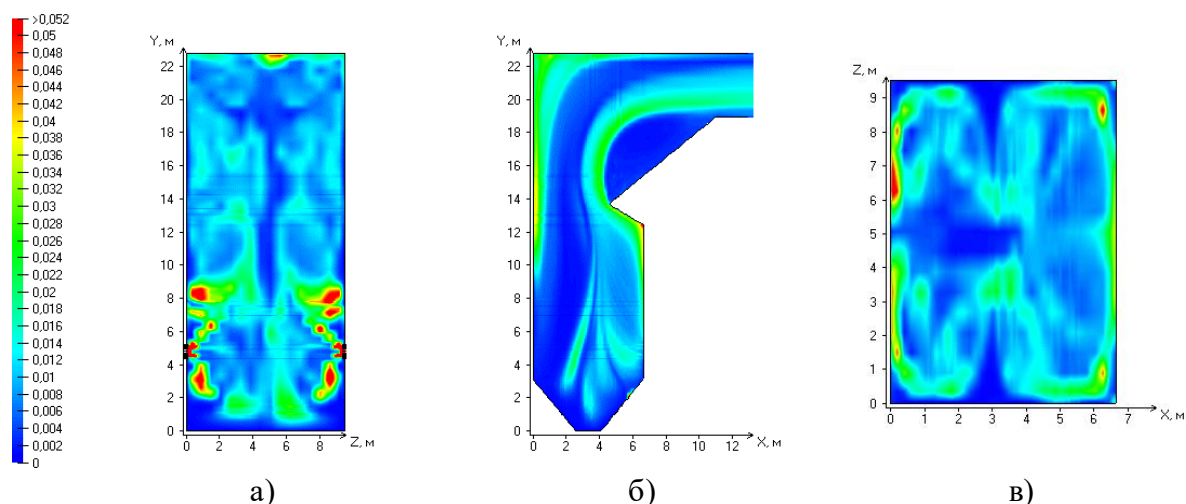


Рисунок VI.25 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 70:30)

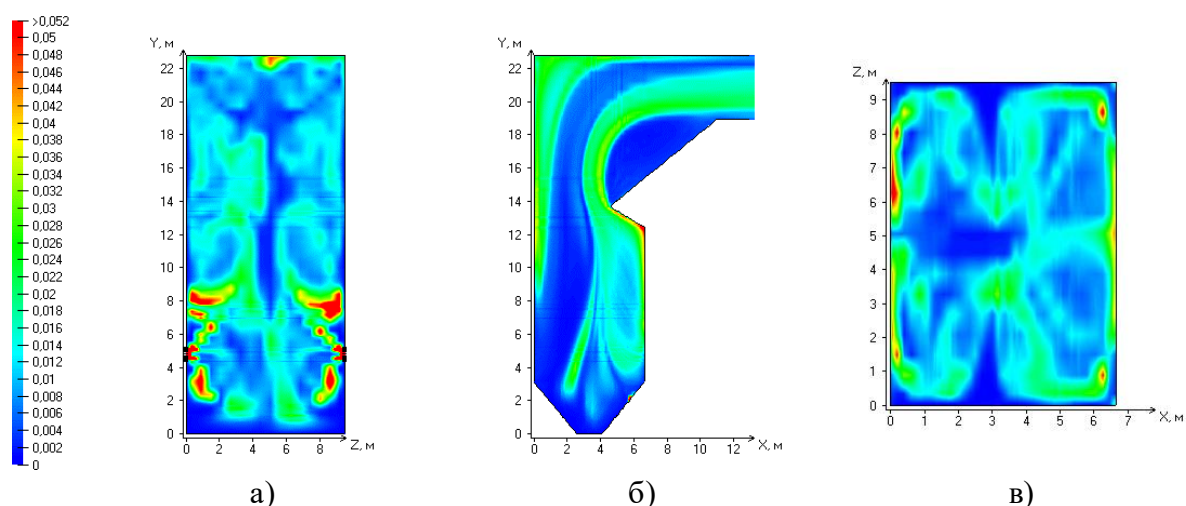


Рисунок VI.26 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 80:20)

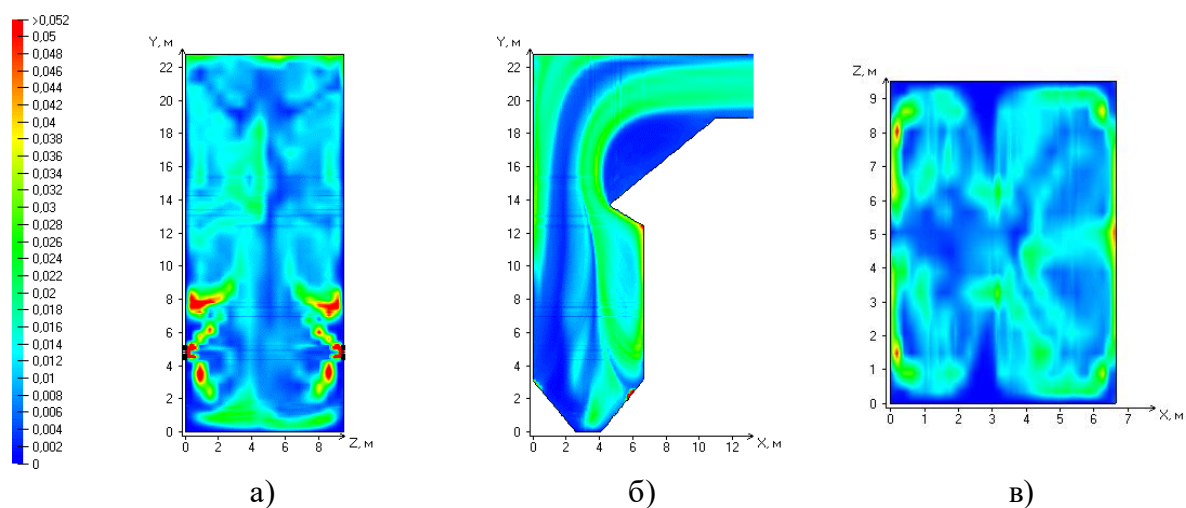


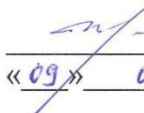
Рисунок VI.27 – Распределение дисперсных частиц (кг/кг) в поперечном (а), продольном (б), горизонтальном (в) сечениях (вариант – смесь полукокса и угля в соотношении 90:10)

Приложение VII. Материалы по использованию результатов



пр. Кирова, 36, г. Томск, 634041, Россия
Телефон: +7 (3822) 55-46-45 Факс: +7 (3822) 43-26-47
Телефон: +7 (3822) 55-46-45

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель генерального директора –
технический директор

 С.Ю. Кузьмин
«09» 02 2024.

ПРОТОКОЛ согласования намерений

По итогам обсуждения основных результатов диссертационной работы Воронцовой Елены Сергеевны «Обоснование условий сжигания угля Таловского месторождения Томской области в топках котлов на основе численного моделирования» участники совещания, представители АО «Томская генерация» и Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета пришли к констатации нижеследующих намерений в рамках продолжения сотрудничества:

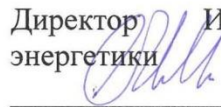
- АО «Томская генерация» принимает материалы диссертационной работы в качестве справочно-информационной базы при возможном рассмотрении вариантов замещения привозного твердого топлива для Томской ГРЭС-2;
- Инженерная школа энергетики Томского политехнического университета будет вести на регулярной основе, в том числе в рамках учебного процесса и в ходе выпускных квалификационных работ, тепловые и другие расчеты по тематике перевода котлов Томской ГРЭС-2 на сжигание угля Таловского месторождения.

От АО «Томская генерация»:

Заместитель технического директора

 Р.Е. Боберъ

От Томского политехнического
университета:

Директор Инженерной школы
энергетики  А.С. Матвеев

АДМИНИСТРАЦИЯ
ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

ДЕПАРТАМЕНТ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И
ЭНЕРГЕТИКИ

пр. Кирова, д. 41, г. Томск, 634041
тел. (382 2) 555-019, факс (382 2) 555-192
e-mail: d-energy@tomsk.gov.ru

Воронцовой ЕС

04.07.2014 № 8/4
на № _____ от _____

Об использовании результатов
диссертационной работы

Уважаемая Елена Сергеевна!

Рассмотрев Вашу диссертационную работу «Обоснование условий сжигания угля Таловского месторождения Томской области в топках котлов на основе численного моделирования», сообщаем, что результаты вышеуказанной работы представляют практический интерес и могут быть полезны при планировании развития топливно-энергетического баланса Томской области в части использования местных топлив. Представленные результаты служат информационной базой для разработки проектных решений, заключений и рекомендаций при рассмотрении вопросов по использованию угля Таловского месторождения как альтернативного энергетического топлива.

И.о. начальника департамента



А.В. Шевченко



Белоусов К.А.
(3822) 555-126
belousovka@tomsk.gov.ru

TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШЭ ТПУ

Кандидат технических наук, доцент

Матвеев А.С.
«12» 03 2024 г.

СПРАВКА

**об использовании результатов диссертационной работы
Воронцовой Елены Сергеевны**

**«Обоснование условий сжигания угля Таловского месторождения Томской
области в топках котлов на основе численного моделирования»**

Настоящая справка подтверждает, что примененные в исследованиях методические подходы используются в учебном процессе по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете, а именно в лабораторном практикуме по дисциплине «Современные проблемы науки и производства в энергетическом машиностроении». В сопровождение дисциплины выпущены методические указания к выполнению лабораторных работ «Тепловой расчет паровых котлов в отраслевой программе «ТРАКТ».

Также методический подход, экспериментальные зависимости, аналитические зависимости использованы для подготовки следующих магистерских диссертаций:

1. «Моделирование параметров топочной среды для факельного сжигания низкосортного угля в широком диапазоне влажности», выполнил – магистрант Семушкин Виталий Петрович (группа 5ВМ4А, 2016 г.);
2. «Исследование параметров энергетического котла при совместном сжигании природного газа с низкосортным топливом», выполнил – магистрант Романенко Александр Сергеевич (группа 5ВМ6А, 2018 г.).

Заведующий кафедрой – руководитель НОЦ
И.Н. Бутакова на правах кафедры ИШЭ ТПУ
д.т.н., профессор

А.С. Заворин

Руководитель ООП «Проектирование и
диагностирование энергетических агрегатов»
направления подготовки магистров
13.04.03 «Энергетическое машиностроение»,
к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

А.В. Гиль