

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Кузнецов Виктор Александрович

**Математическое моделирование процессов тепло- и
массообмена для перспективных технологий энергетического
использования угольного топлива**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая
теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Дектерев Александр Анатольевич

Красноярск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1 Угольное топливо.....	13
1.2 Традиционные способы переработки угольного топлива	15
1.3 Технология поточной газификации твердых топлив	20
1.4 Технология сжигания твердого топлива в виде водоугольной суспензии	28
Выводы по главе 1.....	36
ГЛАВА 2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА.....	37
2.1 Модель газовой фазы.....	38
2.2 Модель турбулентности	39
2.3 Модель радиации.....	40
2.4 Модель движения угольных частиц.....	41
2.5 Модель испарения влаги и выхода летучих веществ	43
2.6 Модель горения газового топлива.....	46
2.7 Модель горение и газификации твёрдого остатка.....	47
2.8 Модель процессов воспламенения и горения водоугольного топлива .	48
2.9 Модель образования оксидов азота.....	50
2.10 Численные алгоритмы	51
Выводы по главе 2.....	52
ГЛАВА 3 ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	53
3.1 Горение пылеугольного факела при наличии закрутки на огневом стенде мощностью 2,4 МВт.....	53
3.2 Конверсия угольной пыли в газификаторе поточного типа	70
3.3 Сжигание водоугольного топлива на огневом стенде	76
Выводы по главе 3.....	84

ГЛАВА 4 ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБАХ ПЕРЕРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	85
4.1 Пути усовершенствования перспективного поточного газогенератора на проектном топливе	85
4.2 Численное исследование сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением	94
Выводы по главе 4.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ЗАО «КОРПОРАЦИЯ ПРОТЭН»	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Уголь является наиболее распространенным видом топлива. По оценкам запасов угля в мире хватит на 200-250 лет [1]. Его можно найти на всех континентах, во многих странах. Большая часть угля используется на электростанциях. Электростанции на угольном топливе производят почти 40% мировой электроэнергии. Однако по данным Международного энергетического агентства (IEA) спрос на уголь в энергетике в последние годы падает [2]. По прогнозам специалистов, к 2040 г. доля угля в производстве электроэнергии снизится до 31%, хотя и будет по-прежнему занимать ведущее место. Основной причиной снижения интереса к углю является тот факт, что уголь считается самым неэкологическим энергоносителем на всех этапах его добычи, приготовления, сжигания.

Таким образом, на энергетическом фронте всего мира возникают противоречия, где сталкиваются экономические и экологические проблемы, связанные с использованием в энергетике угля. Единственным выходом из этого противоречия является совершенствование технологии добычи и применения угля. Энергетика на данном этапе требует применения инновационных, энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий переработки угольного топлива.

В сравнении с традиционными способами сжигания твердого топлива, газификация угля является одним из самых перспективных направлений экологически чистой переработки угля [3,4]. Использование технологии газификации угля имеет стратегическое значение, в том числе и для России, располагающей более чем 20 % мировых запасов угля. Однако в России в настоящее время нет ни одной промышленной электростанции с применением технологии газификации угля. Технология парогазовых установок (ПГУ) с внутрицикловой газификацией (ВЦГ) топлива являются эффективным направлением в энергетике за счет сочетания газовых и паровых турбин.

Таким образом, актуальным является исследование и разработка оригинального решения газификатора для ПГУ-ВЦГ.

Еще одним путем обеспечения масштабного экологически чистого вовлечения угля, по крайней мере, в малой энергетике, может быть использование технологии капельно-факельного сжигания угля в виде водоугольной суспензии (ВУС), или водоугольного топлива (ВУТ), вместо традиционного слоевого сжигания [5-8]. Технология сжигания угля в виде ВУТ является одной из самых экологически чистых, экономически выгодных и перспективных. Это связано с более полным выгоранием углерода топлива при использовании ВУТ по сравнению с другими технологиями и снижением вредных газообразных выбросов. Эта технология позволяет использовать для приготовления ВУТ низкокалорийные и тощие угли и отходы углеобогащения, а также создавать на их основе композиционные водо-торфоугольные, водо-нефте-угольные и другие топливные составы.

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

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», утвержденной постановлением Правительства Российской

Федерации от 28 ноября 2013 г. № 1096, по Соглашениям Минобрнауки РФ и Института теплофизики им С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) от 9 сентября 2016 г. № 3/2) «Разработка технологий, направленных на повышение энергоэффективности факельного сжигания низкосортных углей и отходов их переработки в энергетических котлах с использованием механохимической и электрохимической активации углей», ПНИЭР RFMEFI60716X0150.

Цель работы.

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

Основные задачи.

Анализ перспективных технологий энергетического использования угольного топлива.

Разработка методов математического моделирования процессов газификации и горения измельченного угольного топлива для перспективных нетрадиционных схем переработки.

Тестирование и адаптация математической модели на задачах расчета горения пылеугольного топлива, ВУТ и газификации угольного топлива в потоке.

Моделирование и оптимизация процессов газификации измельченного угольного топлива в газификаторе поточного типа. Исследование влияния конструктивных и режимных параметров на состав и химический КПД генераторного газа.

Численное исследование процессов при сжигании ВУТ в промышленном водогрейном котле в режимах твердого и жидкого шлакоудаления. Анализ влияния температуры и расхода воздуха на режимы горения, теплообмен и величину образования выбросов NOx.

Научная новизна работы.

Разработана математическая модель и метод расчета физико-химических процессов при горении и газификации измельченного угольного топлива в потоке для перспективных нетрадиционных схем энергетического использования угля.

Впервые получены результаты численного исследования и оптимизации перспективного двухстадийного реактора конверсии твердого топлива для угольной ПГУ, основанного на технологии EAGLE с использованием Кузнецкого угля, воздушного дутья, присадки водяного пара и производительностью до 1700 т/день.

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость работы.

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

Результаты численных исследований использовались в практической деятельности ЗАО «Корпорация ПРОТЭН» при расчете конструктивных

изменений и способов организации топочного процесса в котле на водоугольном топливе (Приложение А).

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

Методы исследования.

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

Положения, выносимые на защиту.

Математическая модель и метод расчета процессов горения и газификации измельченного угольного топлива для нетрадиционных схем переработки, основанная на: RANS моделях турбулентности; многоступенчатых механизмах химического реагирования; моделях сложного теплообмена; Лагранжевом описании движения и реагирования частиц угля и капель ВУТ.

Результаты численного исследования и оптимизации двухстадийного реактора конверсии твердого топлива: увеличение α угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов приводит к повышению химического КПД с 84.7 до 86 %; увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг.пара/кг.угля приводит к увеличению химического КПД процесса газификации с 83 до 87 % и снижению температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К; снижение доли угольной пыли в нижний ярус камеры газификации с 25 до 15 % от общего количества позволяет уменьшить

область высокотемпературного горения при незначительном изменении состава газов и химического КПД.

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

Достоверность результатов обеспечивается:

тестированием программного комплекса, разрабатываемого в научном коллективе автора, для широкого круга задач;

проведением тестирования математической модели моделирования на задачах расчета горения и газификации измельченного угольного топлива в потоке;

сравнением результатов расчётов с литературными экспериментальными данными и результатами испытаний действующих котлов.

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

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, 15-17 октября 2014 года; международной научной конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: проспект Свободный», Красноярск, 15-25 апреля 2015 года; IV Всероссийской научно-практической конференции студентов «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», Екатеринбург, 26-27 марта 2015 года; XIII научной международной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта, 21-27 сентября 2015 года; международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: проспект Свободный», Красноярск, 15-22 апреля 2016 года; VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», Томск, 26-28 октября 2016 года; всероссийской научной конференции "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, 19-25 сентября 2016 года; XIV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 22-25 ноября 2016 года; XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках», Санкт-Петербург, 22-26 мая 2017 года; Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXIII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 6-8 июня 2017 года; Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», посвященная 85-летию академика А.К. Реброва, Новосибирск, 27-30 августа 2018 года.

Публикации.

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

Структура и объём диссертации.

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

Содержание работы.

В первой главе приводится обзор исследований, относящихся к проблеме использования угольного топлива в тепловой энергетике, в частности, технологии его переработки. Дается пояснение основных понятий и описание рассматриваемых процессов.

В главе рассматриваются процессы переработки угольного топлива традиционными способами, и сравниваются с нетрадиционными. Приводится описание перспективных технологий нетрадиционной переработки угольного топлива. Перечисляются предлагаемые в различных работах эффективные и экологически безопасные технологии переработки угольного топлива.

Во второй главе излагается математическая модель, используемая в работе, которая включает в себя дифференциальные уравнения модели для газовой фазы, методы замыкания уравнений турбулентного течения, модели движения угольной частицы, модели выхода летучих веществ, модели горения и газификации угля, а также модель процессов горения водоугольного топлива.

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

В четвертой главе приводятся результаты численного моделирования процессов горения и газификации угольного топлива при нетрадиционных

способах переработки угля. Показаны пути усовершенствования перспективного поточного газогенератора на проектной топливе. Показаны результаты моделирования сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением. Представлено исследование влияния режимных параметров на процесс образования оксидов азота при сжигании ВУТ в топке котла.

В заключении формулируются основные результаты работы.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Угольное топливо

Мировые запасы угля в несколько раз превышают запасы других видов топлива, по оценкам, запасов угля хватит на 200-250 лет. Это солидный срок, учитывая, что запасы нефти и газа должны истощиться гораздо раньше. Уголь можно найти на всех континентах, во многих странах. Поэтому развитие угольной промышленности в мировом масштабе — это перспективное направление. Большая часть угля используется на электростанциях. Электростанции на угольном топливе производят почти 40% мировой электроэнергии. При этом основными потребителями ресурса являются электроэнергетика и металлургия.

Мировой лидер в производстве угля – Китай, где в 2014 г. добыто более 3,7 млрд. тон. США находятся на втором месте в мире по объему добычи угля, где в 2014 г. произведено 916,2 млн. т. угля, на третьем – Индия (668,4 млн. т.), на четвертом – Австралия (491,2 млн. т.), на пятом – Индонезия (470,8 млн. т.). В России, занимающей шестое место по добыче угля в мире, обладающей 5,5% мировых запасов угля (около 200 млрд. т.), в 2014 г. произведено 4,4% общемирового объема добываемого угля. В 2015 г. в России добыто 373,3 млн. т. [9, 10].

Классификация твердого топлива проводится по таким показателям как степень разложения, теплота сгорания, выход летучей ее части, влажность [11-13]. В России и странах СНГ в зависимости от степени метаморфизма (углефикации) различают торф, бурые угли, каменные угли, антрациты и графиты. Торф характеризуется высоким содержанием летучих компонентов 40-60%. К бурым углям относят угли с высшей теплотой сгорания < 4000 ккал/кг. К каменным относят угли с теплотой сгорания > 4000 ккал/кг и они характеризуются высоким уровнем содержания углерода (74-92%). Антрациты характеризуются низким выходом летучих компонентов (< 10%),

высокой температурой сгорания, высоким содержанием углерода (89-98%). В таблицах 1.1 и 1.2 представлен химический и технический состав основных типов твердых органических топлив [10-12].

Таблица 1.1 – Технический состав твердого органического топлива

Элементы	Тип твердого органического топлива				
	Древесина	Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
W^r , %	30-50	25-50	25-35	5-12	5-8
A^d , %	0,5	5-10	15-20	20-56	25-35
V^{daf} , %	70	40-65	35-50	15-40	4-10
Q^r , (ккал/кг)	1800	2100	3000-3800	4000-5000	4300-6200

Таблица 1.2 – Элементный состав твердого органического топлива

Элементы	Тип твердого органического топлива				
	Древесина	Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
C, %	49,7	50-60	63-77	74-92	89-98
O, %	43,2	31-40	16-28	2-16	до 1
H, %	6,2	4,5-6,5	4,0-6,3	3,7-5,9	2,-3
N, %	0,9	0,8-2,9	0,7-1,4	1-2,5	до 1

Помимо основных элементов, таких как углерод, водород и кислород - угли содержат азот и серу. Содержание азота в углях колеблется от 0,5 до 2,5%, серы от 0,2 до 10%. Также, в углях присутствуют минеральные компоненты. Поэтому при сжигании в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, оксидов серы и азота, соединений фтора, легколетучие металлы, а также органические вещества [14].

1.2 Традиционные способы переработки угольного топлива

В теплоэнергетических установках традиционно выделяют три вида сжигания твёрдых топлив: факельное (пылевидное), слоевое и вихревое [15-17]. На рисунке 1.1 представлена схема, где отображены разновидности способов сжигания твердого топлива. В зависимости от мощности котла, марки угля и условий работы котельного агрегата выбирается наиболее подходящий способ сжигания твёрдого топлива.

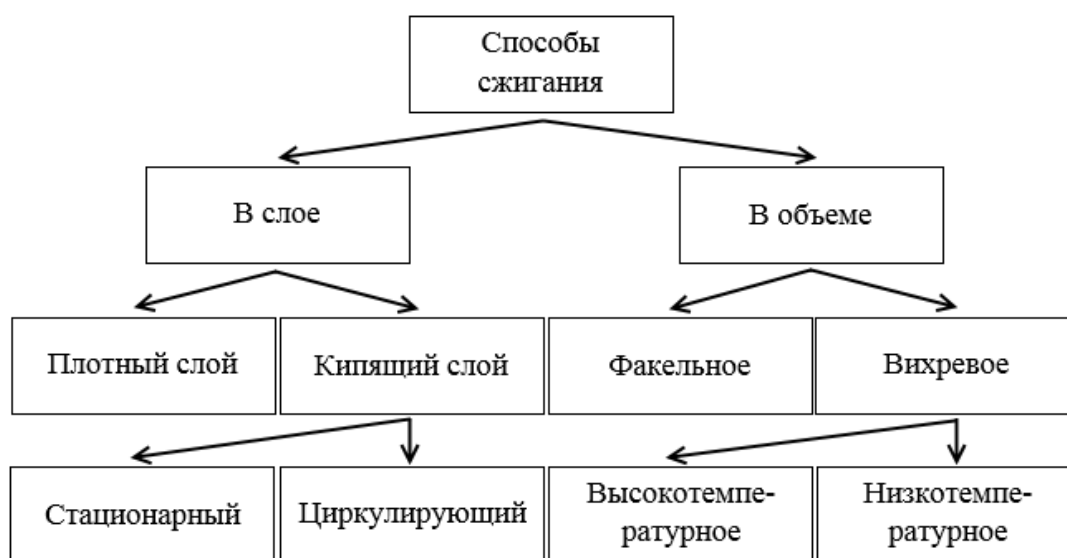


Рисунок 1.1 – Способы сжигания твердого органического топлива

Сжигание в слое

При слоевом сжигании уголь засыпается определённой толщиной на распределительную колосниковую решетку, поджигается и продувается воздухом. Основное горение происходит в слое, образованном кусками топлива. Над слоем в объеме топочной камеры горят летучие вещества, выделяющиеся из топлива в процессе его прогрева, а также догорают мелкие частицы, выносимые из слоя потоком воздуха и продуктов сгорания. Поскольку в слой всегда загружается полидисперсное топливо, то это приводит к выносу большого количества более мелких частиц топлива,

которые не успевают догореть в объеме топки, что вызывает увеличение потерь теплоты с механическим недожогом и уменьшает эффективность данного метода сжигания [15].

Из преимуществ слоевого сжигания можно отметить простоту эксплуатации и отсутствие системы пылеприготовления. Но данный способ сжигания угольного топлива имеет существенные недостатки: низкий КПД за счет повышенной потери тепла с механическим недожогом; выбросы вредных веществ (пыль, оксиды серы и азота); проблематичность сжигания топлива с очень высокой зольностью и влажностью.

Сжигание в кипящем слое

Простейшая топка с кипящим слоем имеет много общих конструктивных элементов со слоевой топкой. Принципиальное отличие заключается в интенсивном перемешивании частиц, что обеспечивает постоянство температуры по всему объёму кипящего слоя. *Кипящий* слой создаётся в тех случаях, когда некоторое количество твёрдых частиц находится под воздействием восходящего потока газа, благодаря чему твёрдые частицы находятся в парящем состоянии. Для поддержания температуры кипящего слоя в пределах 850-950 °С в топку подаются известняк, песок, гранулированная зола или другой зернистый (инертный) материал (в соотношении примерно 1:1).

Вторым поколением развития технологии сжигания в кипящем слое является топка с циркулирующим кипящим слоем. Отличие заключается в том, что за топкой устанавливается циклон, в котором все недогоревшие частицы улавливаются и возвращаются обратно в топку. Топки с циркулирующим кипящим слоем отличаются более высокой степенью выгорания топлива (примерно 98÷99 % против 90÷95 % у котлов со стационарным кипящим слоем).

Из основных преимуществ топок с кипящим слоем стоит отметить: длительное пребывание частиц в слое, что позволяет сжигать уголь с

повышенной зольностью и отходы производства; добавка известняка в слой связывает серу топлива с зольным остатком, что уменьшает выбросы сернистого ангидрида с дымовыми газами в атмосферу; низкие температуры в слое (800-950°C) обеспечивают отсутствие термических оксидов азота, что приводит к сокращению выбросов оксидов азота в атмосферу.

Многолетний опыт эксплуатации котлов с кипящим слоем показал и их явные недостатки [15]:

- шлакование слоя при увеличении температуры кипящего слоя выше 900-950°C, что является аварийной ситуацией и вызывает необходимость остановки котла;
- неустойчивое горение при понижении температуры слоя до 750°C;
- истирание частиц твёрдого инертного материала и унос их в атмосферу;
- повышенный расход электроэнергии на привод высоконапорных вентиляторов для подачи воздуха в зону горения (создания кипящего слоя).

Факельное сжигание

При *факельном* сжигании топливо в пылевидном состоянии вдувается в камеру сгорания через горелки вместе с необходимым для горения окислителем. В зоне активного реагирования совершается процесс горения с образованием факела горящего топлива, заполняющего объем топочной камеры. Температура в зоне активного горения порядка 1300-1500 °C. Продолжительность пребывания частиц топлива в зоне активного горения от 0,5 до 2 с. Для уменьшения механического недожога твёрдое топливо перед поступлением в топку предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного состояния.

При камерном сжигании угольной пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе её прогрева и термического разложения, сгорают в факеле, образуя с воздухом гомогенную смесь, что способствует разогреву твёрдых частиц (кокса) до температуры воспламенения, а также стабилизирует

факел. При сгорании летучих расходуется, главным образом, кислород первичного воздуха. Горение летучих ускоряет прогрев коксовых частиц и их воспламенение. Горение же коксовых частиц происходит, в основном, за счёт кислорода вторичного воздуха.

В настоящее время в промышленной теплоэнергетике основным является факельное сжигание, когда в топочную камеру через прямоточные или вихревые горелки подаются потоки топлива и воздуха или топливовоздушной смеси (а иногда – ещё и газы рециркуляции). Реже применяются циклонно-вихревой способ, низкотемпературный вихрь и кипящий слой.

Экологические аспекты

При сжигании угольного топлива на традиционных тепловых электростанциях одной из основных проблем является выброс загрязняющих веществ в атмосферу в виде большого количества диоксида углерода, оксидов серы, оксидов азота, соединений фтора и легколетучих металлов [14,18-21]. В результате усиливается негативное воздействие на окружающую среду, ухудшается экологическая ситуация, что обуславливает рост заболеваемости и смертности населения.

В таблице 1.3, 1.4 приведены валовые и удельные выбросы загрязняющих веществ ТЭС в России за период с 1990 года по 2015 год. Видно, что за последние 25 лет валовый выброс загрязняющих веществ ТЭС отрасли сократился в 3 раза (с 7.15 млн. т в 1990 г. до 2.35 млн.т в 2015 г.) за счет внедрения комплекса технологических мер подавления оксидов азота на котлах ТЭС, увеличения доли сжигания экологически чистого газообразного топлива на ТЭС, внедрения на ТЭС современного золоулавливающего оборудования, широкого внедрения комбинированной парогазовой технологии производства энергии [22].

Таблица 1.3 – Валовые выбросы загрязняющих веществ, млн. т [22]

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Выбросы загрязняющих веществ	7,15	4,6	3,40	3,02	2,92	2,71	2,79	2,50	2,45	2,35
в том числе:										
Зола твердого топлива	2,42	1,38	1,02	0,92	0,90	0,80	0,77	0,69	0,66	0,59
Диоксид серы	3,12	2,05	1,44	1,19	1,12	1,04	1,12	0,99	0,97	0,97
Оксиды азота	1,61	1,17	0,94	0,91	0,89	0,86	0,91	0,82	0,82	0,8

Таблица 1.4 – Удельные выбросы загрязняющих веществ ТЭС, кг/т условного топлива (у.т.) [22]

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Зола твердого топлива	24,23	18,43	14,1	13,11	11,63	11,42	10,23	10,2	9,74	8,43
Диоксид серы	21,76	19,95	16,5	13,66	13,63	14,11	14,45	14,45	14,03	13,49
Оксиды азота	4,63	4,36	3,87	3,23	3,35	3,25	3,36	3,14	3,25	3,24

За 2015 г. основная доля валовых выбросов загрязняющих веществ (83 %) в атмосферу от суммарных выбросов ТЭС России осуществляется за счет угольных ТЭС. При этом большая масса валовых выбросов загрязняющих веществ (свыше 70 %) приходится на крупные угольные и мазутные ТЭС установленной электрической мощностью более 250 МВт, доля которых составляет свыше 90 % установленной мощности всех угольных и мазутных ТЭС России.

Проведенные оценки применяемых в российской энергетике видов энергетических топлив показали, что масса загрязняющих веществ, образующихся при сжигании 1 тонны условного топлива (т у.т.) газа,

составляет около 5 кг/т у.т., а при сжигании 1 т у.т. жидких топлив и угля – в 60 раз больше, около 300 кг/т у.т.. Таким образом, приведенные данные показывают, что значительное негативное воздействие на окружающую среду оказывают угольные и мазутные ТЭС.

1.3 Технология поточной газификации твердых топлив

Благодаря тому, что уголь является универсальным топливом (поскольку его можно сжечь, подвергнуть пиролизу, газифицировать и т.д.), его переработка может осуществляться более экологически безопасным и эффективным методом.

Газификация угольного топлива является одним из самых перспективных направлений переработки угля [3,4]. Существует ряд разработанных методов газификации, которые позволяют перерабатывать твердое топливо в генераторный газ с различной калорийностью. Основные методы, которые на данный момент находятся в процессе эксплуатации: метод «Лурги», метод «Винклера», метод «Копперс-Тотцек» [15].

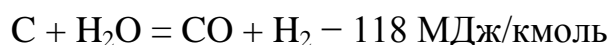
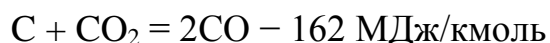
В результате газификации угольного топлива получается генераторный газ, состав которого представлен в общем случае следующими горючими компонентами: CO , H_2 , CH_4 и др., и балластными компонентами: N_2 , CO_2 , H_2O и т.д. Теплота сгорания генераторных газов зависит от технологии переработки и находится в диапазоне от 4 до 20 МДж/м³.

Физико-химические процессы при газификации

В основе газификации лежит неполное горение топлива (при недостатке окислителя) или реагирование углерода с углекислотой или водяным паром с целью получения горючих газов. Если процесс поточной газификации угольного топлива условно поделить на две стадии, то в первом этапе происходит неполное горение угля при недостатке окислителя. Далее во второй стадии продукты горения, которые содержат в большей степени CO_2 и

H_2O , начинают участвовать в восстановительных реакциях. Углекислота и водяной пар вступают в реакцию с оставшимся углеродом кокса, нагретого за счет тепла, которое выделилось в первой стадии. В результате образуется CO и H_2 , которые смешиваются с другими газами (N_2 , CO и т.д.). Приведенные выше стадии газификации являются достаточно условными и упрощенными, потому что процессы в них идут параллельно и могут накладываться друг на друга, в реальности добавляются процессы выхода и горения летучих компонентов, участие их в реакциях газификации.

В зависимости от состава газов дутья, основные гетерогенные восстановительные реакции могут быть следующими:



На практике при использовании в качестве дутья смеси водяного пара с воздухом получают генераторный газ с составом: H_2 – 15 ... 20 %; CH_4 – до 5 %; CO – 25 ... 30 %; CO_2 – до 5 %; N_2 – 35 ... 55 %. При парокислородном дутье состав генераторного газа: H_2 – до 40 %; CH_4 – до 5 %; CO – 30 ... 40 %; CO_2 – до 5 %; N_2 – 4 ... 20 %.

Существует значительное количество различных высокоэффективных технологий газификации топлива. При определенных условиях использование генераторного газа, полученного из угля, оказывается более экологически безопасным решением, чем сжигание угля как топлива напрямую.

Обзор исследований технологий газификации угля

Сегодня известно множество эффективных решений в области энергетики. Одним из наиболее распространенных технических решений для выработки электроэнергии является использование газотурбинных установок

(ГТУ) для привода электрических генераторов. В качестве источника тепла для нагрева рабочего тела в ГТУ используют энергию, выделяющуюся при сгорании жидкого или газообразного топлива. В качестве последнего обычно применяют природный газ. Однако ситуация на мировом рынке энергоносителей и национальных рынках ряда стран вынуждает уже сегодня искать альтернативные виды топлив. В качестве такового может быть использован генераторный газ, произведенный из угольного топлива.

В частности, ПГУ с внутрицикловой газификацией топлива (ПГУ-ВЦГ или IGCC (integrated gasification combined cycle)) является универсальным направлением, так как при высоком уровне энергоэффективности открывает возможности комплексного решения экологических проблем. За счет сочетания газовых турбин и паровых турбин достигается повышение тепловой эффективности [23,24]. В 2013 году после завершения проверочных испытаний в Японии ввели в эксплуатацию первую станцию IGCC [25,26].

Менее подходящей технологией для ПГУ-ВЦГ является газификация и полукоксование угля в плотном слое. Из современных разработок это - технология окислительного пиролиза брикетированного топлива, нестационарного полукоксования по методу «обратной тепловой волны», разработанная ООО «Карбоника» [27]. В ее основу положен принцип автотермической частичной газификации угля на воздушном дутье с использованием эффекта «обратной тепловой волны» в слое угля. В результате газификации производится кокс (полукокс) с высокой калорийностью и реакционной способностью, низким выходом летучих веществ. Такой продукт используется как металлургическое и технологическое топливо, бездымное коммунально-бытовое топливо, карбюратор и углеродный восстановитель для металлургии. Полукокс из бурого угля обладает, кроме перечисленных качеств, большой удельной поверхностью (500 м²/г и выше) и адсорбционной активностью. Основными преимуществами данной технологии являются: экологическая безопасность и безотходность, низкие капитальные затраты, возможность перерабатывать

угли различных марок. Данная технология реализована в Красноярске в опытно-промышленном масштабе 30 тыс. тон угля в год, на протяжении 5 лет отработаны все основные технические и технологические решения, проведены исследования процесса на различных углях и наработаны промышленные и опытные партии продукта, прошедшие испытания на ряде предприятий России и за рубежом.

Исследованиями технологии паровой бескислородной газификации твердого топлива занимаются в Кузбасском государственном техническом университете [28]. В работе изучают влияние температуры и вида сырья при бескислородной газификации углеродсодержащих веществ угледобывающей и лесоперерабатывающей промышленности с потоком перегретого водяного пара при атмосферном давлении на характеристики получаемого синтез-газа для развития новых подходов в создании полигенерирующих систем, обеспечивающих производство тепловой, электрической энергии и синтез-газа. В основном проводят экспериментальные исследования в данной области, также создана математическая модель процесса паровой газификации. Данная модель является одномерной и позволяет определять состав генераторного газа с момента начала газификации.

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, занимаются развитием математической модели для расчета параметров процесса конверсии твердого топлива в парогазовой установке с газификацией угля [29]. Построенная модель - одномерная, учитывает рециркуляцию недожога и отдельную подачу топлива на разной высоте реактора. Скорость гетерогенных превращений рассчитывается с использованием диффузионно-кинетической теории горения твердого топлива, состав газа в каждый момент принимается локально равновесным. Распределение температур рассчитывается с применением разностной схемы с расщеплением по физическим процессам. Разработан алгоритм для численных расчетов. С помощью модели рассчитан ряд режимов, которые оказались оптимальными в результате термодинамического анализа процесса газификации. Получены

границы применимости термодинамических оценок эффективности режимов работы ступенчатого газогенератора.

Экспериментальными и численными исследованиями поточной газификации угля при повышенном давлении с различными коэффициентами избытка воздуха и концентрациях кислорода в дутье проводятся в Уральском федеральном университете [30]. Эксперименты проводят на стенде ОАО «НПО ЦКТИ» с основными элементами: газификатор, система охлаждения и очистки синтез-газа и камера сгорания синтез-газа. Установка оборудована минимально необходимым количеством датчиков температуры, давления и расхода, необходимых для анализа процесса газификации. Для математического описания процессов газификации создана расчетная модель на программном пакете ANSYS CFX. Но отсутствие встроенных в него инструментов моделирования гетерогенных реакций газификации твердого топлива создаёт необходимость писать на языке *Fortran* пользовательские модули, описывающие следующие процессы: выход летучих веществ и газификацию (горение) углерода топлива кислородом, углекислым газом, водяным паром. Ввиду малой влажности угля и для упрощения модели принимается, что сушка топлива происходит мгновенно.

В Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, занимаются экспериментальными исследованиями сжигания и газификации механоактивированных углей микропомола на стенде тепловой мощностью до 5 Мвт с вихревым предтопком и камерой дожигания [31]. Также проводятся исследования в перспективном направлении использования механоактивированных углей микропомола в энергетических технологиях создания газотурбинных установок на угле без стадии газификации. Сжигание твердого топлива пока представляется проблематичным. На первом этапе целесообразно отработать режим работы горелочного устройства на высокорекреационных углях с достижением максимального выгорания топлива в горелочном устройстве минимальных размеров при стехеометрическом соотношении топливо-воздух. Первые экспериментальные исследования в

этом направлении были выполнены на стенде тепловой мощностью до 5 МВт с вихревым предтопком и камерой дожигания. Полученные данные позволяют подойти к конструированию горелочного устройства для ГТУ на угле.

В России большое число исследований было проведено по внедрению установок ПГУ с внутрицикловой газификацией [32-36]. В Московском энергетическом институте разработаны принципиальные схемы когенерационных установок на основе ПГУ с внутрицикловым пиролизером или газификатором биомассы [32]. Исследованы тепловые схемы использования биомассы в энергетических целях с применением современных технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе непрерывного пиролиза или газификации исходного топлива.

Большой блок исследований по технологиям газификации и по внедрению схем ПГУ с внутрицикловой газификацией проводятся в Уральском федеральном университете [30,33]. Экспериментально и численно исследуют процессы поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья. Предлагают новые подходы к созданию парогазовой установки, которые позволяют существенно сократить объем инвестиций на реализацию проекта, получить компактный агрегат, который может быть установлен на существующих ТЭС с использованием имеющегося котельного и турбинного оборудования.

В Новосибирском государственном техническом университете рассмотрены методические подходы, методы расчета и исследования технико-экономических показателей и эффективности ПГУ ТЭЦ с поточными газификаторами угля при комбинированном производстве электро- и тепло энергии, синтез-газа и водорода [34]. Рассмотрен метод расчета поточных газификаторов угля с определением конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров. Приведены результаты исследования технико-экономических показателей и эффективности, расходно-термодинамических, конструктивно-компоновочных и схемных параметров ПГУ ТЭЦ с поточными газификаторами.

В Комсомольске-на-Амуре в государственном техническом университете занимаются разработкой научно-технических основ для совершенствования ТЭС на основе ПГУ с внутрицикловой газификацией угля [35]. Проведены технико – экономические и экологические расчёты работы ТЭС Хабаровского края на местных углях. Сделаны оценки целесообразности применения на ТЭС Хабаровского края различных угольных технологий и выбраны наиболее перспективные. Рассчитана стоимость топливной составляющей выработки 1 кВт·ч электроэнергии и количества вредных выбросов.

Анализ рынка газификационных технологий и исследований в данной области показывает, что наиболее востребованными являются поточные газификаторы, их доля составляет около 80% [3]. Поточные технологии могут организовываться как на основе одностадийной подачи окислителя и топлива, так и с использованием двухстадийной подачи. При этом, по эффективности процесса конверсии наиболее низкие показатели имеют одностадийные газификаторы на водоугольной суспензии (ВУС), наиболее высокие – двухстадийные газификаторы с сухой топливоподачей. Анализ используемых в новых разработках газификаторов технических решений с точки зрения эффективности и экономичности их применения в твердотопливных ПГУ с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) показал, что использование двухстадийного принципа организации процесса конверсии топлива является одним из перспективных направлений модернизации технологии. По данным [4] переход от одностадийного процесса в поточном газификаторе к двухстадийному, даже без оптимизации состава синтез-газа, может давать увеличение КПД ПГУ-ВЦГ почти на 1%.

Разработка двухстадийных газификаторов с сухой топливоподачей идет по двум схемам: прямоточного типа с восходящим потоком и с комбинированной противоточно-прямоточной схемой. Разработанный в рамках Японского проекта «Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity» (EAGLE) [37] двухстадийный газификатор типа EAGLE является

одним из оригинальных решений с комбинированной противоточно-прямоточной схемой.

Принцип работы газификатора EAGLE основан на гидродинамическом разделении потоков с организацией комбинированной противоточно-прямоточной схемы движения (рисунок 1.2). Одним из преимуществ такого решения является уменьшение необходимой высоты реакционной зоны при увеличении времени пребывания частиц угля в реакторе. Один поток, с соотношением кислорода и угля близкому к стехиометрическому, подается в нижнюю часть камеры газификации. Сгорая, он создает необходимые температуры для эффективного протекания реакций газификации. Второй поток, с недостатком воздуха, подается в верхнюю часть камеры, где он взаимодействует с высокотемпературным восходящим потоком продуктов сгорания. В результате недостатка кислорода для полного сгорания происходит конверсия углеродного остатка в продукты реакций газификации.

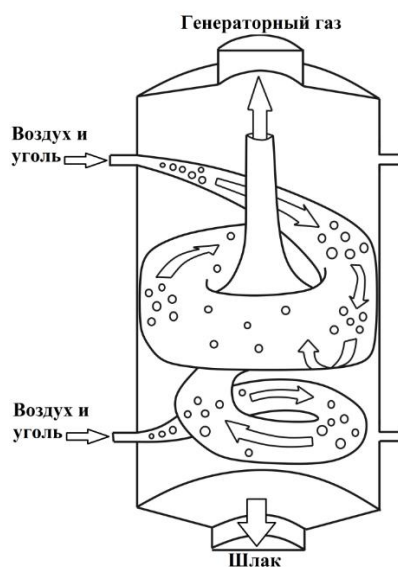


Рисунок 1.2 – Схема работы газификатора EAGLE

Одной из основных проблем использования технологии ПГУ-ВЦГ является эффективное использование различных видов угля. Угольное топливо имеет разное соотношение содержания летучих и твердого

углеродного остатка, разную температуру плавления золы. Такие технологии как ПГУ-ВЦГ в будущем будут использоваться в качестве замены старых ветхих котлов. Таким образом, угольные газификаторы должны иметь возможность работать с различными типами угля. Исследование работы газификаторов типа EAGLE на российских углях является актуальной задачей.

1.4 Технология сжигания твердого топлива в виде водоугольной суспензии

Водоугольное топливо — жидкое топливо, которое получают путём смешивания измельченного угля, воды с добавлением пластификатора. Используется на теплогенерирующих объектах, в основном как альтернатива природному газу и мазуту, что позволяет существенно сократить затраты при производстве тепловой и электрической энергии. Для приготовления ВУТ можно использовать низкокалорийные и тощие угли и отходы углеобогащения, а также создавать на их основе композиционные водо-торфо-угольные, водо-нефте-угольные и другие топливные составы.

Капельно-факельное сжигание является на сегодня основным способом сжигания ВУТ, особенно в котлах малой и средней мощности. На рисунке 1.3 представлена упрощенная схема устройства котельной по сжиганию ВУТ. Водоугольное топливо доставляется на котельную в готовом виде. Подача ВУТ на сжигание осуществляется насосами из ёмкостей хранения. Предварительно камера топки подогревается сжиганием печного топлива [38]. При достижении заданной температуры в пневматическую форсунку подается водоугольное топливо. Форсунка устроена таким образом, чтобы при распылении получать тонкодисперсные частицы для обеспечения быстрого испарения влаги. Температуры в камере при горении ВУТ достигают 950—1450 °С. За счет

низкотемпературного горения и избытка воздуха в камере обеспечивается минимизация образования соединений NO_x .

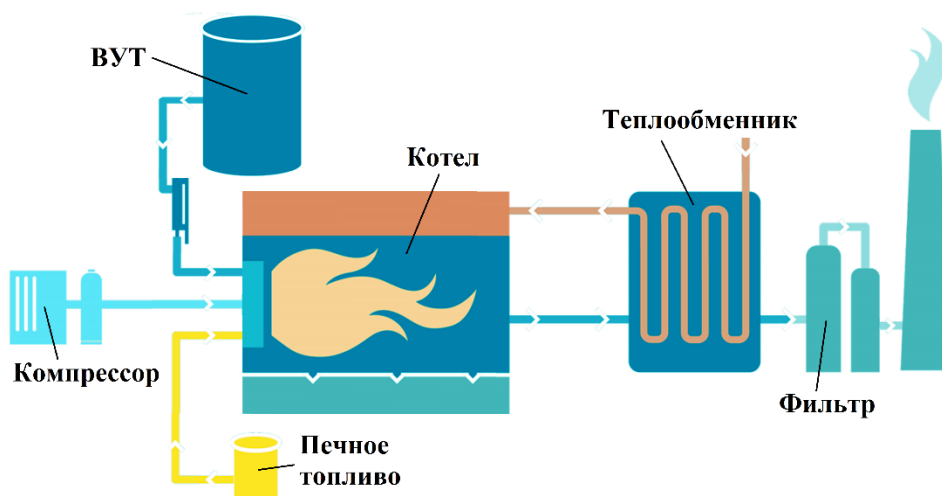


Рисунок 1.3 – Типовая схема устройства котельной по сжиганию ВУТ.

К недостаткам технологии сжигания ВУТ можно отнести достаточно высокие требования к горелочному устройству (форсунке). На первых этапах применения ВУТ имел место высокий абразивный износ форсунок для сжигания ВУТ. Например, на Новосибирской ТЭЦ-5 первые форсунки служили не более 40 часов. В современных условиях эти вопросы решены [39].

Определенные ограничения применимости ВУТ связаны с его стабильностью (способностью не расслаиваться) в течение суток-двух, что предполагает использование специальных присадок-пластификаторов.

Так как процесс горения водоугольного топлива весьма нестабилен, то существует необходимость разрабатывать особые геометрии котлов и особые расположения подачи топлива и воздуха для обеспечения циркуляции горячих горючих газов в зоне воспламенения. Одним из основных инструментов для оптимизации котлов являются численные методы, позволяющие исследовать аэродинамику, процессы теплообмена и горения водоугольного топлива в топочной камере.

Обзор методов математического моделирования горения ВУТ

Процессы сжигания распыленных водоугольных капель в своей основе являются многостадийными и в общих чертах повторяют аналогичные процессы с традиционным жидким топливом, а также угольными частицами. Но вместе с тем есть и существенные отличия.

Основными отличиями процесса воспламенения и горения капли водоугольной суспензии от горения пылевидного твердого и распыленного жидкого топлива являются: низкотемпературная активизация реакционной поверхности топлива на стадии воспламенения, возрастание удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса горения и интенсификация процесса горения за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающей параллельно основной реакции горения.

В период интереса к водоугольному топливу, в особенности в 80-х годах прошлого века, было выполнено большое количество исследований, направленных на создание эффективных технологий использования ВУТ. Если говорить о процессах воспламенения и горения ВУТ, то на основе выполненных как экспериментальных [40, 41], так и теоретических работ [42-45] выделяют следующие основные стадии: прогрев капли ВУТ, испарение воды, содержащейся внутри капли, выход и горение летучих веществ, содержащихся в угле, и выгорание углерода. Последняя стадия занимает наибольшее время и составляет 90-95 % от времени жизни капли.

Проведено большое количество исследований, направленных на изучение влияния характеристик ВУТ, окружающих условий на процессы испарения, воспламенения и горения, а также были предложены математические модели, описывающие данные процессы. Так, в работах [46-48] изучалось горение агломерата, образованного из частиц водоугольного топлива, состоящего из частиц углерода и воды. Рассматривалось влияние характеристик углеродных частиц в агломерате, размер которых изменялся от 75 до 300 нм, на скорость его горения. Было

показано, что уменьшение размеров частиц в агломерате не приводило к значительному возрастанию скорости горения. В работе [49] изучались процессы, происходящие при испарении воды из капель ВУТ. Используя интенсивный нагрев лазером, авторы сделали выводы о том, что наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ) в суспензии препятствует процессу испарения. В работе [50] выполнены исследования процессов испарения и воспламенения капли ВУТ, которые позволили сделать выводы, что время протекания данных процессов линейно зависит от диаметра капли.

В работе [51], на основе анализа испарения капли ВУТ, предложено два возможных модельных описания поведения капли: модель с сохранением единой структуры капли и модель распада капли. Обе модели рассматривают процесс испарения и сушки в две стадии. В течение первой стадии, после помещения капли в среду с высокой температурой, скорость испарения определяется разностью парциальных давлений на поверхности капли и окружающей среды. В процессе испарения количество жидкой фазы уменьшается, твердой - остается постоянной, и диаметр капли постоянно сокращается. При определенном критическом соотношении твердой и жидкой фазы в капле, твердые частицы образуют агломерат, но пространство между частицами все еще заполнено водой. С этого момента, характеризующегося определенным критическим соотношением твердого и жидкого в капле, начинается вторая стадия, которая определяет дальнейшее поведение капли. Авторы показали, что в случае достаточно небольшой разности температур капли с окружающей средой происходит медленное испарение и агломерат сохраняет свои размеры, в случае же значительной разности температур, давление, создаваемое газопаровой смесью в агломерате при прохождении через пористую оболочку, значительно увеличивает вероятность распада капли.

В работе [43] с использованием полученных экспериментальных данных построена физико-математическая модель горения капли ВУТ. В

качестве допущения принималось, что капля имеет сферическую форму, изменение пористости и реакция углерода с водяными парами в процессе горения не учитываются, также горение летучих компонент, радиационная и конвективная теплопередача игнорируются. Так как капля ВУТ представляет собой двухфазную систему, то сделано обоснование, что стадия прогрева воды заканчивается тогда, когда температура поверхности капли достигнет $\sim 110^{\circ}\text{C}$. Испарение капли начинается с поверхности и затем постепенно углубляется внутрь. В итоге сформулирована математическая постановка задачи, решение которой дало возможность определить изменение температуры и массы на всех выделенных стадиях горения капли ВУТ. Подчеркивается, что имеется количественное соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

Теоретические исследования закономерностей зажигания и горения ВУТ были выполнены в работах [52-54]. В данных исследованиях показано, что отличительной особенностью горения ВУТ (по сравнению с сухим углем) является пониженная реакционная способность и, следовательно, низкая температура воспламенения. Так, например, частица водоугольного топлива, подготовленная из антрацита, зажигается при температуре $\sim 490^{\circ}\text{C}$ [52]. В то же время сухой уголь той же марки воспламеняется при температуре $\sim 800\div 1000^{\circ}\text{C}$. Авторами последнее объясняется тем, что молекулы угольного агломерата с ненасыщенными валентными связями совместно с молекулами кислорода и воды (также с разорванными валентными связями) образуют поверхностно активные комплексы с меньшей энергией активации. Активация поверхности частицы приводит к снижению температуры воспламенения: для топлив из антрацита в 2 раза (с 1000°C до 500°C), топлив из углей марок Г и Д в 1,5–1,8 раза. Температура топлив из бурых углей падает до значения $300\text{--}325^{\circ}\text{C}$. Также необходимо отметить, что фильтрация водяных паров через

углеродистый каркас усиливает газификацию твердого горючего и соответственно интенсифицирует выход летучих.

На основе теоретических исследований [42] была сформулирована и решена задача тепломассопереноса при зажигании частицы водоугольного топлива в рамках математической модели, учитывающей сопряженность основных процессов «термической подготовки»: инертный прогрев, испарение влаги, термическое разложение органической компоненты топлива, фильтрационный тепломассоперенос, химическое взаимодействие углерода кокса и водяного пара, выход летучих горючих компонентов и продуктов взаимодействия пара с углеродом, их воспламенение и горение [55]. Установлено, что тепловые эффекты испарения влаги, термического разложения и фильтрации существенно замедляют процесс воспламенения частицы ВУТ. Это позволило сделать вывод о двух возможных режимах воспламенения: низкотемпературный, при котором зависимость теплофизических свойств угля от температуры оказывает несущественное влияние на время задержки зажигания; и высокотемпературный, при котором такое влияние существенно.

Приведенный выше обзор показывает, что процессы воспламенения и горения водоугольного топлива исследованы достаточно широко, и дает понимание о процессе горения ВУТ. Ниже рассмотрим ряд работ, отличающихся между собой использованием разных экспериментальных методик для изучения горения ВУТ и приведем результаты полученных исследований.

Один из подходов к модельному представлению горения капли ВУТ описан в работах [56, 57]. Предполагается, что горение основной массы твердого топлива при сжигании водоугольных суспензий протекает до полного испарения воды при прямом взаимодействии воды и ее паров с выгорающими угольными частицами. Вода, находящаяся в ядре, капли водоугольной суспензии, испаряясь, постоянно доставляет водяные пары на раскаленную углеродную поверхность капли. Чем выше температура

поверхности, тем большее количество водяных паров доставляется в зону реакции и тем больше скорость прохождения паров через эту зону, а, следовательно, тем выше скорость их разложения. Выгорание капли ВУТ сопровождается образованием весьма развитой пористой структуры коксового остатка с практически равнодоступными внутренними поверхностями частичек для газообразного окислителя (кислорода и водяного пара). При этом роль водяного пара как окислителя не ограничивается простейшей реакцией $C + H_2O$. Водяной пар при повышенных температурах (свыше $1000^{\circ}C$) взаимодействует также с промежуточными продуктами реакций, таких как $CH_4 + H_2O$, $CO + H_2O$ и др. Эти реакции протекают с меньшими энергиями активации, чем основная реакция $C + H_2O$, в результате чего при достаточных концентрациях H_2O (что характерно для ВУТ) создаются условия для полного догорания продуктов реакции вблизи поверхности капли или над этой поверхностью. В итоге задача горения сводится к гетерогенной, и в общем случае описывается замкнутой системой из дифференциальных уравнений.

Процесс горения распыленного водоугольного топлива представляет собой комплекс сложных физико-химических явлений, из которых основными являются следующие: распад струи ВУТ в камере сгорания на капли; теплообмен капель с окружающей средой; выход и горение летучих веществ – продуктов термического распада сложных органических соединений топлива; горение твердого остатка – взаимодействие между углеродом кокса и газовыми компонентами: кислородом O_2 , углекислотой CO_2 и водяным паром H_2O , диффундирующими к поверхности капли. При этом необходимо учитывать не только характеристики топлива, но и внешние условия процесса, связанные с конкретной конструкцией камеры или способом сжигания топлива. При таком анализе необходимо учитывать аэродинамику топочной камеры и условия движения капель в газовом потоке. Одной из главных проблем при комплексном изучении процессов горения ВУТ является поиск

необходимых упрощений и корреляций, которые позволили бы без разрешения процессов внутри капли ВУТ получить приемлемые, коррелирующие с экспериментальными данными, результаты. В работе [58] проводились расчеты горения совокупности капель ВУТ в турбулентном потоке с использованием коммерческого пакета программ Fluent. Для описания течения в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа с двухпараметрической моделью турбулентности. Учитывался конвективный и радиационный теплообмен капли с окружающей средой. Для описания капли ВУТ была принята модель без ее распада на более мелкие капли. Горение капли рассматривалось стадийное: сначала испарение воды, выход летучих веществ, их горение в газовой фазе, а потом горение твердого остатка – агломерата. Были проведены расчетные исследования по оптимизации ввода струи ВУТ в камеру сгорания с учетом минимизации времени испарения и увеличением скорости выгорания агломерата.

В работах [59, 60] численное исследование проводилось в программе ANSYS Fluent 12. Для описания турбулентного потока использовалась модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа с двухпараметрической моделью турбулентности - стандартной к-ε моделью турбулентности. Учитывался лучистый теплообмен с использованием P-1 модели сферических гармоник. В модели было реализовано параллельное протекание процессов испарения влаги, выхода летучих, горения летучих и кокса. Топливо условно делилось на три компонента: сухой уголь, обводненный уголь, вода. Количество воды принималось равным количеству воды, добавленному к углю при приготовлении ВУТ. В модели учитывалось уменьшение энергии активации водоугольных топлив по сравнению с исходным углем эмпирическим путем. Реакции газификации не рассматривались. Расчетные исследования были направлены на поиск технических решений по переводу парового котла ДКВр-20-13 со слоевого

сжигания кускового угля на вихревое сжигание композитного водоугольного топлива (искусственного композитного жидкого топлива – ИКЖТ).

В работе [61] был выполнен расчет распада струи ВУТ. Для математического описания распада струи в турбулентном потоке был использован метод крупных вихрей (LES) совместно с методом для аппроксимации свободной поверхности - метод объёма жидкости (VOF). Для описания вязкостных свойств водоугольного топлива была использована теория неньютоновской жидкости. Как показали результаты сравнения полученных результатов с экспериментальными данными [62], предлагаемый в работе подход к описанию распада водоугольной суспензии, при правильном выборе реологических свойств суспензии, дает хорошие результаты.

Выводы по главе 1

Проведённый обзор показывает, что задачи по внедрению эффективных и экологически безопасных технологий переработки угольного топлива в России являются весьма актуальными. При сжигании угля на традиционных тепловых электростанциях в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, оксидов серы и азота, соединений фтора, легколетучие металлы, а также органические вещества. Однако в настоящее время в России нет ни одной промышленной энергоустановки с газификацией угля.

Проведен анализ современного уровня развития моделирования аэродинамики, теплообмена, горения и газификации угольного топлива в топочных камерах. На основе анализа сделаны выводы, что в России, несмотря на большое количество работ, посвященных математическому моделированию переработки угля, практически отсутствуют работы, по комплексному пространственному моделированию задач газификации пылеугольного топлива и сжигания ВУТ.

ГЛАВА 2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА

Течение газов в топочных камерах является пространственным и турбулентным. Характер его обусловлен способами подвода топлива, воздуха и газов, внутренней конструкцией, характером размещения теплообменных поверхностей. Максимальные скорости движения газов в топочных камерах не превышают 100 м/с. При температурах около 1800°К это соответствует числам Маха $M \leq 0,12$. Для описания движения газов при таких числах Маха можно использовать модель несжимаемой жидкости.

Аэродинамика является одним из факторов, определяющих процессы тепломассообмена при поточной газификации угля или сжигании ВУТ. Поэтому при создании новых конструкций котельных агрегатов большое внимание уделяется изучению аэродинамики газовых потоков внутри топочных камер. В последние годы при изучении аэродинамики топок все большее значение начинает играть численное моделирование.

При использовании определенной модели горения одиночной частицы угля или капли ВУТ в трехмерных расчетах должна учитываться возможность детализации пространства для разрешения объектов. Если мы говорим о моделировании топочных камер, то для детального разрешения одиночной частицы в масштабах топочной камеры требуются колоссальные вычислительные ресурсы и такой подход не подходит для решения инженерных задач. Исходя из задачи разработки математической модели горения одиночной капли, которую в первую очередь предполагается использовать для инженерных расчетов, в данной работе частица угля или капля ВУТ представляется в виде сферы с постоянными по всему ее объему свойствами. Выше было показано, что на основе как экспериментальных, так и теоретических работ, выделяют следующие основные стадии: нагрев частицы, испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент,

горение и газификация коксового остатка [63,64]. Последняя стадия занимает наибольшее время и составляет 90-95 % от времени жизни частицы. При построении математической модели воспламенения и выгорания частицы необходимо учесть данные особенности.

2.1 Модель газовой фазы

В общем виде для математического описания аэродинамики топочных камер можно использовать систему дифференциальных уравнений сплошной среды. Согласно современным представлениям достаточно реалистическая картина многомерных течений жидкости или газа может быть получена на основе решения системы уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу [65,66]. В рассматриваемой задаче течение газа считается установившимся, поэтому все уравнения записываются в стационарной постановке.

Для численного моделирования турбулентного течения несжимаемой жидкости использовались уравнения Рейнольдса с учетом межфазного взаимодействия (формула 2.1, 2.2) [65]:

$$\nabla(\rho \mathbf{v}) = S_{p,m} \quad (2.1)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\tau^m + \tau^t) + S_{p,v} \quad (2.2)$$

где ρ – плотность, \mathbf{v} – вектор скорости, $S_{p,m}$, $S_{p,v}$ – скорость изменения массы и импульса за счет межфазного взаимодействия. τ^t — тензор рейнольдсовых напряжений, а τ^m - тензор вязких напряжений определяется по формуле 2.3:

$$\tau_{ij}^m = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

где ν – турбулентная вязкость.

Решаются уравнения переноса энергии и концентрации компонент. Плотность и давление связаны уравнением состояния. Температура смеси в каждой точке поля течения получается из известных локальных значений энтальпии и состава смеси.

2.2 Модель турбулентности

Считается, что при помощи уравнений Навье-Стокса можно описать как ламинарное, так и турбулентное течение. Практически же, реальные достижения в расчетах турбулентных потоков связаны с применением полуэмпирических моделей турбулентности, использующих подход Рейнольдса. Обоснованием необходимости применения такого подхода может служить приведенная в ряде работ оценка, согласно которой отношение характерных размеров энергосодержащих (крупных) вихрей и мелкомасштабных вихрей, определяющих «турбулентный фон», имеет порядок $Re^{3/4}$. Естественно, что, ориентируясь на возможности современных ЭВМ, решить поставленные задачи в практически важном диапазоне $Re \geq 10^3$ в настоящее время маловероятно.

В рассматриваемой задаче число Рейнольдса может достигать значений $10^5 - 10^6$, что свидетельствует о турбулентном режиме течения. При таком режиме инерционные силы значительно превосходят вязкие, возникают пульсации гидродинамических параметров. Вязкость демпфирует такие пульсации, но при больших числах Рейнольдса возникает неустойчивость течения, которая приводит к случайным пульсациям основных параметров во времени и пространстве.

Уравнения Рейнольдса замыкались с помощью следующих моделей турбулентности: стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности (формула 2.4, 2.5) [66],

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.5)$$

$k-\omega$ SST модели Ментера (формула 2.6, 2.7) [67],

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.7)$$

и модели рейнольдсовых напряжений (формула 2.8) [68]

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{u_i u_j} + U_k \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} D_{ijk} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (2.8)$$

В данных моделях напряжения Рейнольдса выражаются через тензор скоростей деформации и турбулентную вязкость по формуле 2.9 (общая формула Буссинеска):

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \quad (2.9)$$

Для моделирования граничных условий на стенках использовался метод пристеночных функций [69].

2.3 Модель радиации

Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной

двухтемпературной среды [70]. Достоинством этого метода является его легкая совместимость с методами расчета аэродинамики и теплопереноса, реализованными на криволинейных сетках (формула 2.10):

$$(\alpha_g + \alpha_p) E_r = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{1}{3(\alpha_g + \alpha_p + \xi\beta_p)} \frac{\partial E_r}{\partial x_k} \right) + \sigma (\alpha_g T_g^4 + \alpha_p T_p^4), \quad (2.10)$$

где E_r - плотность энергии излучения, α_g - коэффициент поглощения излучения газом, α_p - коэффициент поглощения излучения частицами, ξ – коэффициент анизотропии рассеяния, β_p – коэффициент рассеивания излучения, σ – константа Стефана-Больцмана, T_g – температура газа, T_p – температура частицы.

Коэффициенты поглощения газа α_g вычисляются по модели суммы серых газов, коэффициенты поглощения и рассеяния частицами определяются по аппроксимации оптически крупных частиц.

2.4 Модель движения угольных частиц

Для описания двухфазных потоков используются два подхода. Это подход Лагранжа с имитационным моделированием движения отдельных частиц. Так как провести прямое моделирование всех реальных частиц крайне сложно, применяется модель представительных частиц. По этой модели принимается, что математическая частица в процессе движения и выгорания ведет себя как реальная частица. При формировании же членов обмена массой, импульсом и энергией с газовой фазой математическая частица выступает как характерный представитель своего класса и несет информацию о совокупной массе этого класса частиц. Обычно при моделировании двухфазных потоков по методу Лагранжа используют от нескольких сотен до сотен тысяч частиц.

В подходе Эйлера дисперсная фаза описывается уравнениями сплошной среды. При моделировании по Эйлеру частицы теряют свою индивидуальность. Считается, что в расчетной ячейке все частицы характеризуются едиными параметрами скорости, температуры и т.д. Это усложняет моделирование таких процессов, как взаимодействие струйных потоков и осаждение частиц на стенки. Преимущество подхода Эйлера заключено в том, что получаемые уравнения для описания дисперсной фазы по структуре совпадают с уравнениями переноса для газовой фазы. Это позволяет использовать для их решения аналогичные алгоритмы. Проведенный анализ обоих методов, установил их равноценность по степени точности при соответственно точной дискретизации (по Эйлеру) и достаточно большом количестве частиц (по Лагранжу). Вычислительные затраты при использовании метода Эйлера для описания процессов межфазного взаимодействия для нескольких классов частиц являются более значительными. Метод Эйлера в отличие от метода Лагранжа, так же, как и уравнения для описания газа, подвержен влиянию численных ошибок схемной дискретизации (схемная вязкость). Этот вопрос является актуальным при использовании достаточно грубых расчетных сеток, характерных для пространственного моделирования.

Процессы, связанные с горением угольной пыли, так же, как аэродинамика и теплообмен, являются определяющими при моделировании работы пылеугольных топочных устройств. В результате теплового воздействия на угольную частицу начинается процесс пиролиза с выделением летучих, сгорающих в ходе гомогенной реакции в газовой фазе. После гетерогенного выгорания углерода коксового остатка образуется зола, представляющая собой несгораемые компоненты угольной пыли. Это означает, что в основном первоначальная угольная частица сохраняет свою индивидуальность (исключая случаи распада частицы в процессе пиролиза), но в течение пребывания в топочной камере происходит изменение ее физических свойств, таких как объем, плотность, структура поверхности и др.

В настоящей работе для описания процессов движения частицы используется метод Лагранжа. Движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и силы тяжести по формулам 2.11, 2.12:

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = \frac{\rho_p}{2} \frac{\pi}{4} d_p^2 C_D \left(\bar{u} - \bar{u}_p \right) \left| \bar{u} - \bar{u}_p \right| + m_p \bar{g}, \quad (2.11)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} f_k(Re_p), \quad Re_p = \frac{\left(\bar{u} - \bar{u}_p \right) d_p \rho_p}{\mu}, \quad (2.12)$$

где C_D – коэффициент сопротивления, Re_p – число Рейнольдса для частицы, m_p – масса угольной частицы, R – универсальная газовая постоянная, ρ_p – плотность частицы.

Учет турбулентности потока при движении частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц на основе подхода [71, 72].

Температура угольной частицы определяется из уравнения сохранения энергии для частицы (формула 2.13):

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = \varepsilon_p \sigma A_p (E_r^4 - T_p^4) + \alpha_c A_p (T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_p, \quad (2.13)$$

где C_p – теплоемкость частицы, ε_p – степень черноты частицы; α_c – коэффициент конвективной теплоотдачи, h_p – удельный тепловой эффект реакции, A_p – площадь поверхности частицы.

2.5 Модель испарения влаги и выхода летучих веществ

Испарение влаги из топлива рассчитывается на основе количества водяного пара на поверхности частицы и в объеме по формуле 2.14.

$$G_i = k_w (C_{i,S} - C_{i,\infty}), \quad (2.14)$$

где G_i – молярный поток пара, k_w – коэффициент массообмена, $C_{i,p}$ – концентрация пара на поверхности частицы, $C_{i,g}$ – концентрация пара в объеме газов.

В работе представлены наиболее широко используемые модели выхода летучих веществ. Это одностадийное и двухстадийное приближение процесса, а также модель, основанная на структурной особенности строения угольного вещества.

При одностадийном приближении скорость выхода летучих веществ определяются по закону Аррениуса (формула 2.15) с эффективными кинетическими константами:

$$k_v = k_{v,0} e^{-(E_v / RT_p)} \quad (2.15)$$

где $k_{v,0}$ – предэкспоненциальный множитель процесса выхода летучих веществ, E_v – энергия активации процесса выхода летучих веществ. Значения констант взяты из работы [73] $k_{v,0} = 1.3 \cdot 10^7$ (1/с), $E_v = 1.67 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль).

При рассмотрении двухстадийного механизма (формула 2.16), на основе модели Кобайаши [74], предполагается наличие двух разных по степени связанности с органической массой компонент летучих веществ, характеризующихся разными кинетическими параметрами:

$$\frac{m_v(t)}{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \exp(-\int_0^t (k_1 + k_2) dt) dt \quad (2.16)$$

Рассматривались следующие наборы констант:

Kobayashi et al. [74]: $\alpha_1 - 0.3$, $A_1 - 2 \cdot 10^5$ (1/с), $E_1 - 1.05 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль), $\alpha_2 - 1$, $A_2 - 1.3 \cdot 10^7$ (1/с), $E_2 - 1.67 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль)

Cho et al. [75]: $\alpha_1 - 0.38$, $A_1 - 3.7 \cdot 10^5$ (1/с), $E_1 - 7.4 \cdot 10^7$ (Дж/Кмоль), $\alpha_2 - 0.8$, $A_2 - 1.46 \cdot 10^{13}$ (1/с), $E_2 - 2.5 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль)

Ubhayakar et al. [76]: $\alpha_1 - 0.292$, $A_1 - 3.7 \cdot 10^5$ (1/с), $E_1 - 7.4 \cdot 10^7$ (Дж/Кмоль), $\alpha_2 - 0.438$, $A_2 - 1.46 \cdot 10^{13}$ (1/с), $E_2 - 2.5 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль), где α_1 и α_2 – коэффициенты, определяющие долю «низкотемпературных» и «высокотемпературных» летучих веществ.

При рассмотрении модели с учетом структуры угольного вещества органическая масса угля представляется в виде фрагментов разной степени ароматизированности, соединённых «мостиками», которые представляют собой алифатические цепи, эфирные, тиоэфирные или их комбинации. В данной работе используется CPD (chemical percolation devolatilization) модель [77]. В данной модели, в так называемой подвижной фазе, под действием температуры происходит разрушение «мостиков», часть фрагментов отщепляются от ядерной части и в виде низкомолекулярных паро- и газообразных соединений переходят в летучие вещества. Часть фрагментов, имеющих более тяжелый молекулярный вес, переходят в плавкое состояние (смолистые вещества), рекомбинируют, частично образуются летучие вещества, а также образуют с ядерной частью коксовый остаток. Параметры, используемые для данной модели, были взяты на основе корреляций, предложенных в работе [78]. На основе данных корреляций, в модели в качестве исходных параметров задавалось общее количество «мостиков» в структуре угля в виде их доли, количество «мостиков» - углеродных связей, которые возникают при рекомбинации смолистых веществ с ядерной частью, координационное число, определяющее структуру угля, а также масса кластера и масса боковых цепей.

2.6 Модель горения газового топлива

Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючими компонентами и окислителем. Скорость горения реагентов R_{vol} , в том числе и летучих, определяется с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Данная модель представляет комбинацию кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря» (формулы 2.17-2.19) [79]:

$$R_{kin} = k_{kin} \cdot T_g^\beta e^{-E_{kin}/RT_g} \prod_{i=1, N_r} x_i^{v_i}, \quad (2.17)$$

$$R_{EBU} = \frac{\rho \mathcal{E}}{k} k_{EBU} \cdot \min_{i=1, N_r} \left(\frac{f_i}{n_{r,i} \mu_i} \right), \quad (2.18)$$

$$R_{vol} = \min(R_{kin}, R_{EBU}) \quad (2.19)$$

где R_{KIN} , R_{EBU} – скорости реакции по кинетической модели и модели «обрыва вихря», k_{kin} , E_{kin} – предэкспоненциальный множитель и энергия активации реакции горения газов, β – показатель степени, k_{EBU} – константа модели «обрыва вихря», x_i , f_i – молярная и массовая концентрации. Реакции и значения кинетических констант для горения газовой фазы [83] представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Кинетические константы реакций горения и газификации

1	$CH_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	$k = 4.4 \times 10^{11} * \exp[-1.25 \times 10^8 / RT]$
2	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$k = 3 \times 10^8 * \exp[-1.25 \times 10^8 / RT]$
3	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$k = 2.24 \times 10^{12} * \exp[-1.67 \times 10^8 / RT]$
4	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$k = 6.8 \times 10^{15} * \exp[-1.67 \times 10^8 / RT]$
5	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$k = 2.75 \times 10^9 * \exp[-8.37 \times 10^7 / RT]$

2.7 Модель горение и газификации твёрдого остатка

Горение коксового остатка описывается химической реакцией окисления углерода угля с кислородом воздуха с получением диоксида углерода по формуле 2.20:



Скорость горения коксового остатка рассчитывается согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории по формуле 2.21 [80, 81]:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho_p RT_g Y}{M} \frac{k_d k_b}{k_d + k_b}, \quad (2.21)$$

где Y – массовая доля окислителя, M – молярная масса окислителя, k_d – константа скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы, k_c , k_b – константы скорости химической реакции. Константа скорости диффузии газа – реагента к поверхности частицы определяется по формуле 2.22 [82]:

$$k_d = D_0 \frac{\left[(T_p + T_g) / 2 \right]^{0.75}}{d_p}, \quad (2.22)$$

где D_0 – коэффициент диффузии реакционно-активного газа при нормальных температуре и давлении.

Уравнение Аррениуса использовалось для нахождения константы скорости химической гетерогенной реакции (формула 2.23):

$$k_b = k_{b0} T e^{(E_b / RT_p)} \quad (2.23)$$

где $k_{b,0}$ - предэкспоненциальный множитель реакции выгорания углерода, E_b – энергия активации реакции выгорания углерода.

Для описания процессов газификации в математическую модель включены реакции паровоздушной конверсии угля. Реакции и значения кинетических констант для пылеугольной газификации в газификаторе поточного типа [83] представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Кинетические константы гетерогенных реакций газификации

1	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	$k = 2.3 * \exp[-9.23 \times 10^7 / RT]$
2	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$k = 4.4 * \exp[-1.62 \times 10^8 / RT]$
3	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$k = 1.33 * \exp[-1.47 \times 10^8 / RT]$

2.8 Модель процессов воспламенения и горения водоугольного топлива

Водоугольное топливо представляется дискретным набором капель, которые подаются в топочную камеру. Эти капли состоят из комплекса уголь плюс вода (внешняя влага). На первом этапе происходит испарение внешней влаги. Изменение массы капли (внешней влаги) в процессе испарения описывается следующим уравнением 2.24:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p \left[\rho_c D_c^b Sh_c \ln(1 + B_M) \right] \quad (2.24)$$

или изменение диаметра по формуле 2.25:

$$\frac{dD_p^2}{dt} = -\frac{4}{\rho_p} \left[\rho_c D_c^b Sh_c \ln(1 + B_M) \right] \quad (2.25)$$

где Sh_c Число Шервуда:

$$\text{Sh}_C = 2 + 0.6 \text{Re}^{0.5} \text{Sc}_m^{0.333} \quad (2.26)$$

Sc_m - молекулярное число Шмидта.

B_M - коэффициент Сполдинга для массоотдачи:

$$B_M = \frac{f_{VS} - f_V}{1 - f_{VS}}, \quad (2.27)$$

f_{VS} - массовая доля пара в среде в условиях, когда пар - насыщенный:

$$f_{VS} = \frac{p_s(T_D) \mu_V}{p_s(T_D) \mu_V + (p - p_s(T_D)) \mu_{dry}}, \quad (2.28)$$

T_D - температура капли, $p_s(T_D)$ - давление насыщенного пара при температуре капли, μ_V - молярная масса пара, μ_{dry} - молярная масса вещества окружающей среды, за исключением пара.

Давление насыщенного пара:

$$p_s(T) = p_{atm} \exp\left(\frac{L_{eva} \cdot \mu_V}{R_{gas}} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (2.29)$$

где L_{eva} - теплота парообразования, T_b - температура кипения жидкости.

Коэффициент бинарной диффузии пара в несущую среду аппроксимируется выражением 2.30:

$$D_C^b = D_0 \left(\frac{T}{273}\right)^a \quad (2.30)$$

Теплоотдача между фазами модифицируется следующим образом:

$$\alpha_{\text{КОНВ}}^{\text{ИСП}} = \alpha_{\text{КОНВ}} \frac{\ln(1+B_T)}{B_T} \quad (2.31)$$

где B_T – коэффициент Сполдинга для теплоотдачи

$$B_T = (1 + B_M)^\varphi - 1, \quad (2.32)$$

$$\varphi = \frac{c_{pV}(T_D)\rho D_C}{\lambda} \quad (2.33)$$

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

2.9 Модель образования оксидов азота

Математическая модель образования NOx при сжигании угля включает в себя рассмотрение трех механизмов с учетом влияния пульсаций температуры: термические NOx на основе известной зависимости Я.Б. Зельдовича [84], быстрые NOx и топливные NOx с использованием модели, предлагаемой в работе [85] с реакциями (2.34, 2.35), а также добавлением реакции «ребенинга» (2.36), предложенной в работе Chen [86].

$$dx_{\text{HCN}} / dt = -3.5 * 10^{10} \exp(-3370/T) x_{\text{HCN}} x_{\text{O}_2}^a, \quad (2.34)$$

$$dx_{\text{HCN}} / dt = -3 * 10^{12} \exp(-30200/T) x_{\text{HCN}} x_{\text{NO}}, \quad (2.35)$$

$$dx_{\text{NO}} / dt = -2.7 * 10^6 \exp(-9466/T) x_{\text{NO}} x_{\text{C}_n\text{H}_m} \quad 2.36)$$

где x – молярная доля соответствующего компонента, a – порядок реакции по кислороду.

Скорости реакции образования NO сильно зависят от температуры из-за большой величины энергии активации. Следовательно, флуктуации температуры могут сильно увеличить концентрацию оксида азота, образующегося в турбулентных течениях. Для учета влияния турбулентных пульсаций на процесс образования оксида азота производилось решение уравнения для вариации температуры при решении уравнений переноса для концентраций NO и HCN. Для определения осредненной скорости реакций образования NO проводилось интегрирование по верхнему и нижнему пределу по температуре с использованием β – функции плотности распределения вероятности.

Расчет образования оксидов азота проводился после получения сходящегося решения по основным параметрам двухфазного реагирующего потока, в режиме «postprocessing». При этом дополнительно решалось уравнение для вариации температуры с целью учесть влияние пульсационных составляющих потока на процесс образования оксидов азота.

2.10 Численные алгоритмы

Уравнения сохранения для газовой фазы записываются в виде обобщенного закона сохранения в контрольном объеме. Для объема записывается конечно-разностный аналог уравнения. Для вычисления диффузионных потоков на гранях контрольного объема используется центрально-разностная схема, имеющая второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема второго порядка точности против потока. Для связи поля скорости и давления использовалась SIMPLE-C [87] процедура.

Для расчета стационарного течения использован метод установления. После достижения установившегося во времени течения газа проводится расчет траекторий угольных частиц. При необходимости проводится расчет параметров течения газа с учетом новых источниковых членов. Источниковые члены, учитывающие влияние дисперсной фазы на несущий поток, формируются с использованием Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL) метода [88].

Выводы по главе 2

Разработана математическая модель для проведения численных исследований процессов в топочных камерах при сжигании и газификации угольного топлива, что соответствует целям настоящего исследования. Математическое описание горения и газификации пылеугольного топлива включает в себя комплекс взаимосвязанных подмоделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы движения, горения, газификации угольных частиц и т.д. Предлагаемые методы моделирования процессов поточной газификации угля и горения ВУТ являются оригинальными и не встречаются в работах отечественных авторов.

ГЛАВА 3 ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

3.1 Горение пылеугольного факела при наличии закрутки на огневом стенде мощностью 2,4 МВт

Для верификации математической модели горения пылеугольного факела использованы экспериментальные данные по горению пылеугольного факела при наличии закрутки потока на огневом стенде мощностью 2,4 МВт [89]. Схема огневого стенда, геометрия горелочного устройства представлены на рисунке 3.1 и 3.2 (размеры приведены в миллиметрах). Расходные характеристики представлены в таблице 3.1, элементный и технический составы угля, используемого в эксперименте, приведены в таблице 3.2.

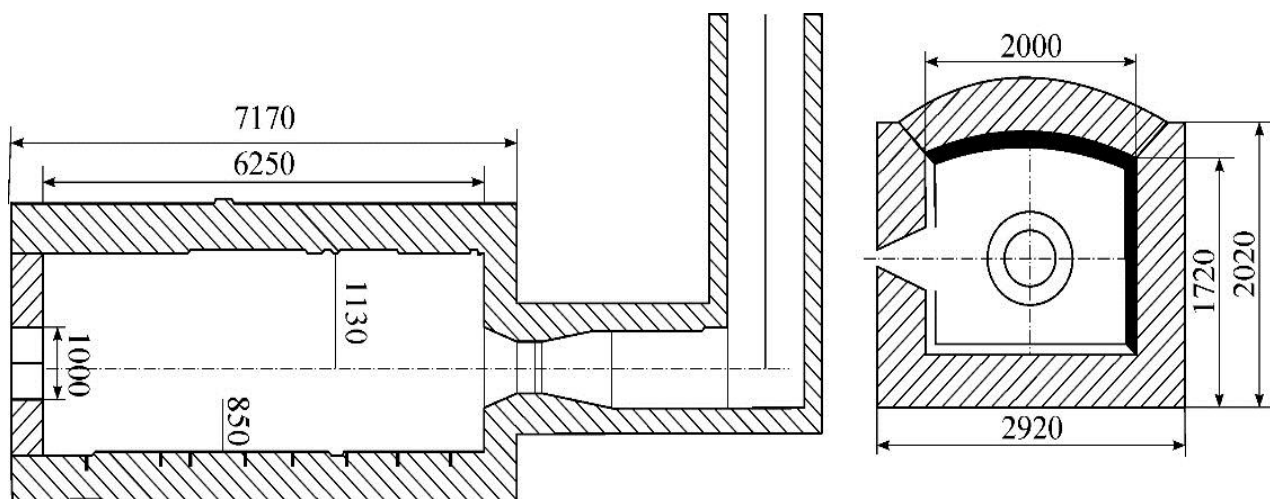


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка: огневой стенд

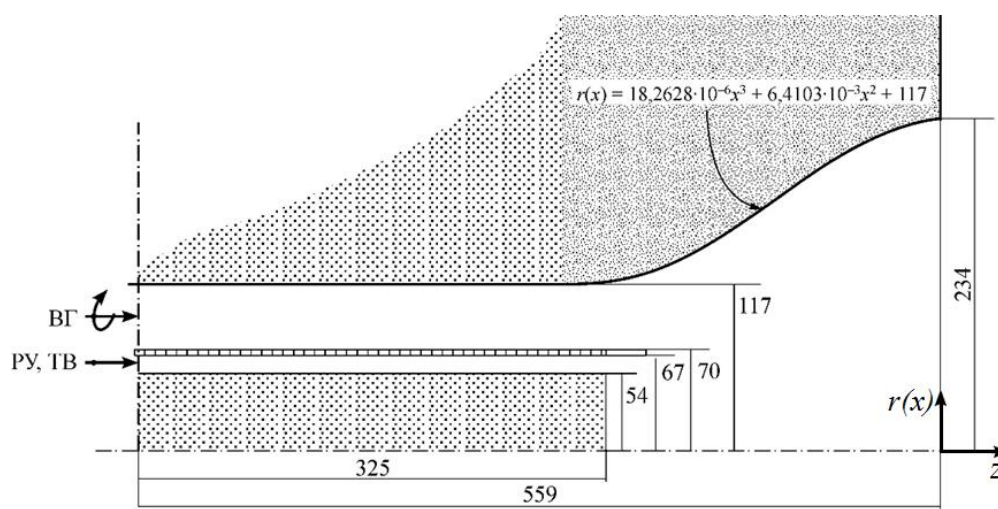


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка: горелка. РУ – размельченный уголь, ТВ – транспортный воздух, ВГ – воздух для горения

Таблица 3.1 – Расходные характеристики горелочного устройства

Воздух для горения	
Расход воздуха (сухого)	0,745 кг/с
Площадь сечения	0,027611 м ²
Температура воздуха	573,15 К
Плотность воздуха	0,616 кг/м ³
Средняя аксиальная скорость	43,83 м/с
Средняя тангенциальная скорость	49,42 м/с
Интенсивность турбулентности	20 %
Характерный размер	0,0235 м
Подача транспортного воздуха и угля	
Расход угля (сухого)	0,073 кг/с
Расход воздуха (сухого)	0,117 кг/с
Площадь сечения	0,0049417 м ²
Температура	343,15 К
Плотность воздуха	1,028 кг/м ³
Средняя аксиальная скорость	23,02 м/с
Интенсивность турбулентности	10 %
Характерный размер	0,0065 м

Таблица 3.2 – Состав угля

Технический состав (мас. %, сухой)	
Летучие вещества	37,4
Связанный углерод	54,3
Зола	8,3
Химический состав (мас. %, рабочая)	
Углерод	80,36
Водород	5,08
Азот	1,45
Сера	0,94
Кислород	12,17
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	32,32

Результаты данного эксперимента включают в себя профили скоростей, пульсационные составляющие скорости, значения температур и газовый состав в нескольких поперечных сечениях топочной камеры, показанных на рисунке 3.3.

Задача решается в трёхмерной осесимметричной постановке, расчетная геометрия представляет собой одну четвертую часть огневого стенда (рисунок 3.3). Расчетная сетка горелочного устройства представлена на рисунке 3.4. Задача решалась на программном пакете *Ansys Fluent* [ANSYS Fluent 12.0 User's Guide, 2009.].

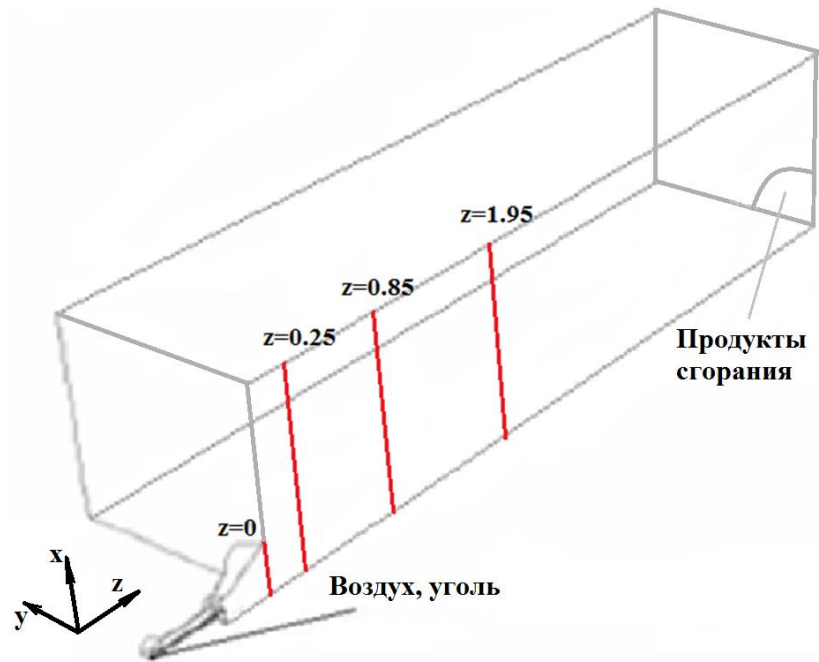


Рисунок 3.3 – Расчетная геометрия

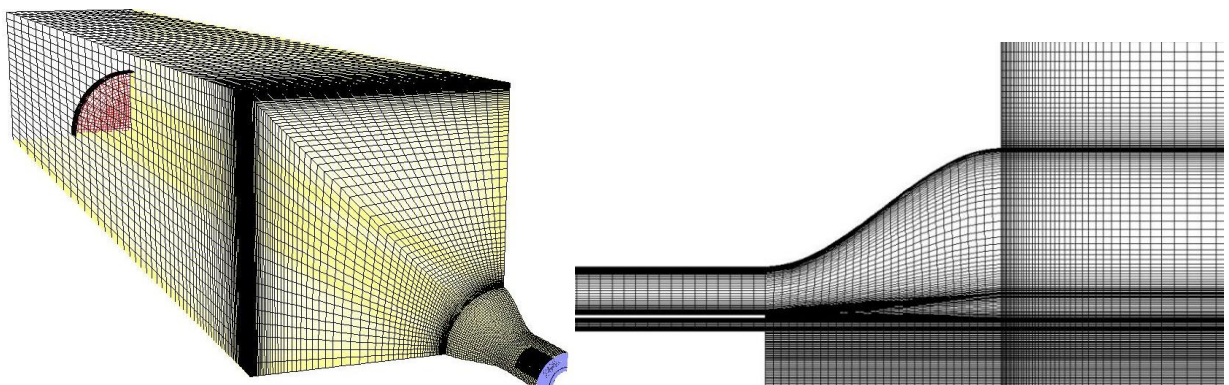


Рисунок 3.4 – Расчетная сетка горелочного устройства и камеры сгорания, 1 млн. ячеек

Исследовано влияние детализации сетки на результаты расчёта. Для анализа на сеточную сходимость были выбраны расчётные области размером 250000, 500000 и 1000000 ячеек. На рисунке 3.5 представлены результаты расчетов в виде распределения аксиальных и тангенциальных скоростей при горении угольного топлива в топке огневого стенда для нескольких вариантов, отличающихся количеством расчетных ячеек. При размере сетки более 500000 ячеек не наблюдается существенных отличий в результатах расчетов.

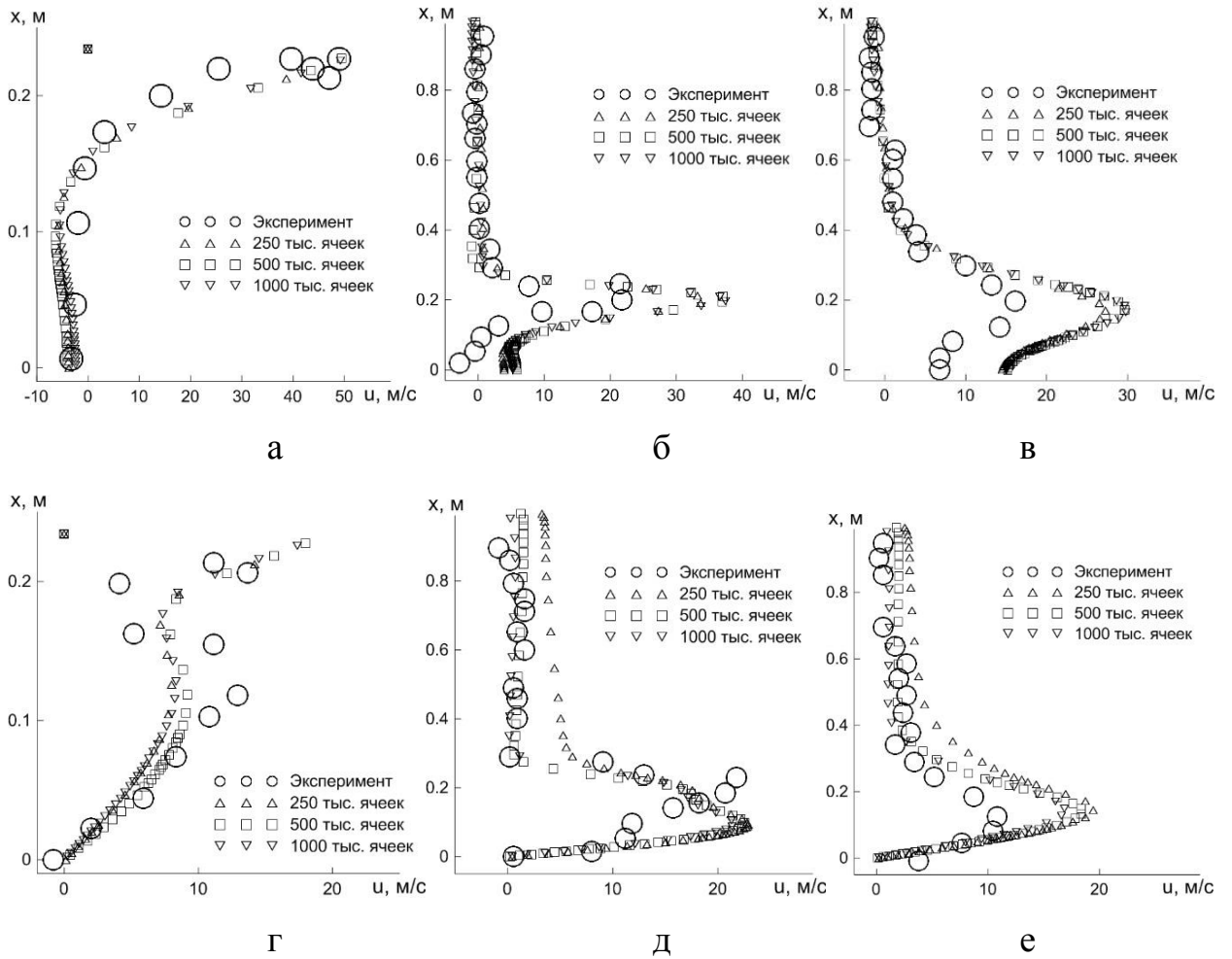


Рисунок 3.5 – Распределение аксиальной компоненты скорости в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м и тангенциальной компоненты скорости в сечениях: г) $z=0$ м, д) $z=0.25$ м, е) $z=0.85$ м

На рисунках 3.6, 3.7 представлены результаты расчета в виде поля температуры и векторного поля скорости. Видно, что в центральной части факела образуется зона рециркуляции, в которой происходит захват горючих горячих газов, что обеспечивает стабильное горение факела и максимальные температуры внутри его.

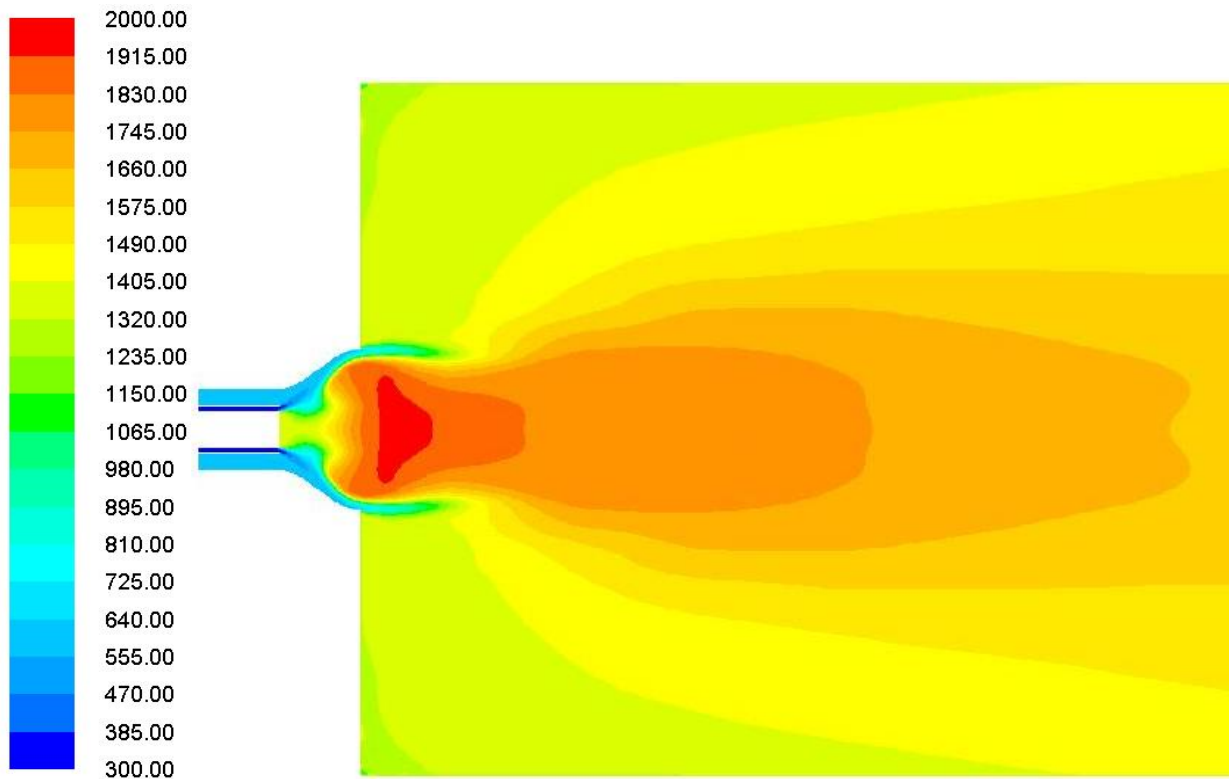


Рисунок 3.6 – Температурное поле в центральном сечении

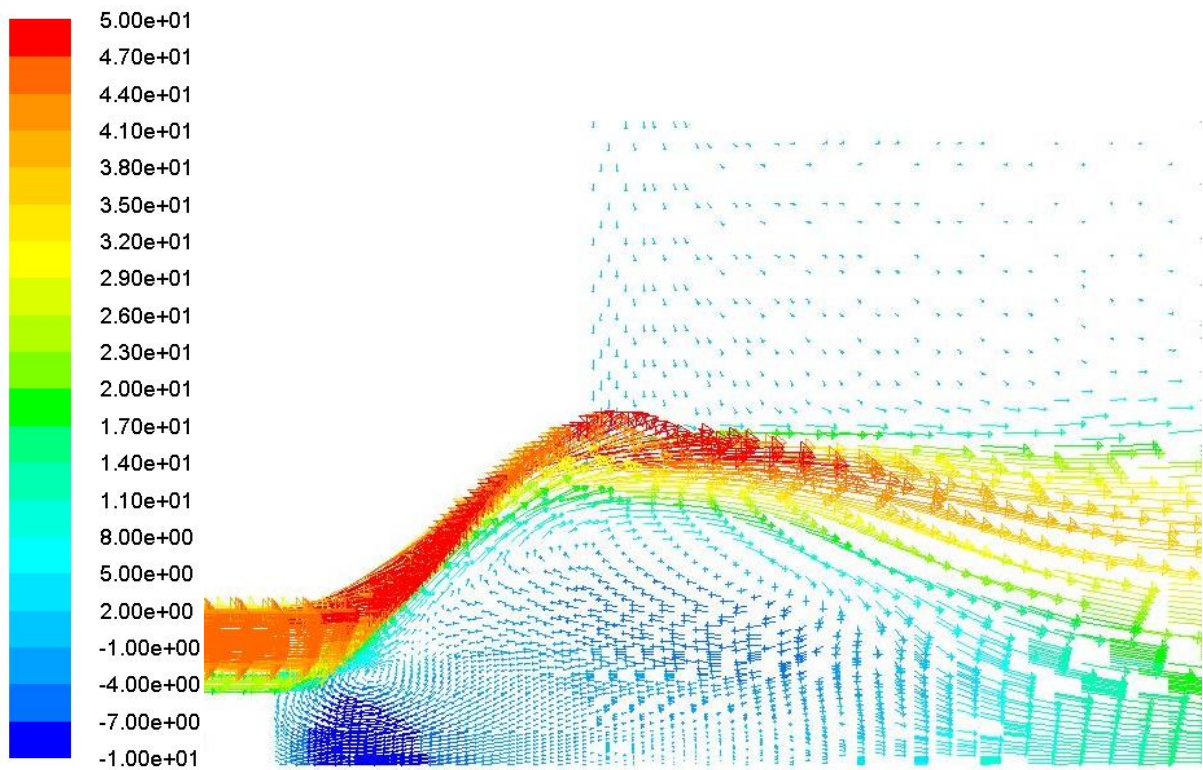


Рисунок 3.7 – Векторное поле скоростей в области горелки (вектора окрашены в соответствии с аксиальной компонентой скорости)

Исследование влияния моделей турбулентности на результаты расчета

При рассмотрении вихревых горелочных устройств [90, 91], топочных камер [92, 93] и поточных реакторов термохимической конверсии углей [94, 95], где возникают закрученные потоки, важен выбор модели турбулентности, которая позволила бы достаточно точно описать усредненные поля и крупномасштабные пульсации закрученных течений. Для изотермических исследований было выполнено большое количество работ по сравнительному анализу результатов расчета закрученных течений при использовании различных моделей турбулентности [96, 97]. Данные работы показали, что такие распространенные модели как $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ модели турбулентности плохо описывают такие течения. Чтобы улучшить описание закрученных течений предлагается использовать модификации двухпараметрических моделей турбулентности, например, $k-\omega$ SST модель Ментера [67], модели переноса рейнольдсовых напряжений (RSM), а также вихреразрешающие методы, как, например, метод моделирования крупных вихрей (LES).

На рисунке 3.8 представлены распределения аксиальной и тангенциальной компонент скорости при использовании нескольких моделей турбулентности при наличии процесса горения угольной пыли. Модель рейнольдсовых напряжений и модель $k-\omega$ SST Ментера дают схожие результаты, которые незначительно отличаются от результатов расчета при использовании стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных видно, что толщина зоны рециркуляции хорошо предсказывается по результатам расчета, тогда как ее длина значительно короче, чем в эксперименте. Аналогичные результаты были получены в работе [89]. Это можно объяснить сложностью измерения скорости газового потока при наличии дисперсной фазы.

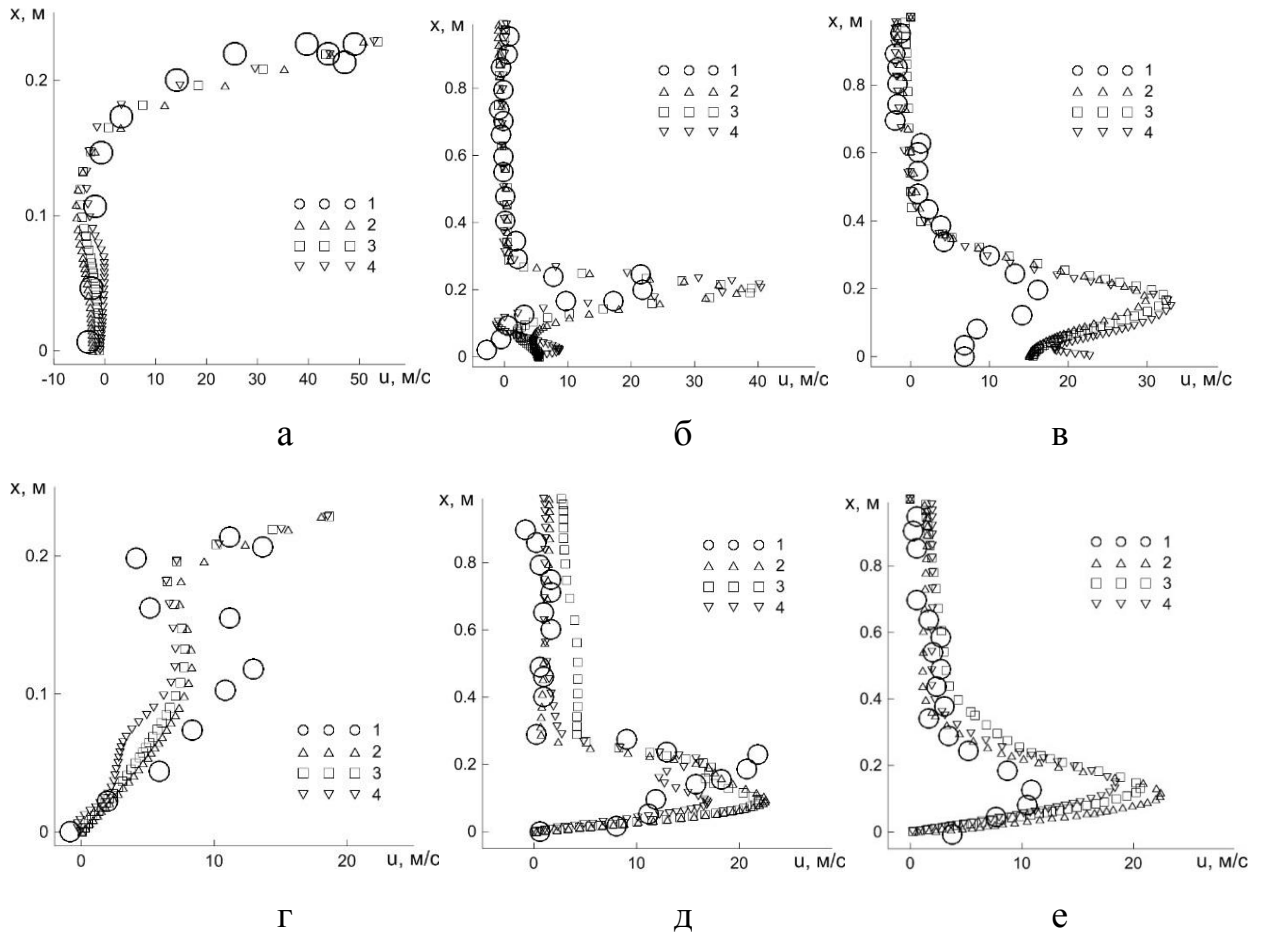


Рисунок 3.8 – Распределение аксиальной компоненты скорости в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м и тангенциальной компоненты скорости в сечениях: г) $z=0$ м, д) $z=0.25$ м, е) $z=0.85$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

Для сравнительного анализа были выполнены расчетные исследования влияния моделей турбулентности на течение газа в рассматриваемом горелочном устройстве в изотермической постановке. На рисунке 3.9 представлено распределение аксиальной и тангенциальной компоненты скорости при использовании нескольких моделей турбулентности. Наблюдаются существенные отличия в распределении скоростей.

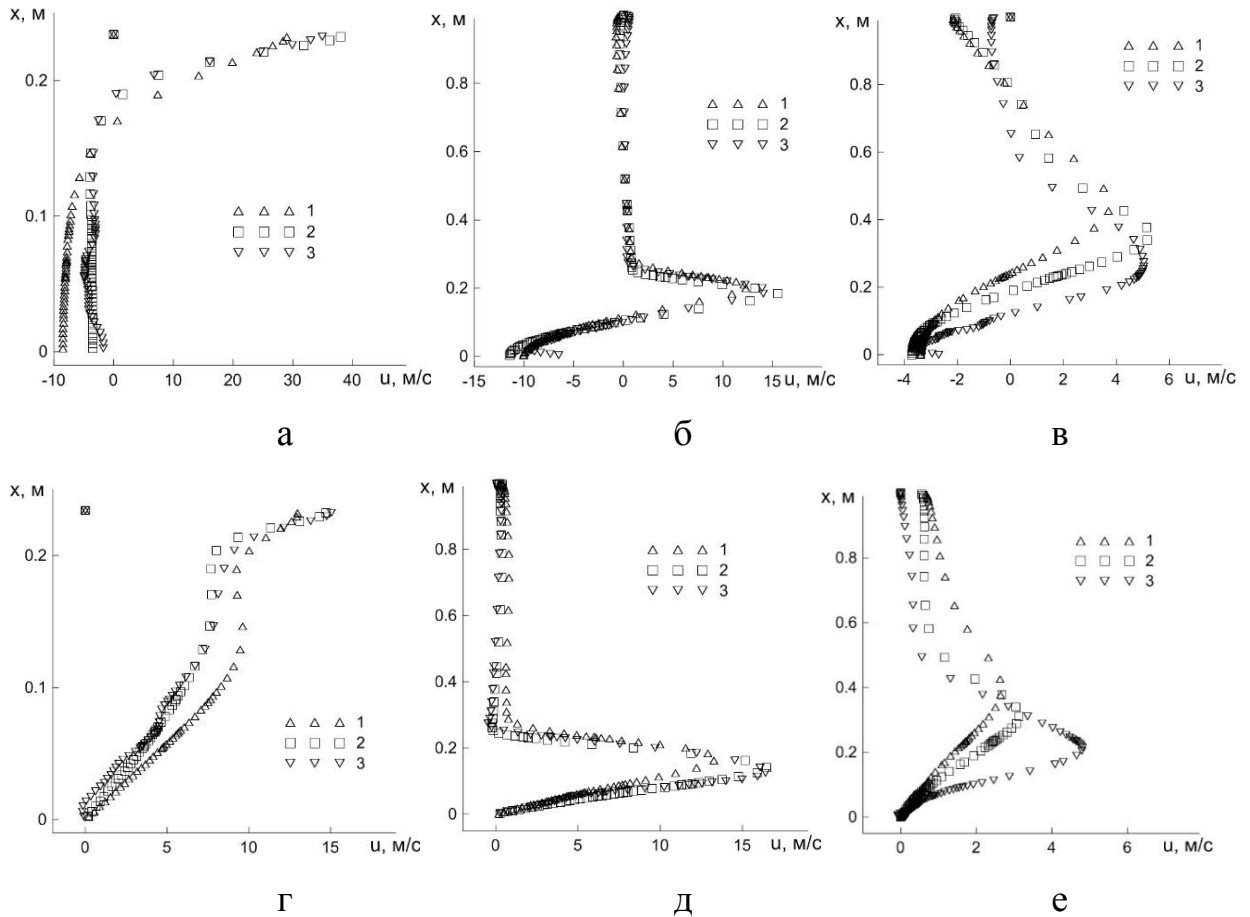


Рисунок 3.9 – Распределение аксиальной компоненты скорости в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м и тангенциальной компоненты скорости в сечениях: г) $z=0$ м, д) $z=0.25$ м, е) $z=0.85$ м. Расчет по моделям $k-\varepsilon$ (1), $k-\omega$ SST (2), RSM (3)

На рисунке 3.10 представлено распределение пульсационной составляющей скорости в трех сечениях. Для моделей турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST Ментера пульсационная составляющая рассчитывалась из выражения $(2k/3)^{0.5}$. Из результатов видно, модель RSM дает более низкий уровень пульсаций скорости и лучше согласуется с экспериментальными данными.

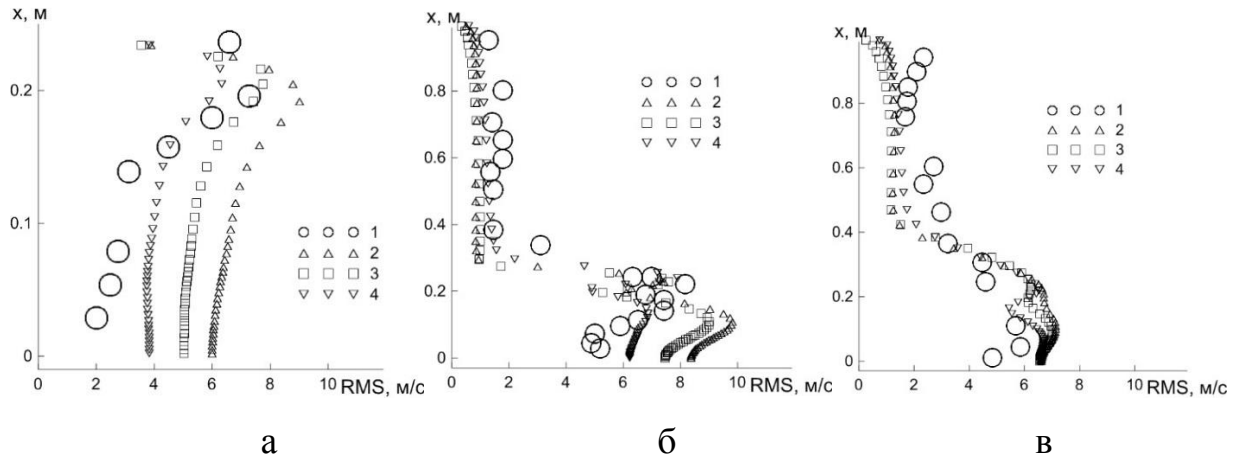


Рисунок 3.10 – Распределение пульсационной составляющей скорости в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

На рисунке 3.11 представлено распределение температур по сечениям топочной камеры. Наибольшие отличия в результатах расчета при разных моделях турбулентности наблюдаются в первом сечении ($z = 0$ м) и на выходе из топочной камеры. Распределения аксиальной и тангенциальной скорости в данном сечении для всех трех моделей имеют одинаковые значения, но имеются различия в пульсационной составляющей скорости. Данное различие, в рамках используемой математической модели, в первую очередь сказывается на расчете скорости горения летучих веществ, где используются турбулентные характеристики потока. В дальнейшем, по длине топочной камеры, значения температур выравниваются при использовании разных моделей.

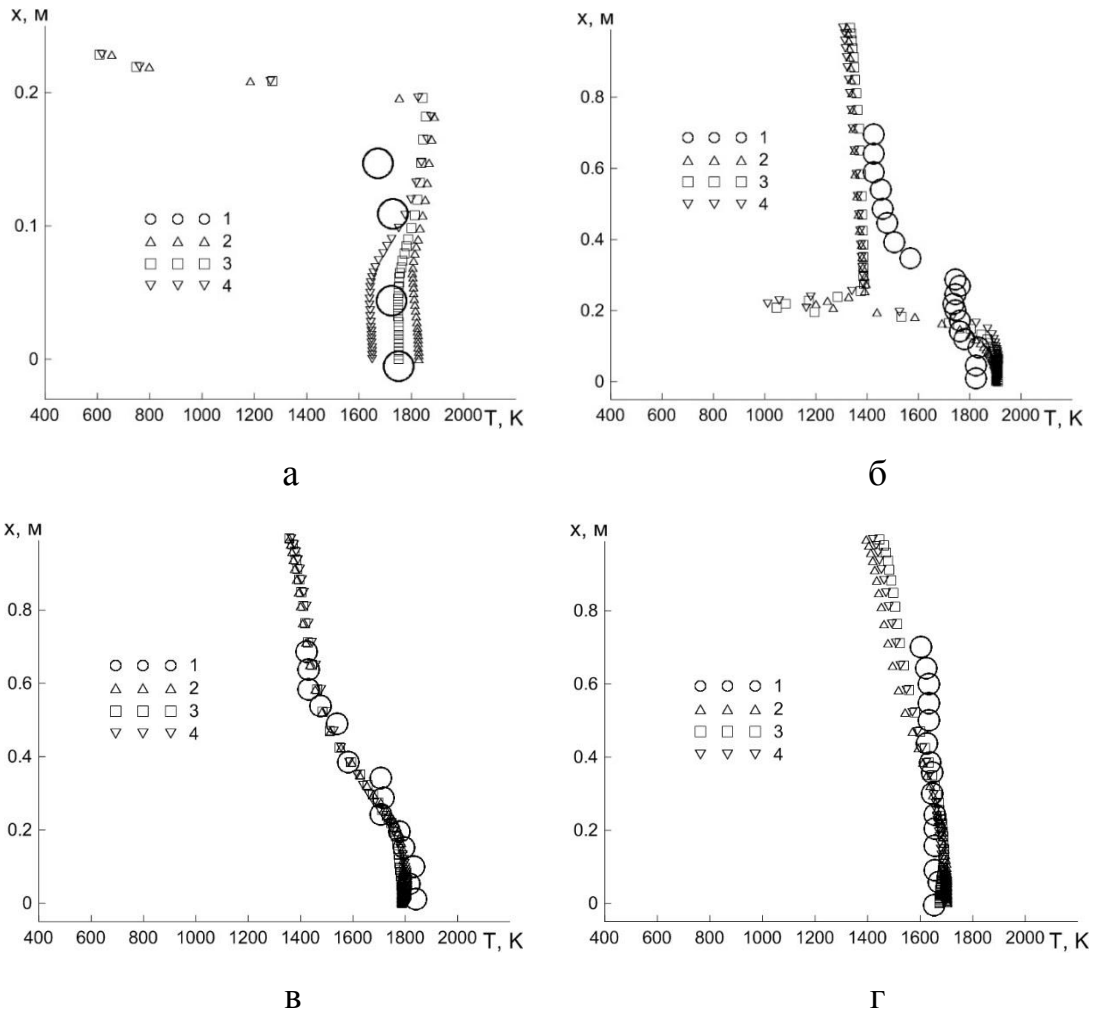


Рисунок 3.11 – Распределение температур в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м, г) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

На рисунках 3.12, 3.13 показано сравнение экспериментальных и расчетных данных по концентрациям кислорода и углекислого газа. Необходимо отметить существенное влияние турбулентных характеристик потока на распределение концентраций газовых компонент в центральной части факела.

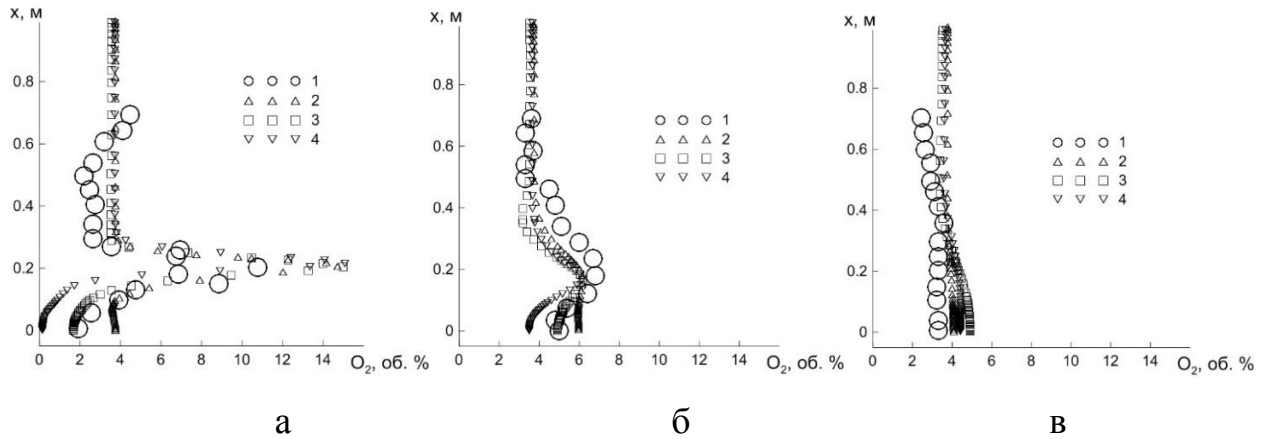


Рисунок 3.12 – Распределение концентрации кислорода в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м, г) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

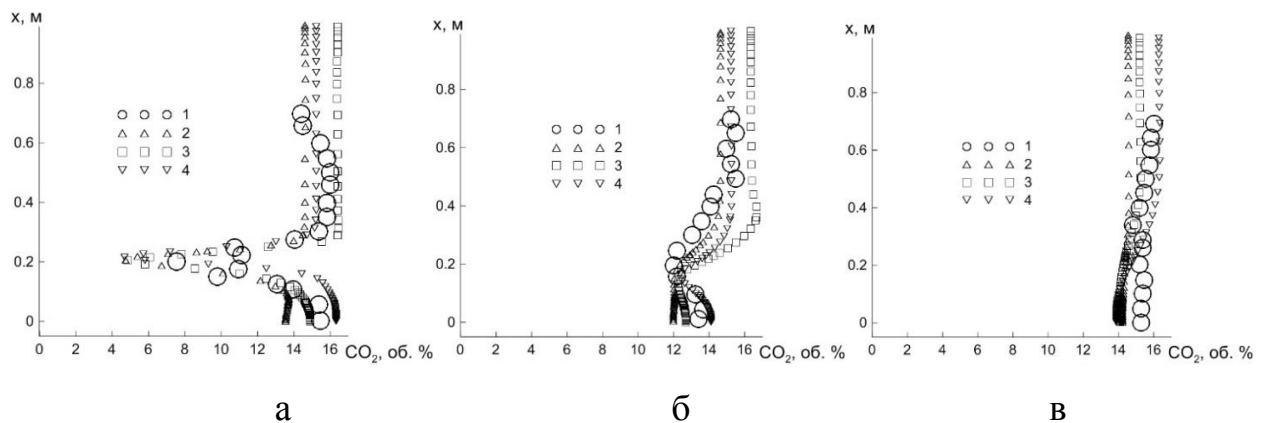


Рисунок 3.13 – Распределение концентрации углекислого газа в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м, г) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям $k-\varepsilon$ (2), $k-\omega$ SST (3), RSM (4)

На рисунке 3.14 представлены значения концентрации оксидов азота в сечениях топочной камеры, на рисунке 3.15 - пульсации температуры. Можно видеть, что при использовании в качестве модели турбулентности модели реинольдсовых напряжений, значения концентрации оксидов азота значительно ниже, чем при использовании двухпараметрических моделей турбулентности и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Для моделей $k-\omega$ SST Менгера и стандартной модели

турбулентности $k-\varepsilon$, значения концентрации оксидов азота превышают экспериментальные значения более чем на 25 %, тогда как для модели Рейнольдсовых напряжений отклонение концентрации NO не превышает 10 % по сравнению с экспериментальными данными.

Это, в первую очередь, объясняется разными значениями пульсаций как для скорости (рисунок 3.10), так и для температуры (рисунок 3.15). Отклонение значений пульсаций для температуры в зависимости от выбора модели составляет около 10 - 30 % в зависимости от рассматриваемого сечения топочной камеры. С учетом экспоненциальной зависимости скорости реакции образования топливных NO от температуры (формулы 2.34-2.36), которые вносят в данном случае основной вклад в образование NO, это является одним из основных факторов в различии результатов расчета.

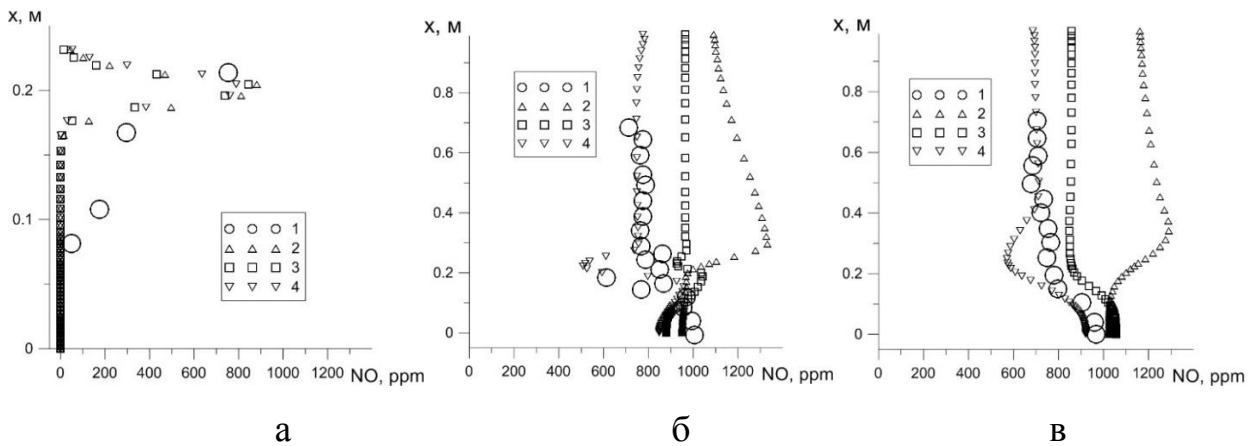


Рисунок 3.14 – Концентрация NO в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, с) $z=0.85$ м. Круги - эксперимент, ромб – $k-\omega$ SST, квадрат – $k-\varepsilon$, треугольник -RSM

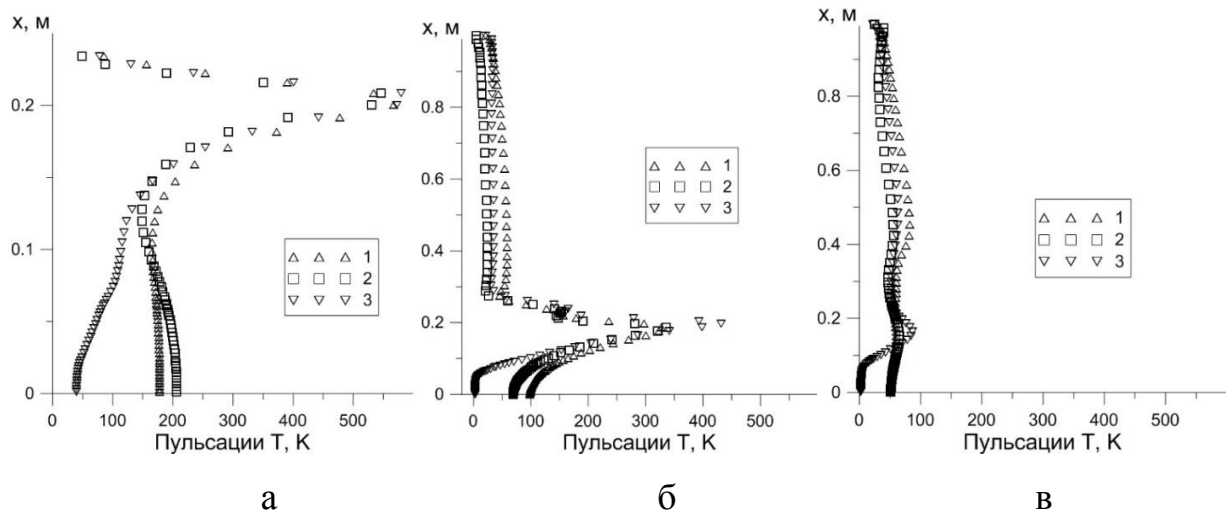


Рисунок 3.15 – Пульсация температуры в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м. Круги - эксперимент, ромб – $k-\omega$ SST, квадрат – $k-\epsilon$, треугольник - RSM

Исследование влияния моделей выхода летучих веществ на результаты расчета

Выбор модели выхода летучих веществ играет основную роль для правильной оценки процесса воспламенения угольной частицы. Существует достаточно много подходов к описанию этого процесса. В данной работе рассмотрены наиболее широко используемые модели выхода летучих веществ. Это одностадийное и двухстадийное приближение процесса, а также модель, основанная на структурной особенности строения угольного вещества.

На основе полученных выше результатов, для дальнейших расчетов была выбрана модель турбулентности RSM. Результаты расчета с использованием разных моделей выхода летучих веществ представлены на рисунках 3.16 – 3.19. Можно видеть, что в общем случае одностадийный, двухстадийный механизмы описания выхода летучих веществ, а также многостадийная модель CPD дают схожие результаты. Это объясняется прежде всего характером течения вблизи горелочного устройства, где существует обратное

течение горячих газов, которое и является основным инициатором воспламенения угольной пыли.

Вместе с тем, имеются и отличия в результатах расчетов. Так, двухстадийная модель с кинетическими константами, предлагаемая в работе [74] дала более плохое соответствие с экспериментальными данными, как по распределению температур (рисунок 3.16), так и по концентрации кислорода (рисунок 3.17) и углекислого газа (рисунок 3.18). При этом результаты расчетов по двухстадийной модели с кинетическими константами из работы [76] хорошо согласуются с экспериментальными данными. В целом, результаты расчётов с разными моделями выхода летучих похожи, за исключением двухстадийной модели с кинетическими константами [74].

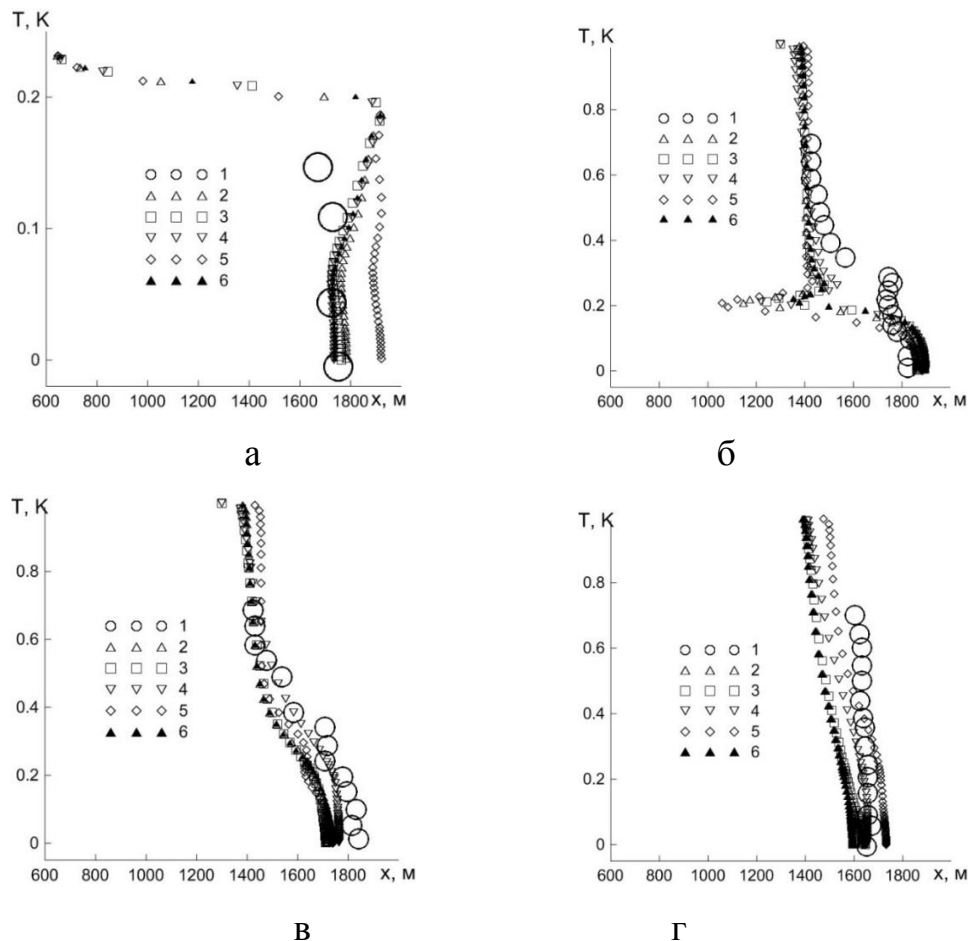


Рисунок 3.16 – Распределение температур в сечениях: а) $z=0$ м, б) $z=0.25$ м, в) $z=0.85$ м, г) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям: одностадийная (2), двухстадийная [76] (3), двухстадийная [75] (4), двухстадийная [74] (5), многостадийная модель CPD (6)

Скорость выхода летучих веществ с использованием параметров [74] для двухстадийной модели значительно отличается от других моделей, что связано, в первую очередь, с распределением между низкотемпературным выходом летучих веществ и термической деструкцией угольного вещества, имеющей место при более высоких температурах (рисунок 3.19). На данном рисунке видно, что если для всех моделей выход летучих локализован на начальном участке факела, то для двухстадийной модели выхода летучих веществ [74] имеются две ярко выраженные области выхода летучих веществ – на начальном участке факела и дальше по потоку. При этом в области факела количество летучих веществ, образующихся из угля по модели [74], больше, чем для остальных моделей, что определяет меньшую концентрацию кислорода и температуры по длине камеры сгорания (рисунок 3.17, 3.18).

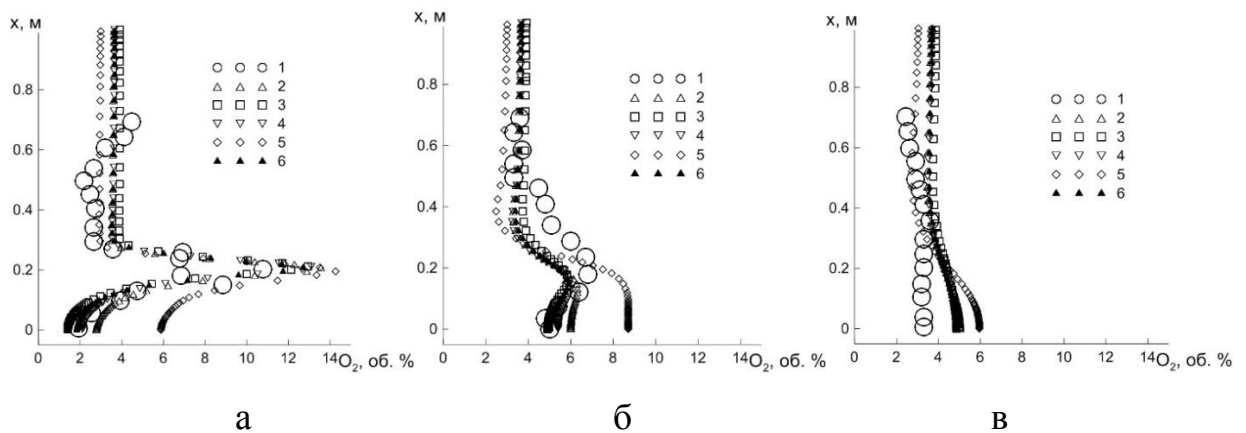


Рисунок 3.17 – Распределение концентрации кислорода в сечениях: а) $z=0.25$ м, б) $z=0.85$ м, в) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям: одностадийная (2), двухстадийная [76] (3), двухстадийная [75] (4), двухстадийная [74] (5), многостадийная модель CPD (6)

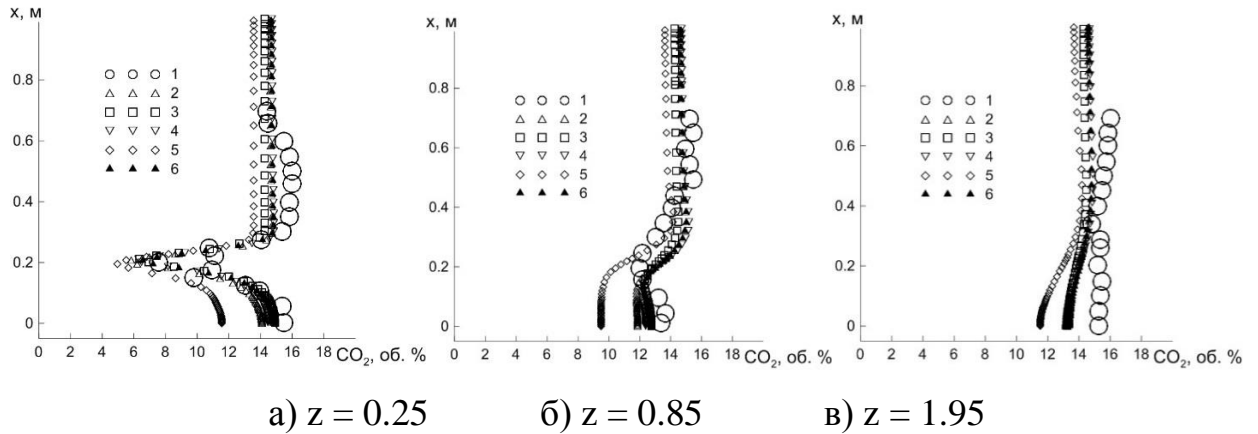


Рисунок 3.18 – Распределение концентрации углекислого газа в сечениях: а) $z=0.25$ м, б) $z=0.85$ м, в) $z=1.95$ м. Эксперимент (1), расчет по моделям: одностадийная (2), двухстадийная [76] (3), двухстадийная [75] (4), двухстадийная [74] (5), многостадийная модель CPD (6)

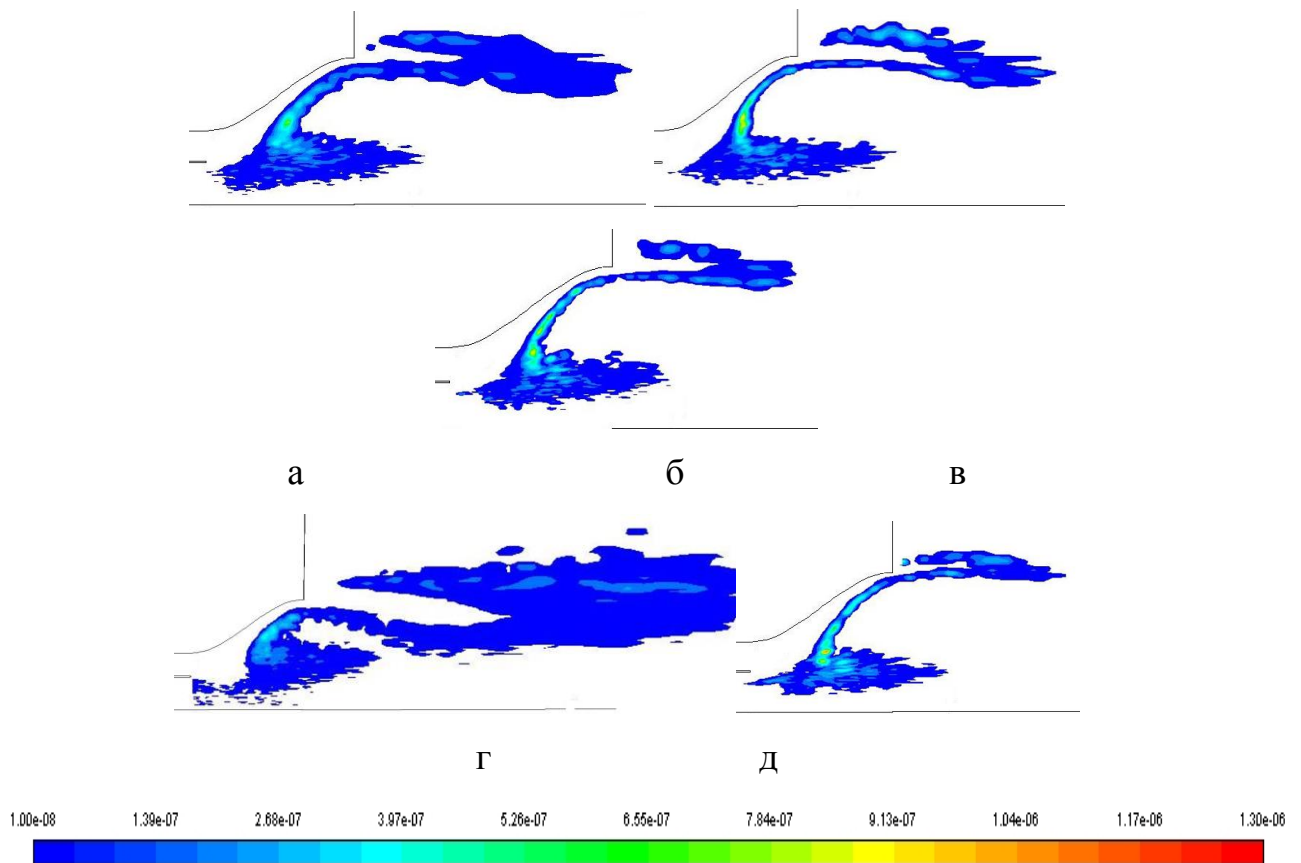


Рисунок 3.19 – Поле скорости выхода летучих веществ в центральном сечении топочной камеры при разных моделях выхода летучих веществ, кг/сек. Одностадийная (а), двухстадийная [76] (б), двухстадийная [75] (в), двухстадийная [74] (г), многостадийная модель CPD (д)

3.2 Конверсия угольной пыли в газификаторе поточного типа

Для верификации математической модели газификации пылеугольного потока был выбран угольный газогенератор поточного типа [98]. Наличие подробных экспериментальных данных делает поточный газификатор Университета Бригама Янга (*Brigham Young University, BYU*) базовым объектом для расчетных исследований и верификации математических моделей [99-101]. Камера газификации имеет длину 180 см и внутренний диаметр 20 см (рисунок 3.20). Пылеугольное топливо подается в камеру газификации вместе со смесью газов (кислород, аргон и водяной пар) через центральный канал горелочного устройства. Вторичный поток, представляющий собой водяной пар, подается по кольцевому каналу. Отбор газов и измерение температур осуществляется через специальные лючки по высоте камеры газогенератора. В таблице 3.3 представлены расходные характеристики газогенератора, в таблице 3.4 – состав угольного топлива (каменный уголь штата Юта). Расчеты выполнены на программном комплексе *Ansys Fluent* [ANSYS Fluent 12.0 User's Guide, 2009.].

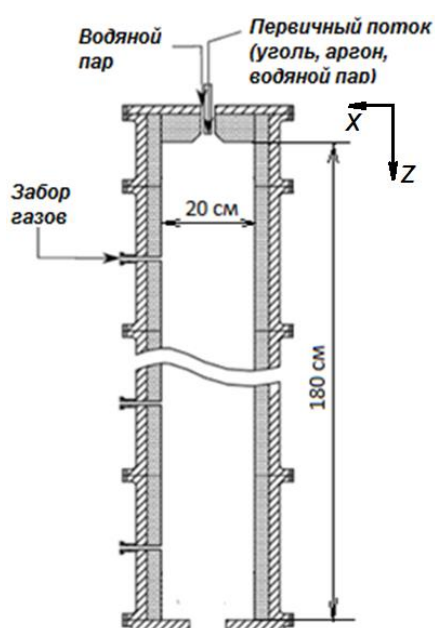


Рисунок 3.20 – Геометрия пылеугольного газификатора [98]

Таблица 3.3 – Расходные характеристики горелочного устройства

Первичный поток						Вторичный поток		
Расход угля, кг/час	Расход газа, кг/час	Состав газа, об. %			T, K	Расход, кг/час	Состав, об. %	T, K
		O ₂	Ar	H ₂ O			H ₂ O	
23,88	26,24	85	12,6	2,4	367	6,62	100	450

Таблица 3.4 – Технический и элементный состав топлива, %

W^r	V^{daf}	A^r	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	$Q_i^{daf},$ МДж/кг
2,4	45,6	8,3	71,0	6,0	1,3	0,5	12,17	29,8

На рисунке 3.21 представлена расчетная геометрия камеры газификатора. После анализа на сеточную сходимость была выбрана расчётная сетка размером 1000000 ячеек.

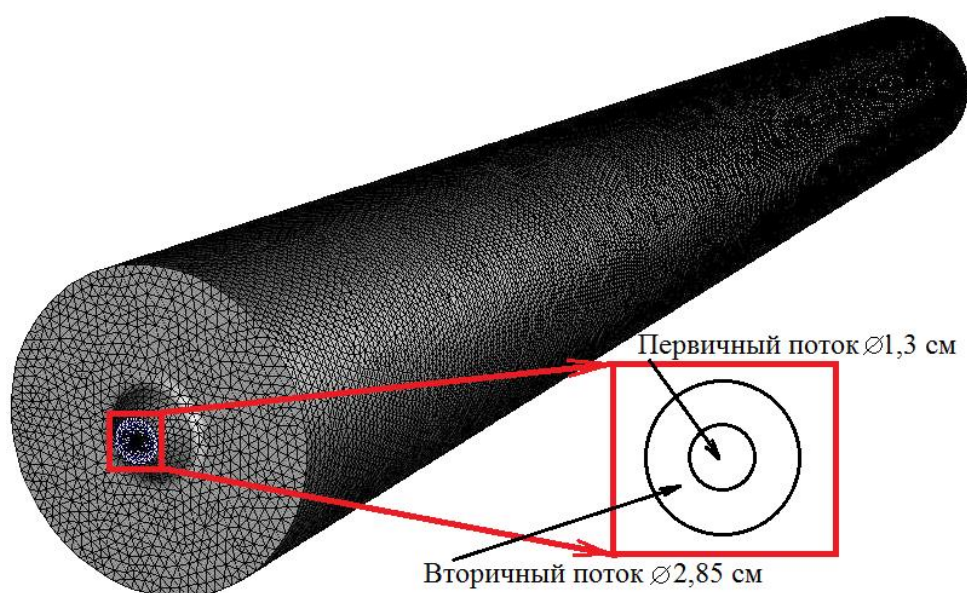


Рисунок 3.21 – Геометрия и расчетная сетка камеры газификатора, 1 млн. ячеек

На рисунке 3.22 представлены параметры течения в центральном сечении камеры газификации, полученные по результатам расчета. Наличие прямого движения и значительных скоростей первичного потока газа на входе в камеру и подача угольной пыли по периферии горелки приводит к разделению факела на начальном участке газогенератора (рисунок 3.22 б). Продукты горения (CO_2 , H_2O), а также продукты газификации угля образуются на границе раздела первичного и вторичного потоков. Наличие обратных токов газа приводит к формированию областей с продуктами горения и газификации на начальном участке камеры. Максимальные температуры в ядре факела достигают 2700 К, что характерно для кислородных газогенераторов.

На рисунке 3.23 представлены распределения концентраций газов – продуктов горения и газификации угольной пыли вдоль камеры по оси. Можно видеть, что концентрации газовых компонентов перестают значительно изменяться на расстоянии 0,5 м от горелки. Сравнивая результаты расчетов и экспериментальные данные, стоит отметить, что в эксперименте на начальном этапе концентрации газов растут более «плавно», чем в расчете. Это может быть объяснено сложной структурой течения на начальном участке струи, сказывающейся на точности измерений. Но при этом состав продуктов газификации, так же, как и в расчете, перестает значительно изменяться на расстоянии 0,5 м от входа в камеру газогенератора.

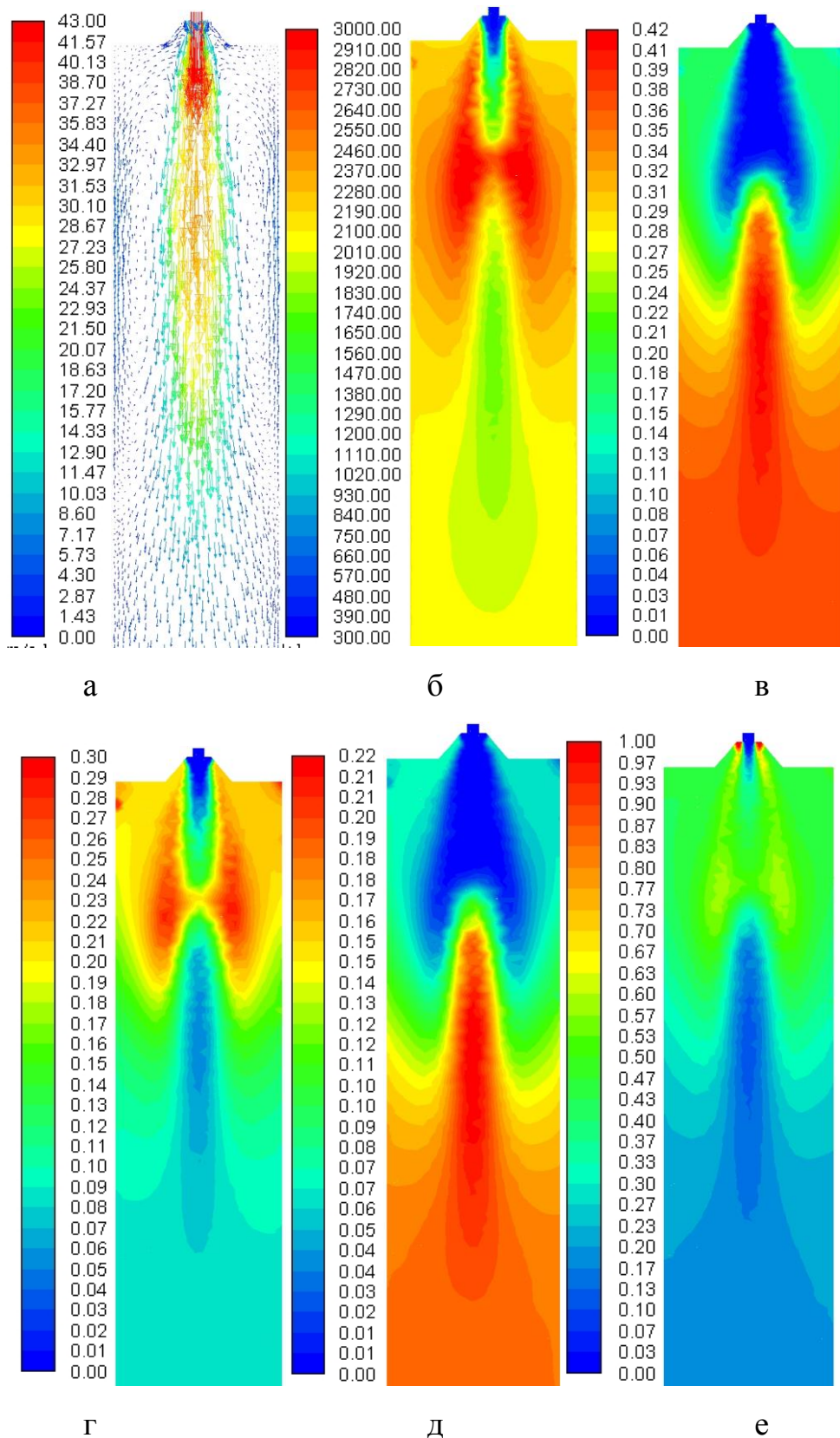


Рисунок 3.22 – Параметры течения в продольном сечении газификатора: а) векторное поле скоростей (m/s); б) поле температур (K); в) концентрация оксида углерода (m^3/m^3); г) концентрация диоксида углерода (m^3/m^3); д) концентрация водорода (m^3/m^3); е) концентрация паров воды (m^3/m^3)

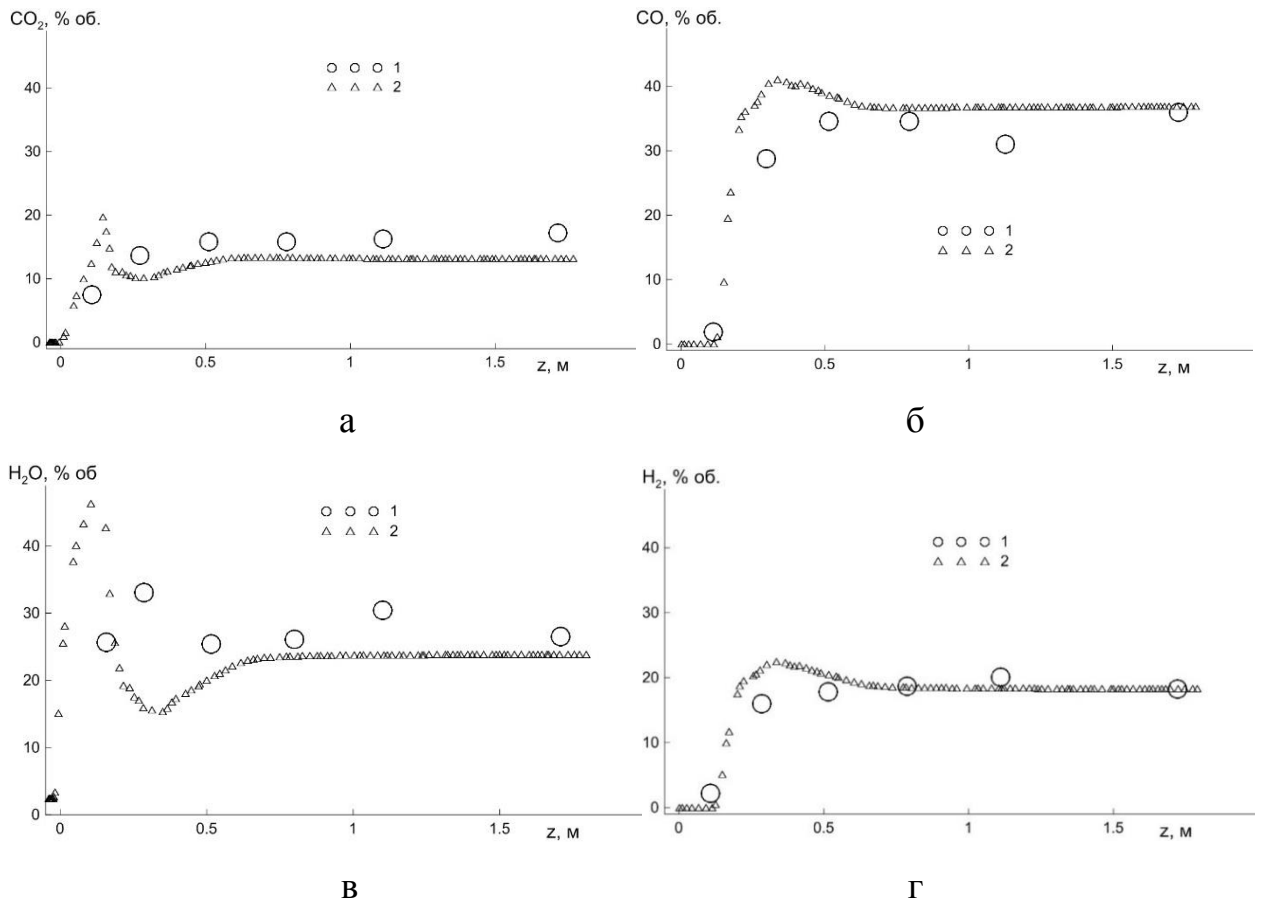
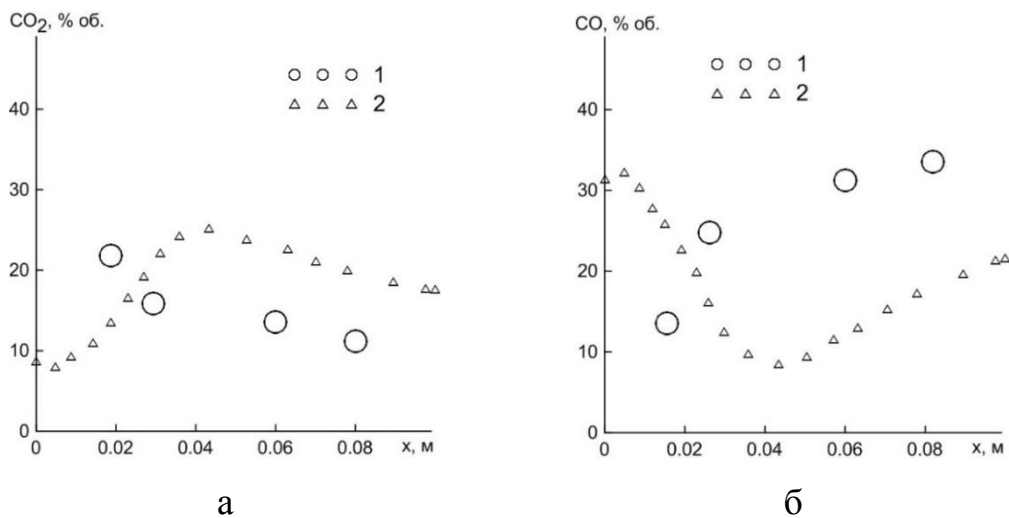
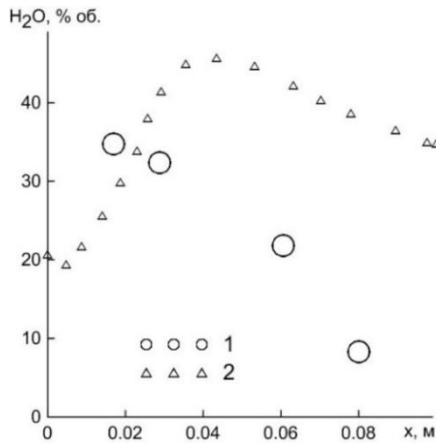


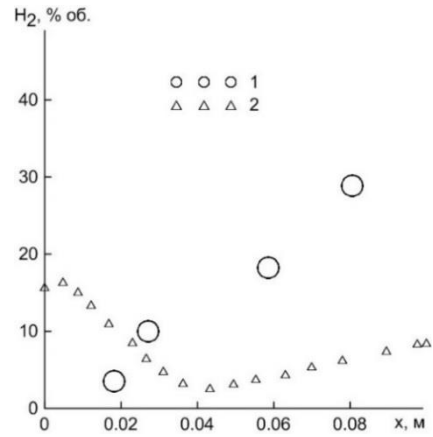
Рисунок 3.23 – Распределение продуктов горения и газификации по оси камеры газификации: а) диоксида углерода; б) оксида углерода; в) водяного пара; г) водорода. 1 – эксперимент, 2 – расчет

На рисунках 3.24–3.26 представлены распределения концентрации газов по радиусу камеры газификации на разных расстояниях от его входа.



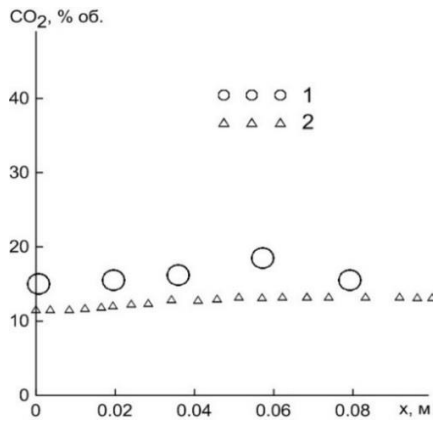


В

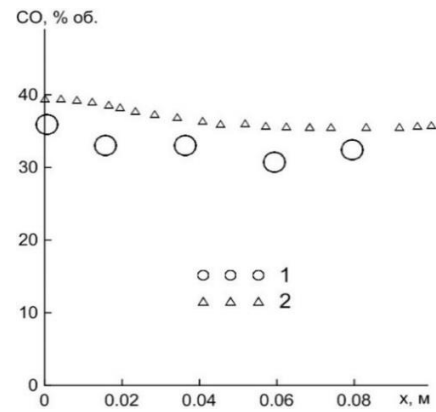


Г

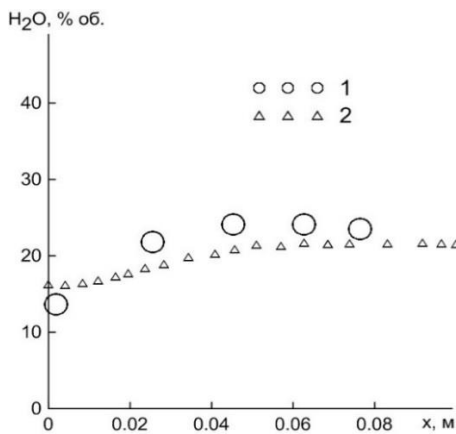
Рисунок 3.24 – Распределение продуктов горения и газификации по радиусу на расстоянии 0,2 м от входа в камеру: а) диоксида углерода; б) оксида углерода; в) водяного пара; г) водорода. 1 – эксперимент, 2 – расчет



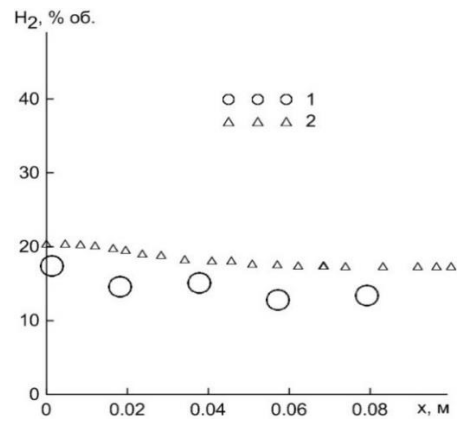
а



б



в



г

Рисунок 3.25 – Распределение продуктов горения и газификации по радиусу на расстоянии 0,51 м от входа в камеру: а) диоксида углерода; б) оксида углерода; в) водяного пара; г) водорода. 1 – эксперимент, 2 – расчет

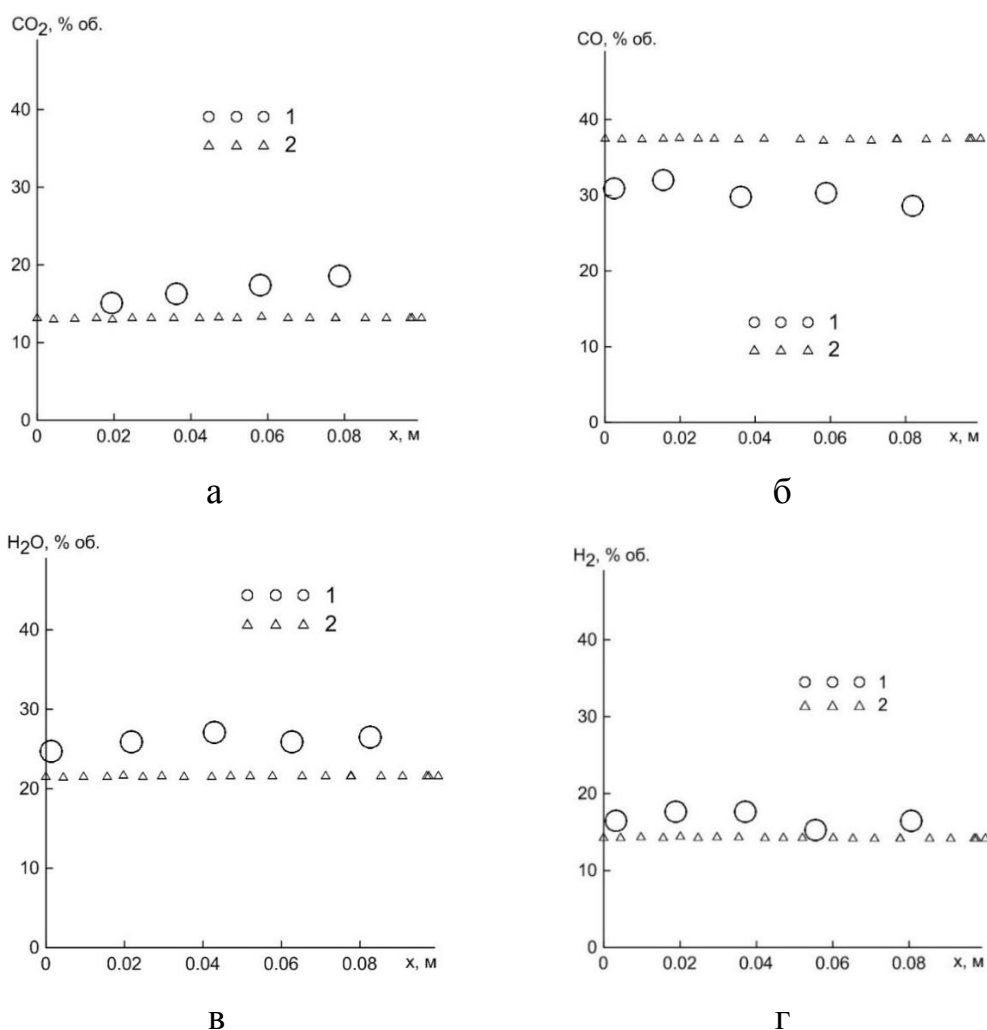


Рисунок 3.26 – Распределение продуктов горения и газификации по радиусу на расстоянии 1,12 м от входа в камеру: а) диоксида углерода; б) оксида углерода; в) водяного пара; г) водорода. 1 – эксперимент, 2 – расчет

По результатам расчета можем видеть удовлетворительное совпадение результатов моделирования процесса газификации в поточном реакторе с результатами экспериментальных данных.

3.3 Сжигание водоугольного топлива на огневом стенде

Для верификации математической модели горения водоугольного топлива был выбран огневой стенд СибВТИ [102]. К основным элементам

огневого стенда относится вертикальная топочная камера диаметром 0,4 м и длиной 6 м. На рисунке 3.27а показаны горелочное устройство (1), лючки для зондирования (2), водяное охлаждение (3), обмуровка (4). В опытах использовалась пневматическая форсунка для распыливания ВУТ. Испытания сжигания водоугольного топлива проводились на стендовой установке в условиях близких к адиабатическим. В работе [102] представлены результаты эксперимента для двух типов ВУТ, приготовленных на основе Ерковецкого угля и Ирша-бородинского. Содержание воды в ВУТ для обоих случаев составляло 57,5 %.

Результаты расчетов получены с использованием специализированной версии программы «SigmaFlame». Данная программа была разработана на основе универсального CFD пакета программ «SigmaFlow» [103]. Пакет программ «SigmaFlame» ориентирован на расчет топочных камер и имеет специализированный редактор задания граничных условий и специализированный редактор для построения расчетных сеток. Геометрия и расчетная сетка огневого стенда представлена на рисунке 3.27б. В центральном канале подавалось водоугольное топливо с первичным воздухом, в кольцевом канале подавался вторичный воздух.

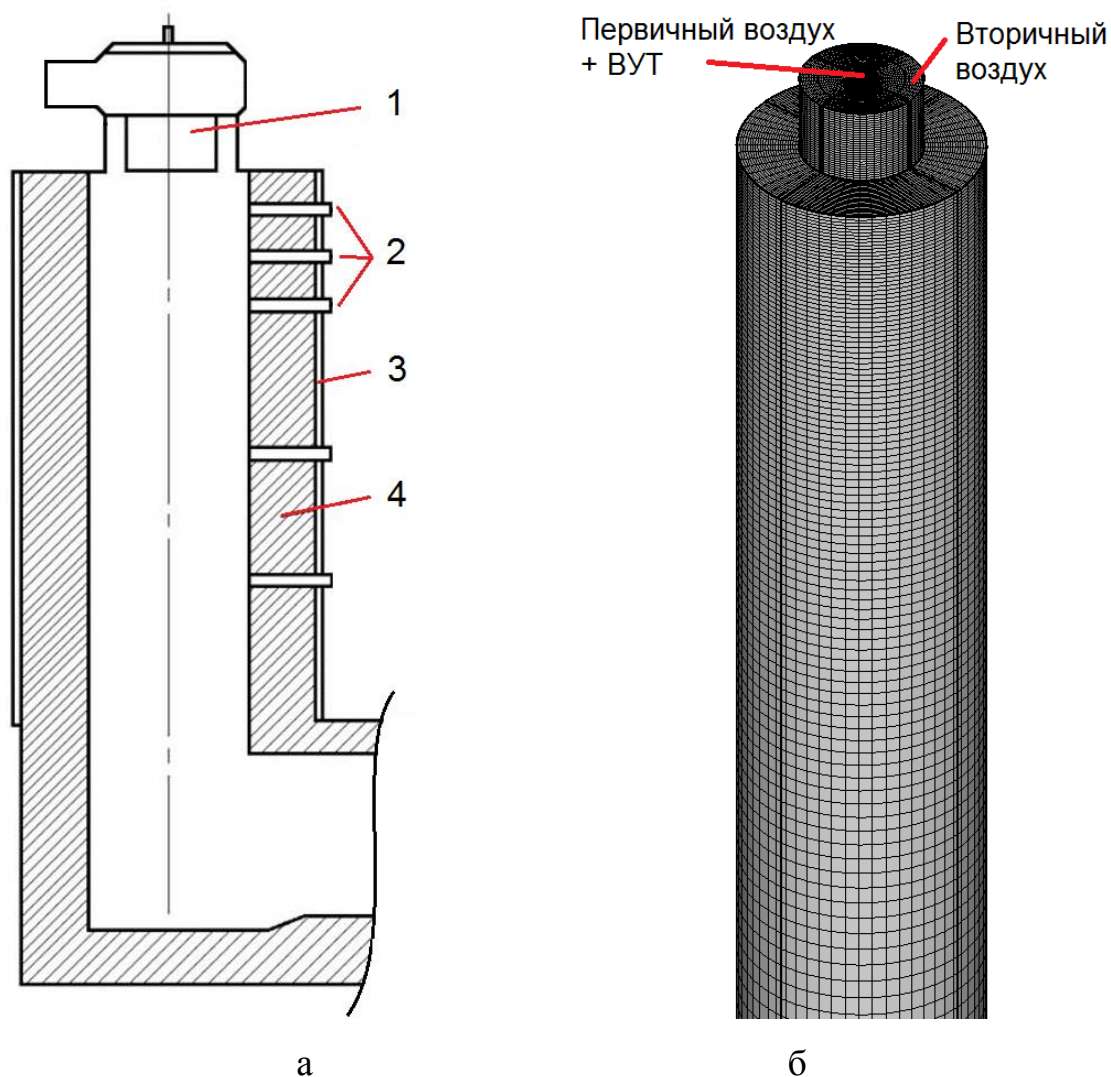


Рисунок 3.27 – Огневой стенд СибВТИ (а) и расчетная сетка 500 тыс. ячеек (б)

Во время испытаний по сжиганию ВУТ Ерковецкого угля были следующие режимные параметры: расход топлива $B = 0.051$ кг/с; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,06$; температура вторичного воздуха $t_{вв} = 230-260$ °С; температура топлива $t = 15-20$ °С. Характеристики Ерковецкого угля: низшая теплота сгорания $Q^r = 12,6$ МДж/кг; влажность $W^r = 31,9$ %; зольность $A^r = 14,5$ %; содержание углерода $C^r = 37$ %; водорода $H^r = 2,4$ %; азота $N = 0,5$ %; серы $S^r = 0,1$ %; выход летучих веществ на горючую массу $V^{daf} = 47,9$ %; фракционный состав $R_{200} = 8,7-12,5$ %, $R_{100} = 23,5-26,5$ %.

Исследовано влияние детализации сетки на результаты расчёта. Для анализа на сеточную сходимость были выбраны расчётные области размером

200 тыс., 500 тыс. и 800 тыс. ячеек со сгущением в области расположения форсунки для более детального описания процесса распыливания водоугольного топлива. На рисунке 3.30, 3.31 представлены результаты расчетов в виде распределения температуры газов и объемной концентрации кислорода по оси камеры при горении водоугольного топлива в топке огневого стенда для нескольких вариантов, отличающихся количеством расчетных ячеек. При размере сетки более 500000 ячеек не наблюдается существенных отличий в результатах расчетов.

По результатам моделирования процесса сжигания ВУТ Ерковецкого угля на огневом стенде можем видеть удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными (рисунок 3.28, 3.29). Сравнивая результаты, стоит отметить, что в эксперименте на начальном этапе температура растет более «плавно», чем в расчете. Это может быть объяснено разной скоростью воспламенения топлива из-за отличий в сложной структуре течения при распыле ВУТ в расчете и в эксперименте. Но при этом, начиная с расстояния 0,8 м от входа в камеру, интенсивность изменения температуры в расчете совпадает с экспериментальной и отклонение концентрации кислорода не превышает 1%.

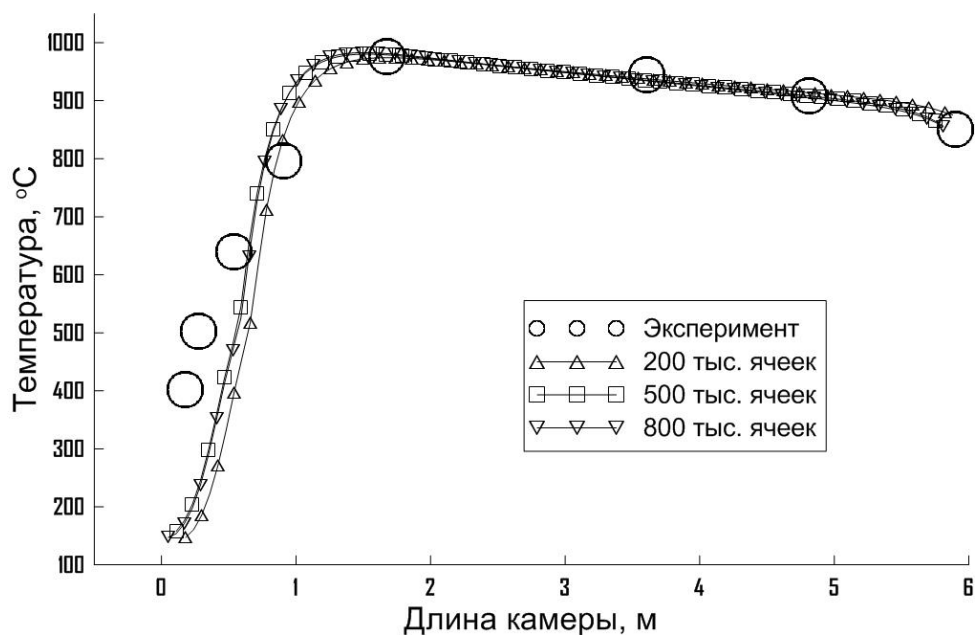


Рисунок 3.28 – Распределение температура газов по оси камеры

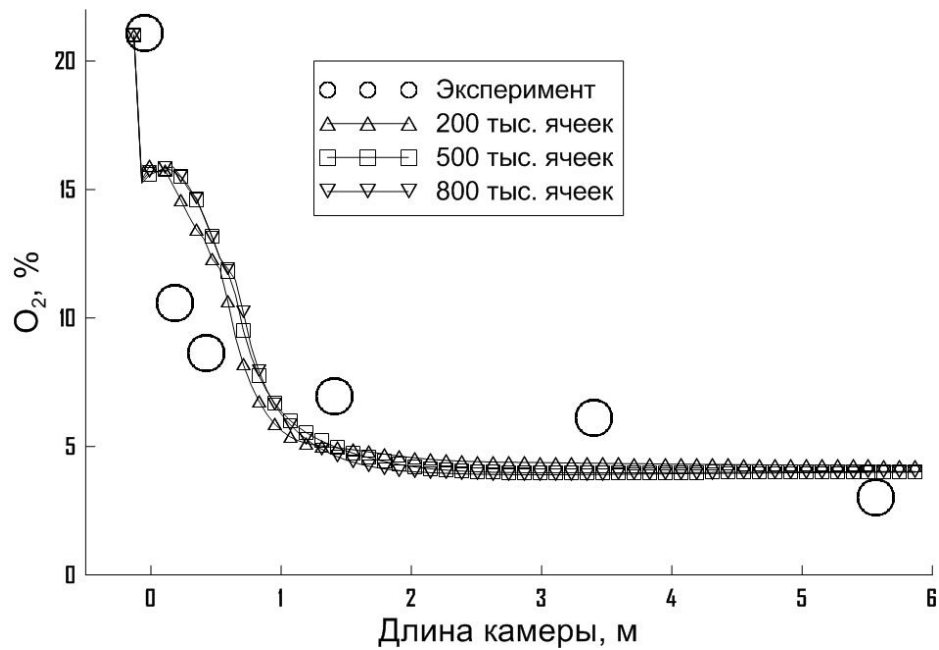


Рисунок 3.29 – Распределение объемной концентрации кислорода по оси камеры

На рисунке 3.30 представлены параметры течения в центральном сечении камеры огневого стенда, полученные по результатам расчета сжигания ВУТ (Ерковецкого угля). На начальном участке камеры происходит активное выгорание частиц ВУТ, что приводит к быстрому росту температуры. Максимальные температуры в камере достигают $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, что характерно для сжигания водоугольного топлива. Продукты горения (CO_2 , H_2O) образуются в области активного горения, концентрация водяного пара увеличивается раньше за счет испарения капель ВУТ. Наличие обратных токов газа приводит к формированию областей с продуктами горения на начальном участке камеры.

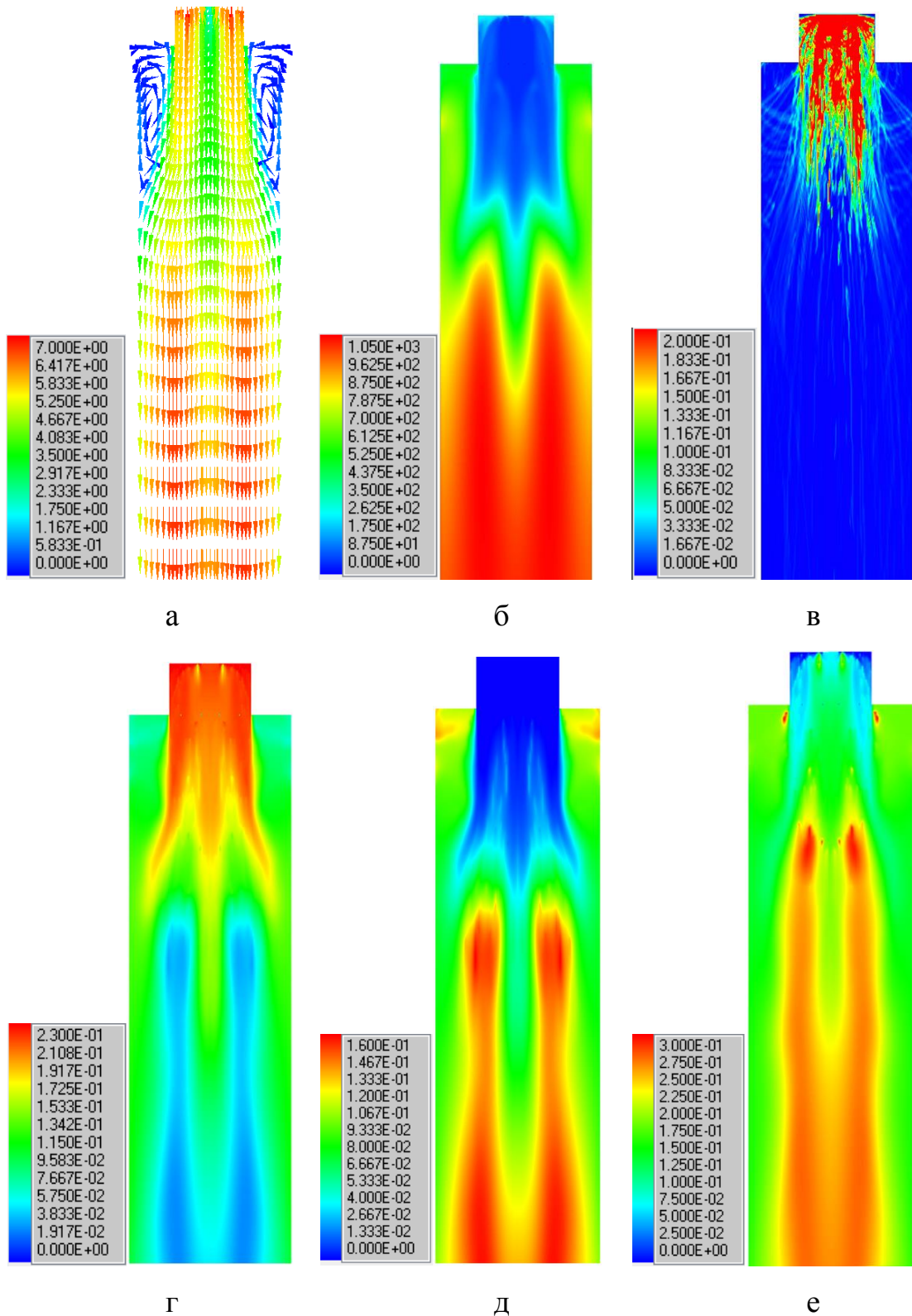


Рисунок.3.30 – Параметры течения в центральном сечении камеры огневого стенда: а – векторное поле скоростей (м/с), б – температурное поле (°C), в – концентрация частиц ВУТ (кг/кг), г – концентрация O_2 (кг/кг), д – концентрация CO_2 (кг/кг), е – концентрация H_2O (кг/кг)

На рисунке 3.31, 3.32 приведено сравнение результатов расчета с экспериментом по сжиганию ВУТ Ирша-бородинского угля для следующих режимных параметров: расход топлива $B = 0.051$ кг/с; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,16$; температура вторичного воздуха $t_{вв} = 230-260$ °С; температура топлива $t = 15-20$ °С. Характеристики Ирша-бородинского угля: низшая теплота сгорания $Q_r = 20,3$ МДж/кг; влажность $W_r = 14,7$ %; зольность $A_r = 11,1$ %; выход летучих веществ на горючую массу $V_{daf} = 47,7$ %; фракционный состав $R_{200} = 6,7$ %, $R_{100} = 27,8$ %.

Сравнение результатов моделирования процесса сжигания ВУТ Ирша-бородинского угля на огневом стенде с экспериментальными данными показало удовлетворительное совпадение.

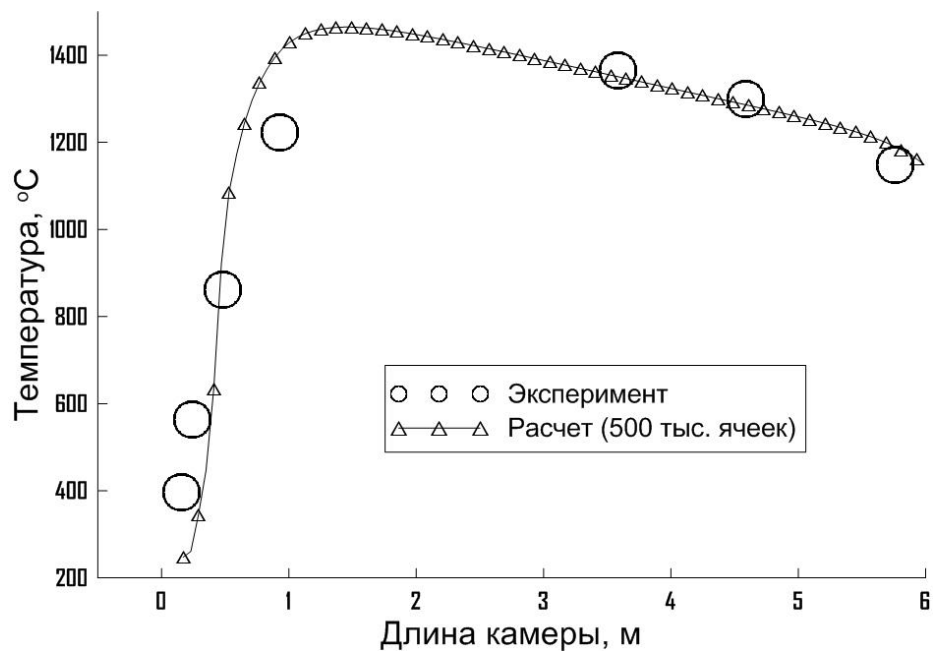


Рисунок 3.31 – Распределение температуры газов по оси камеры

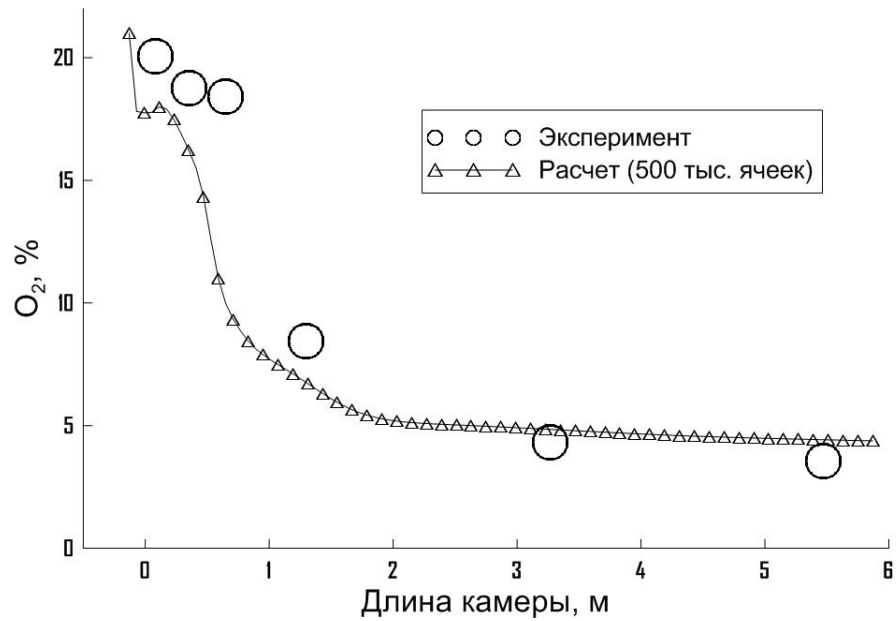


Рисунок 3.32 – Распределение объемной концентрации кислорода по оси камеры

На рисунке 3.33 показано сравнение экспериментальных данных и результатов расчета по степени выгорания ВУТ по оси камеры для двух типов ВУТ. В эксперименте степень выгорания ВУТ определялась как $\psi = 1 - q_4$ (где q_4 – потери тепла с механическим недожегом топлива). В расчете – по интегральному значению количества углеродного остатка в топливных частицах. Степень выгорания угольного топлива в расчете удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

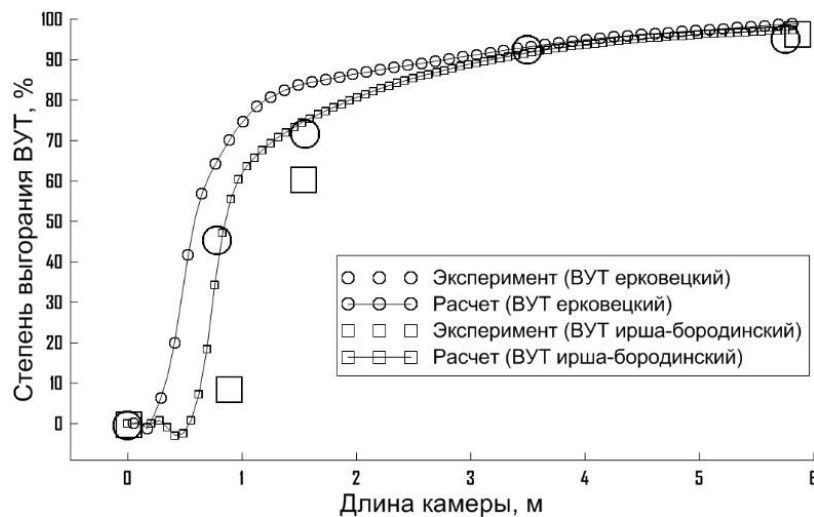


Рисунок 3.33 – Степень выгорания ВУТ по оси камеры

Выводы по главе 3

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

Показано, что выбор модели турбулентности при расчете горения пылеугольного топлива с закруткой потока значительно влияет на распределение среднеквадратичных значений пульсаций скорости. Это в свою очередь приводит к различию при описании процессов выгорания газообразных компонентов и образования оксидов азота.

Сравнительный анализ влияния моделей выхода летучих веществ на процессы воспламенения и горения пылеугольного топлива в топочной камере с вихревой горелкой показал, что выбор данных моделей и эффективных кинетических констант может оказать существенное влияние на результаты расчетов.

Результаты верификации комплексной математической модели процессов гидродинамики, теплообмена и кинетики термохимических превращений топлива при горении и газификации угольного топлива показали, что выбранная модель, основанная на RANS подходе, удовлетворительно описывает основные параметры процесса переработки угля.

ГЛАВА 4 ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБАХ ПЕРЕРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

4.1 Пути усовершенствования перспективного поточного газогенератора на проектном топливе

Модернизация двухстадийных реакторов направлена на повышение эффективности путем создания активных гидродинамических режимов с разделением сред и сочетанием спутно-реверсивных вихревых структур, что позволяет поднять градиенты температур, концентраций, давлений, интенсифицировать процессы тепломассопереноса, минимизировать застойные зоны, повысить в целом удельные показатели работы реактора. Одним из примеров таких газификаторов является двухстадийный газификатор EAGLE (Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity) [37], [104-106]. В настоящий момент разработаны промышленные образцы данных газификаторов производительностью 150 т/день на кислородном дутье [104, 105]. Принцип работы газификатора EAGLE подробно описан в главе 1.3.

Данная технология газификации может быть использована для создания эффективного двухстадийного реактора конверсии твердого топлива для угольной ПГУ. Основные изменения, которые предлагается внести в технологию газификации EAGLE, это: использование Кузнецкого угля, воздушная двухстадийная газификация с присадкой водяного пара, увеличенная производительность по топливу – 1700 т/день.

Состав Кузнецкого угля, используемый для расчета, представлен в таблице 4.1. Предлагаемая схема газификатора, его размеры представлены на рисунках 4.1, а также в таблице 4.2. В таблице 4.3 – расходные характеристики. Расход воздуха для газификации был выбран исходя из предельного избытка воздуха 0.32. Дутье нижнего яруса горелок обогащено кислородом ($O_2=25\%$, об.). В верхний ярус горелок вместе с воздухом подается пар из расхода 0,137

кг пара/кг угля. Подача угольной пыли осуществляется транспортирующим газом в виде азота по внутреннему каналу горелки. Воздух подается по кольцевому каналу горелки.

Таблица 4.1 – Технический и элементный анализ Кузнецкого угля

уголь	W^a , %	A^d , %	V^d , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %	Q_s^{daf} , ккал/кг
Кузнецкий	5,4	22,3	34,7	75,57	5,66	1,78	0,55	16,44	7086

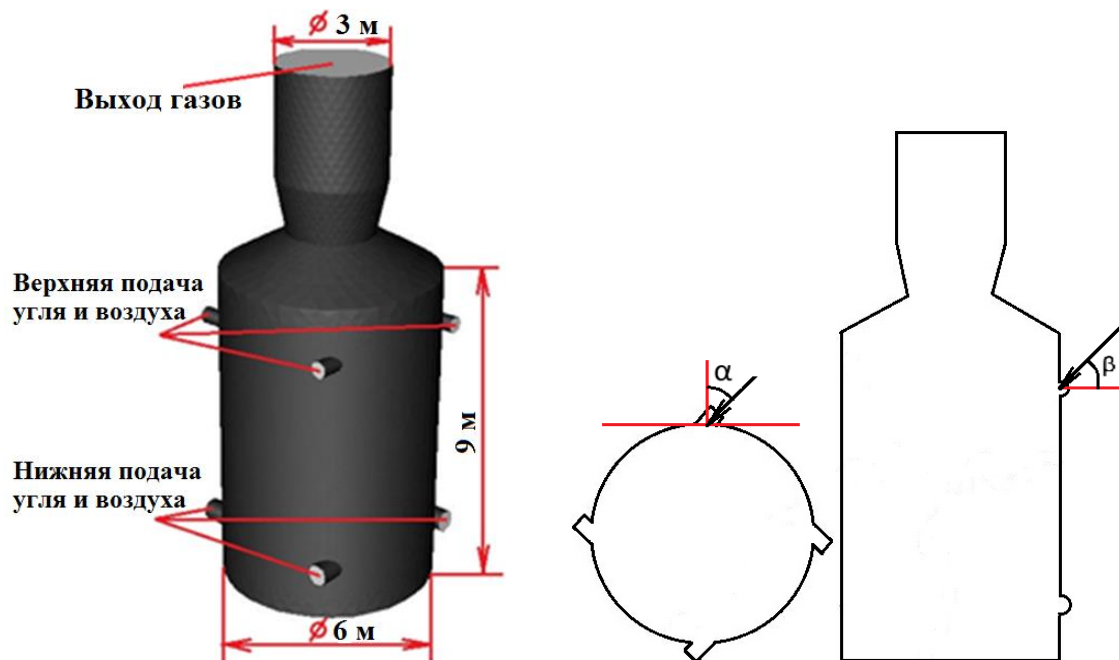


Рисунок 4.1 – Расчетная геометрия газификатора EAGLE и углы поворота горелок

Таблица 4.2 – Размеры горелок газификатора

Количество форсунок на ярусе	4 шт
Радиус нижнего и верхнего канала для азота	0.06 м
Радиус верхнего кольцевого канала для воздуха	0.07 / 0.28 м (внутреннего/внешнего)
Радиус нижнего кольцевого канала для воздуха	0.07 / 0.6 м (внутреннего/внешнего)

Таблица 4.3 – Расходные характеристики газификатора

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

Было рассмотрено несколько вариантов организации двухстадийного процесса газификации. Исходные данные представлены в таблице 4.4. Для сравнительного анализа было рассмотрено влияние угла поворота верхних горелок в горизонтальной и вертикальной плоскости на тепло и - массообменные процессы в камере, а также на состав газов на выходе.

Задача решается в трёхмерной постановке. Расчетная сетка составляла 1,5 млн. ячеек со сгущением в области расположения горелок (рисунок 4.2). Задача решалась на программном пакете Ansys Fluent [ANSYS Fluent 12.0 User's Guide, 2009.].

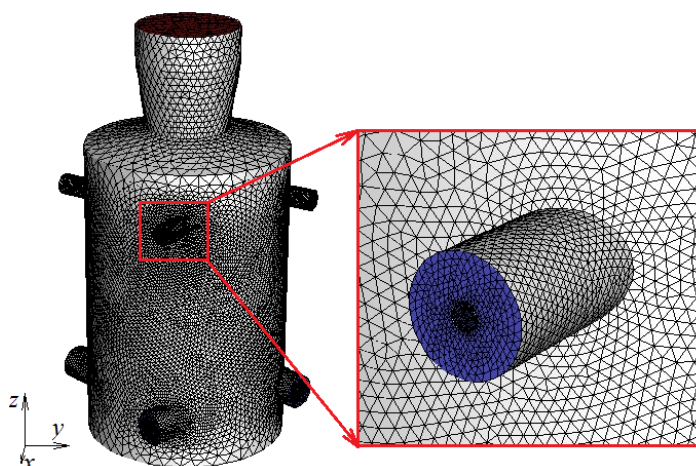


Рисунок 4.2 – Расчетная сетка газификатора, 1,5 млн. ячеек

Таблица 4.4 – Варианты организации процесса газификации

№	Угол наклона нижних горелок $\alpha_{г}$, градус	Угол наклона нижних горелок $\beta_{г}$, градус	Угол наклона верхних горелок $\alpha_{г}$, градус	Угол наклона верхних горелок $\beta_{г}$, градус	Скорость потока на нижних горелках, м/с	Скорость потока на верхних горелках, м/с	Коэффициент избытка воздуха α
1	45	0	30	0	~30	~60	0.32
2	45	0	45	0	~30	~60	0.32
3	45	0	60	0	~30	~60	0.32
4	45	0	30	15	~30	~60	0.32
5	45	0	45	15	~30	~60	0.32
6	45	0	60	15	~30	~60	0.32

На рисунке 4.3 представлены поля аксиальной компоненты скорости в центральном сечении камеры газификации. Видно, что при увеличении угла поворота верхних горелок $\alpha_{г}$ от 30 до 60 градусов происходит увеличение скорости движения газов вниз вдоль стенок камеры. В нижней центральной части камеры, при увеличении данного угла, наблюдается подвод холодных газов со снижением температуры в данной области. Изменение угла поворота горелок на 15 процентов вниз (угол $\beta_{г}$, варианты 4-6, рисунок 4.4) не приводит к существенному отличию в распределении скоростей по сравнению с углом $\beta_{г} = 0^{\circ}$ (варианты 1-3, рисунок 4.4).

На рисунке 4.4 представлено сравнение профиля аксиальной скорости поперек камеры на разных высотах. Из рисунка видно, что при угле 30° (вариант 1) по сравнению с углами $\alpha_{г}$, равными 45° и 60° (варианты 2, 3), наблюдается менее интенсивное движение газов вниз, но при этом скорость восходящего потока при $\alpha_{г}=30^{\circ}$ составляет около 12 м/с, тогда как для углов $\alpha_{г}=45^{\circ}$ и 60° скорость восходящего потока по центру не превышает 5 м/с (рисунок 4.4). Скорость нисходящего потока вблизи стенок газогенератора

увеличилась на 6 м/с при увеличении угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов.

Различие в скорости восходящего потока приводит к различию в формировании высокотемпературной области в камере газификации (рисунок 4.5). Более высокие скорости (для угла $\alpha_r=30^\circ$, варианты 1, 4) приводят к удлинению высокотемпературной области в камере. Также более интенсивное движение нисходящих потоков холодного газа (при углах $\alpha_r=45$ и 60° , варианты 2, 5 и 3, 6 соответственно) способствуют снижению температур в центре нижней части камеры, за счет подвода в данную область холодных газов.

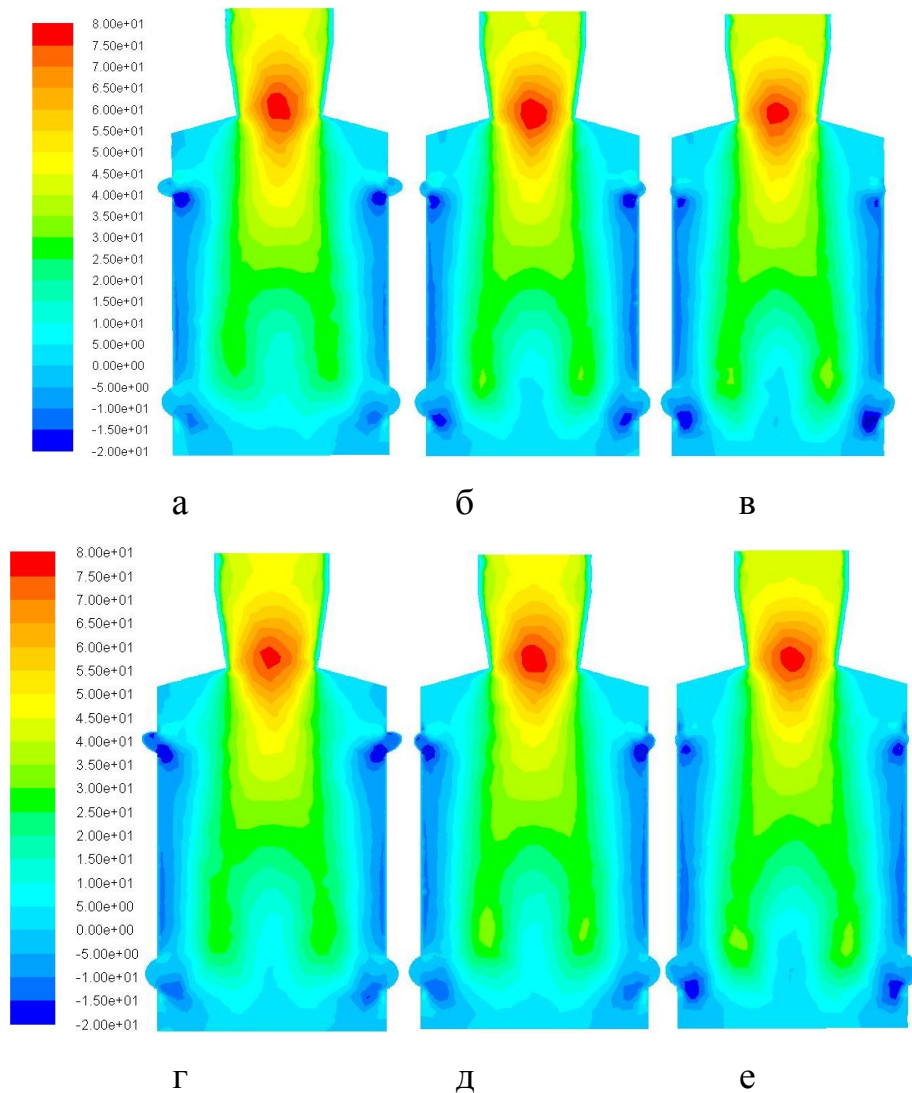


Рисунок 4.3 – Распределение поля аксиальной скорости в продольном сечении газификатора, м/с: а) вариант 1, б) вариант 2, в) вариант 3, г) вариант 4, д) вариант 5, е) вариант 6

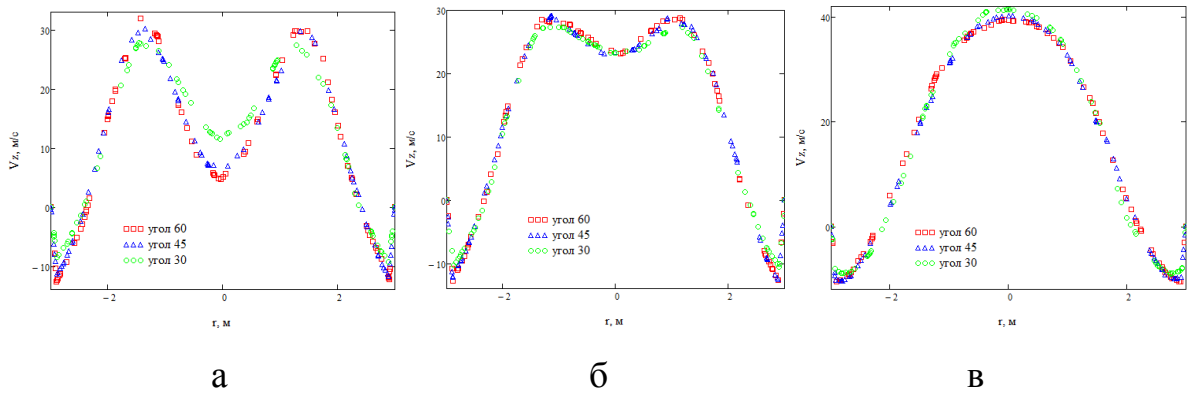


Рисунок 4.4 – Распределение аксиальной скорости в поперечных сечениях газификатора на разных высотах от низа камеры: а) 2.5 м, б) 4.5 м, в) 6.5 м

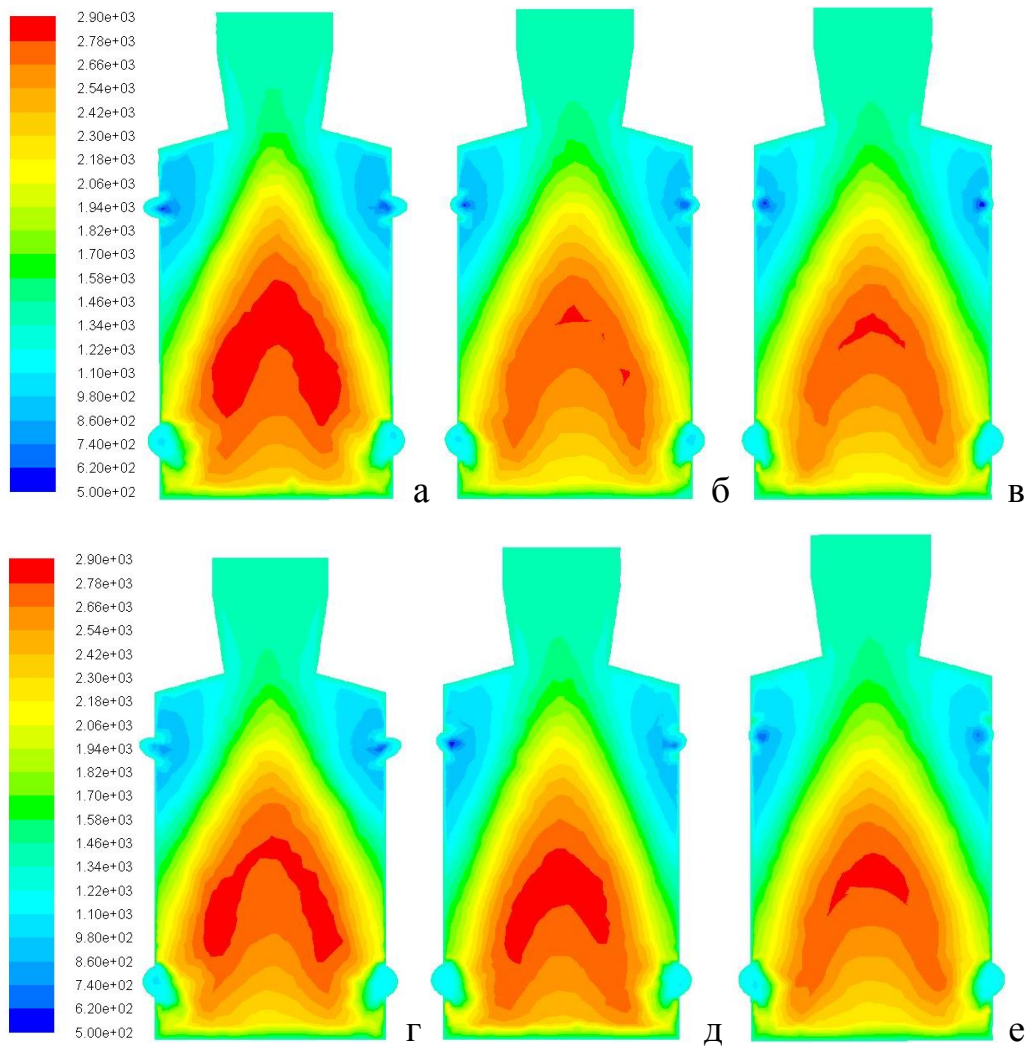


Рисунок 4.5 – Распределение температур в продольном сечении газификатора, К. а) вариант 1, б) вариант 2, в) вариант 3, г) вариант 4, д) вариант 5, е) вариант 6

Результаты расчетных исследований в виде состава генераторного газа на выходе из камеры представлены в таблице 4.5. Сравнительный анализ показывает, что для угла $\beta_{\Gamma} = 0^{\circ}$ не отмечается влияние изменения угла α на состав газов. С другой стороны, при угле $\beta_{\Gamma} = 15^{\circ}$ можно видеть, что с увеличением угла α увеличивается химический КПД с 84.7 до 86 %.

Таблица 4.5 – Состав генераторного газа на выходе из газификатора

	CO %	H ₂ %	CO ₂ %	H ₂ O%	CH ₄ %	N ₂ %	Расход газа на выходе, кг/с	t _p " , К	Хим. КПД η_x
1 вариант	27.83	16.75	4.78	1.99	2.4	46.25	62.65	1372	84.9
2 вариант	27.82	16.69	4.74	2.05	2.39	46.31	62.65	1388	84.7
3 вариант	27.84	16.64	4.73	2.06	2.42	46.31	62.65	1383	84.8
4 вариант	27.87	16.75	4.7	2.06	2.33	46.29	62.65	1367	84.7
5 вариант	27.91	16.73	4.65	2.1	2.39	46.22	62.65	1377	85.0
6 вариант	28.5	16.6	4.51	2.21	2.3	45.88	62.65	1382	86.0

Были проведены расчетные исследования влияния присадки водяного пара на процесс газификации угольной пыли. Как и в выше рассмотренных вариантах, пар подавался в верхние горелки с температурой 900 С°. Расход пара варьировался от 0 до 9.8 кг/с. В качестве исследуемого варианта был взят вариант № 6 с углами $\alpha_{\Gamma} = 60^{\circ}$ и $\beta_{\Gamma} = 0^{\circ}$. В таблице 4.6 приведены результаты расчетных исследований. Можно видеть, что увеличение количества горячего водяного пара приводит к изменению состава генераторного газа на выходе из камеры газификации – уменьшению доли CO и увеличению доли H₂. С увеличением доли H₂ растет химический КПД процесса до 87 % при расходе пара 9.8 кг/с.

Таблица 4.6 – Состав генераторного газа для 6-го варианта

Расход водяного пара, кг/с	Хим. КПД η_x	CO+H ₂ +CH ₄ , об %	Расход генераторного газа, кг/с	t _p '', К
9.8	87 %	20.73+20+0.9	69.74	1343
5.4	86 %	25.7+19.3+1.4	65.3	1372
2.7	86 %	28.5+16.6+2.3	62.65	1382
1.8	85%	29.8+16+2.3	61.7	1386
0.9	85 %	31.1+14.6+2.65	60.8	1398
0	83	31.5+13.8+2.8	59.9	1414

Были проведены исследования влияния перераспределения количества угольной пыли, подаваемой через нижний и верхний ярусы горелок, на процессы аэродинамики, тепло- и массопереноса, а также процесса газификации угольной пыли. На рисунке 4.6 представлено распределение температур в центральном сечении камеры при разном соотношении угля, подаваемого в ярусы горелок. Из рисунка видно, что уменьшение количества подаваемой угольной пыли в нижний ярус приводит к изменению границ высокотемпературной области горения. Наблюдается расширение данной области в нижней части камеры, и снижение ее высоты. Температура на выходе из камеры падает с 1382 К до 1332 К, изменение состава газов и химического КПД при этом незначительны (таблица 4.7).

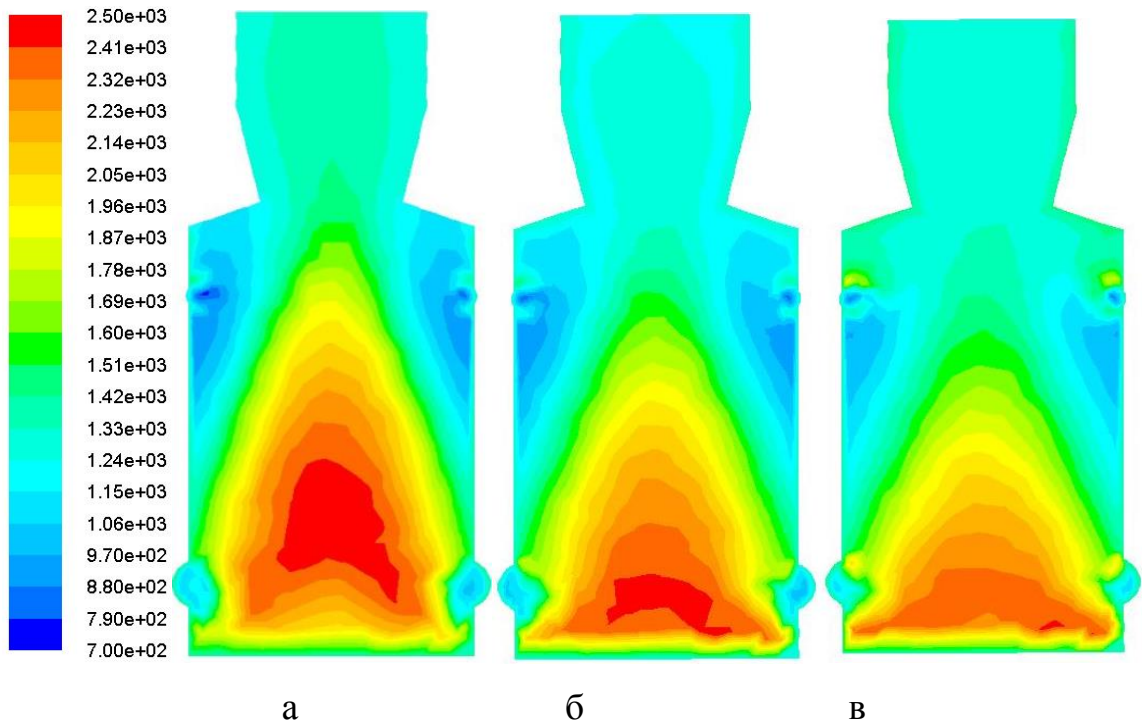


Рисунок 4.6 – Распределение температур в центральном сечении газификатора при разном распределении угля по ярусам горелок, К: а) 25 % от общего количества угля подается в нижний ярус; б) 20 % от общего количества угля подается в нижний ярус в) 15 % от общего количества угля подается в нижний ярус

Таблица 4.7 – Состав генераторного газа для 6-го варианта

Доля угля в нижний ярус, %	Хим. КПД η_x	СО+Н ₂ +СН ₄	Расход генераторного газа, кг/с	T _{p''} , К
25	86 %	28.5+16.6+2.3	62.7	1382 К
20	87%	28.8+16.9+2.1	62.86	1354 К
15	87%	29.3+16.7+2	63.24	1332 К

4.2 Численное исследование сжигания водоугольного топлива в топке котла с жидким шлакоудалением

Для численного исследования процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревом потоке был выбран действующий водогрейный котел с номинальной мощностью 1 МВт, разработанный ИТ СО РАН совместно с ЗАО «Корпорация ПРОТЭН», расположенный в Березовском городском округе Кемеровской области в поселке станции Барзас. Схема котла представлена на рисунке 4.7. Котел обеспечивает нагрев сетевой воды в восходящем газоходе конвективной части. Для обеспечения высоких экономических характеристик работы котла в его конструкции предусмотрено наличие воздухоподогревателя и системы жидкого шлакоудаления. Топливо в топку подается пневматической форсункой [39], (поз. 1, рисунок 4.7а), имеющей хорошие показатели эффективности и надежности в работе. Рассматриваемый котел характеризуется наличием неэкранированной топки, обмуровка которой состоит из последовательно расположенных слоев огнеупорного кирпича, красного кирпича, теплоизоляции и покрывного материала. В топке имеются два окна для подачи дутьевого воздуха (поз. 2, рисунок 4.7а), которые обеспечивают вихревое движение потока смеси топливо-окислитель и позволяют интенсифицировать тепло-массообменные процессы горения. Форсунка для распыливания водоугольного топлива располагается на фронтальной стенке топки и направлена в сторону воздушных коробов, расположенных в задней и правой боковой стенках топки. При работе форсунки частицы водоугольного топлива смешиваются с воздухом, поступающим из воздуховода в правой боковой стенке топки, и движутся далее по направлению к воздушному коробу, расположенному на задней стенке, где подхватываются новым потоком воздуха. В результате в топке формируется вихревое движение газа вместе с каплями топлива, что позволяет обеспечить достаточно большое время пребывания частиц топлива в активной зоне горения. Отсутствие

поверхностей нагрева в топочной части котла способствует адиабатному процессу горения и достижению температуры в топке свыше 1300°C при расчетных режимах работы котла. Дымовые газы из циклонной топки удаляются через окно, расположенное в нижней части боковой стенки топки (поз. 3, рисунок 4.7а), которые далее отдают тепловую энергию теплоносителю в конвективной части котла. Летка шлакозолоудаления (ШЗУ) расположена в нижней части котла (поз. 4, рисунок 4.7а).

Для измерения температуры в отдельных точках топочного объема предусмотрено 9 отверстий в левой боковой стенке топки (рисунок 4.7б). Через данные отверстия осуществляется ввод датчиков температуры и замер температуры. В работе [38] представлены результаты экспериментов по сжиганию ВУТ на этом котле.

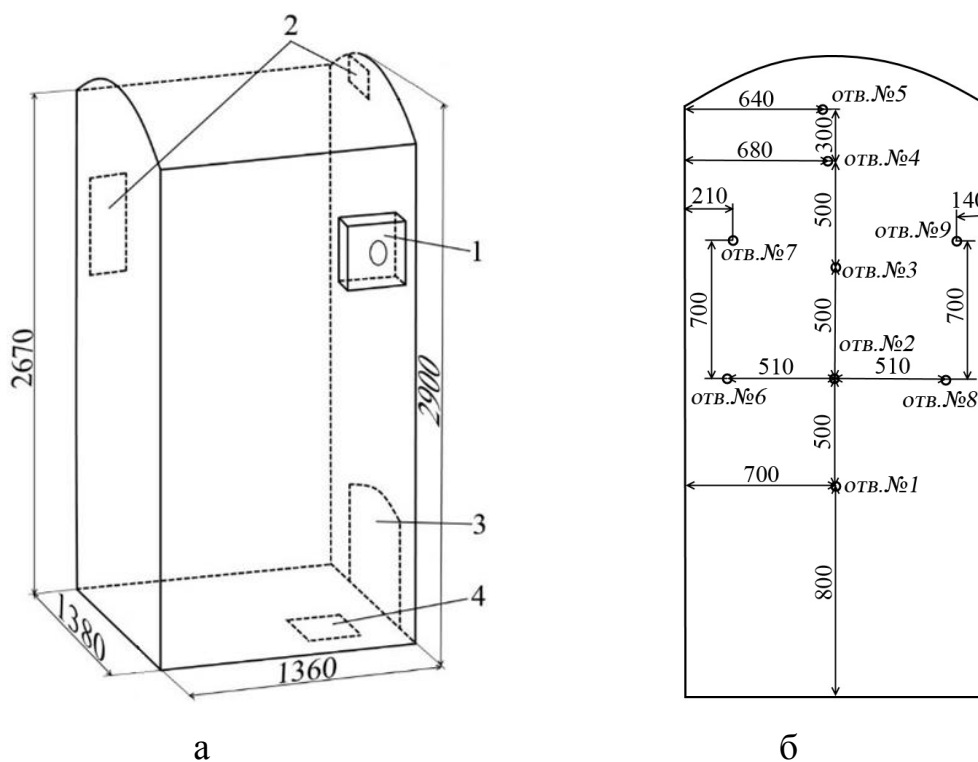


Рисунок 4.7 – Схема топки котла (а) и схема измерения температур на левой боковой стенке котла (б) (размеры в мм). 1 – короб форсунки; 2 – окна для подачи воздуха; 3 – вывод дымовых газов; 4 –летка ШЗУ

Для приготовления ВУТ использовались отходы (угольный кек) обогатительной фабрики ОФ «Северная» (Кемеровская область, Россия), представляющие собой смесь угля марки «К» и воды с массовым соотношением 50/50. Технический и элементный анализ двух образцов кека представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты технического и элементного анализа кека

Технический состав					
Топливо	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, ккал/кг	Q^r , ккал/кг
Кек «К», состав №1	50,86	22,41	28,86	6439	2778
Кек «К», состав №2	50,06	21,50	28,76	6570	2804
Элементный состав					
Топливо	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	
Кек «К», состав №1	83.62	4.397	0.01	0.522	
Кек «К», состав №2	82,80	4,289	0.01	0.493	

Воздух подавался в топку через два дутьевых окна с одинаковым расходом. В работе исследовалось влияние количества и температуры подаваемого воздуха на процессы в топочной камере при сжигании водоугольного топлива. Параметры и режимы работы котла приведены в таблице 4.9. За основу взяли два основных режима работы котла, по которым имеются экспериментальные данные, – это режим твердого шлакоудаления (вариант 2) и жидкого (вариант 7).

Таблица 4.9 – Параметры подачи топлива и окислителя

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход ВУТ, кг/с	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Расход воздуха через форсунку, кг/с	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Общий расход воздуха, кг/с	0,369	0,369	0,369	0,336	0,401	0,345	0,345	0,345	0,317	0,372
Температура вторичного дутья, °С	25	280	400	280	280	25	280	400	280	280
Коэф. избытка воздуха (α)	1,7	1,7	1,7	1,55	1,85	1,25	1,25	1,25	1,15	1,35
Кек «К», состав	№1					№2				

Задача решалась на программном пакете «SigmaFlame» в трёхмерной постановке. Расчетная сетка составляла 864 тыс. ячеек, в области форсунки сетка строилась более дробной для того чтобы более детально описать процесс распыливания водоугольного топлива (рисунок 4.8а). Если объединить основные точки, в которых экспериментально измерялась температура внутри топki, то можно выделить четыре сечения, показанных на рисунке 4.8б.

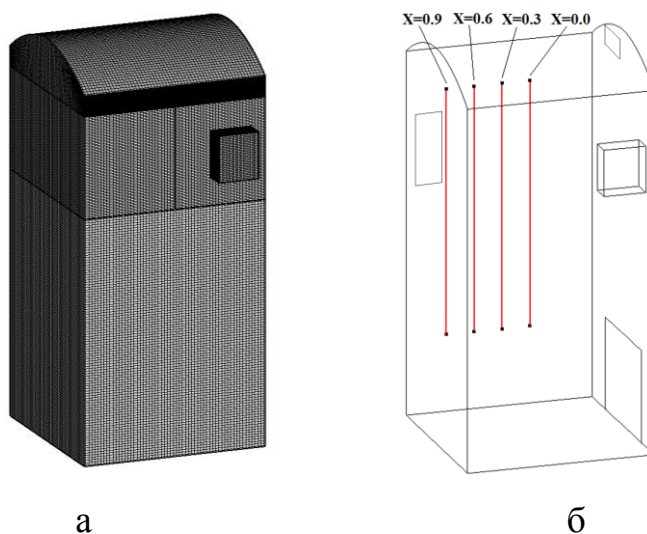


Рисунок 4.8 – Расчётная сетка (а) и геометрия (б) топki котла

Для определения режима шлакоудаления в котле, по данным химического анализа зольного остатка, в работе [38, 107] был представлен коэффициент плавления золы K_{pl} , который характеризует интегральную температуру плавления минеральных компонентов топлива. Кек, применяемый в качестве основного компонента ВУТ, имеет коэффициент плавления $K_{pl}=5,85$. Из этого следует, что температура начала жидкоплавкого состояния для минеральной части используемого ВУТ находится в пределах 1320–1350 °С [38]. Таким образом, режим жидкого шлакоудаления возможен при температурах в топке выше 1330°С

На рисунках 4.9 – 4.11 представлены поля температур в различных сечениях топочной камеры, при разных режимах работы котла на водоугольном топливе. Можно видеть, что для режима твердого шлакоудаления (2-ой вариант) практически во всем объеме топочной камеры температура не превышает 1200°С (рисунок 4.9а – 4.11а). Для 7-го варианта в средней и нижней областях котла температура выше 1350°С и достигает 1450°С (рисунок 4.9б – 4.11б), что соответствует режиму жидкого шлакоудаления.

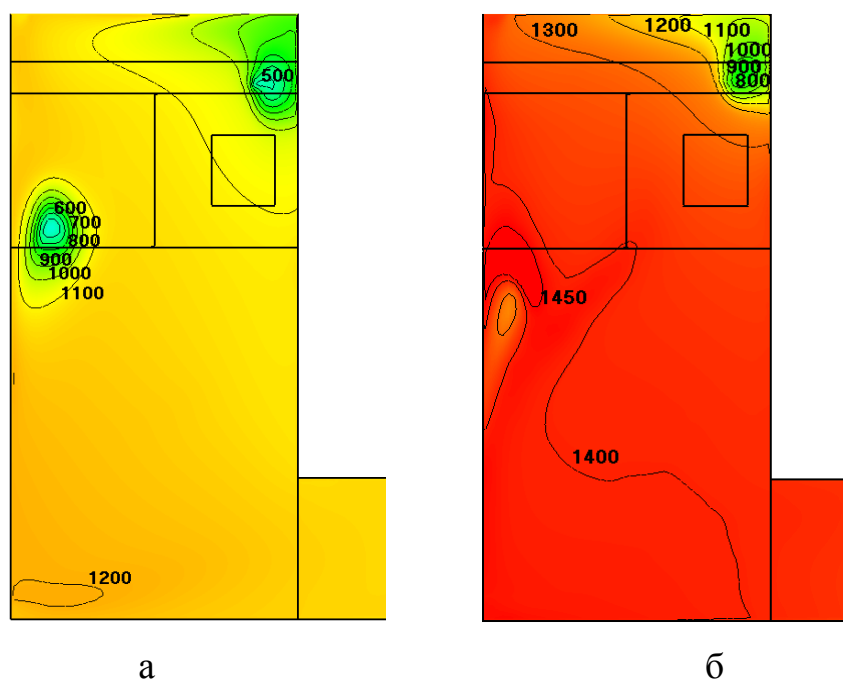


Рисунок 4.9 – Поле распределения температуры (°С) в центральном сечении топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

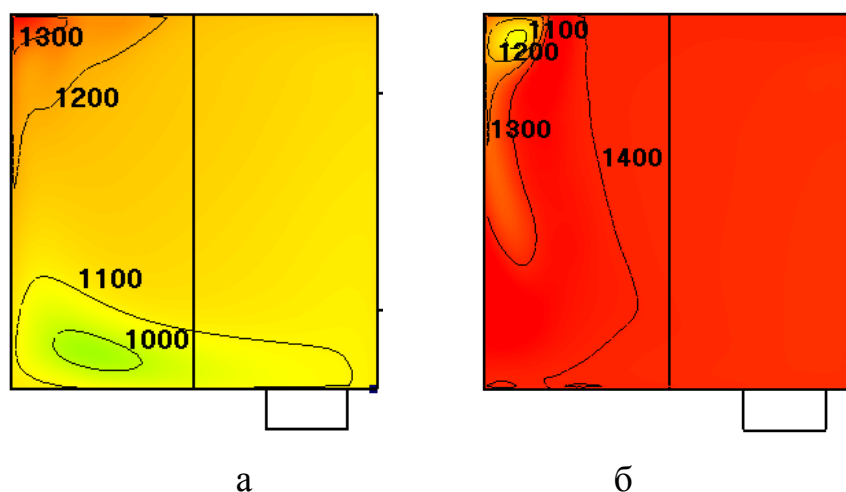


Рисунок 4.10 – Поле распределения температуры ($^{\circ}\text{C}$) в поперечном сечении на высоте $z = 1.3$ м топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

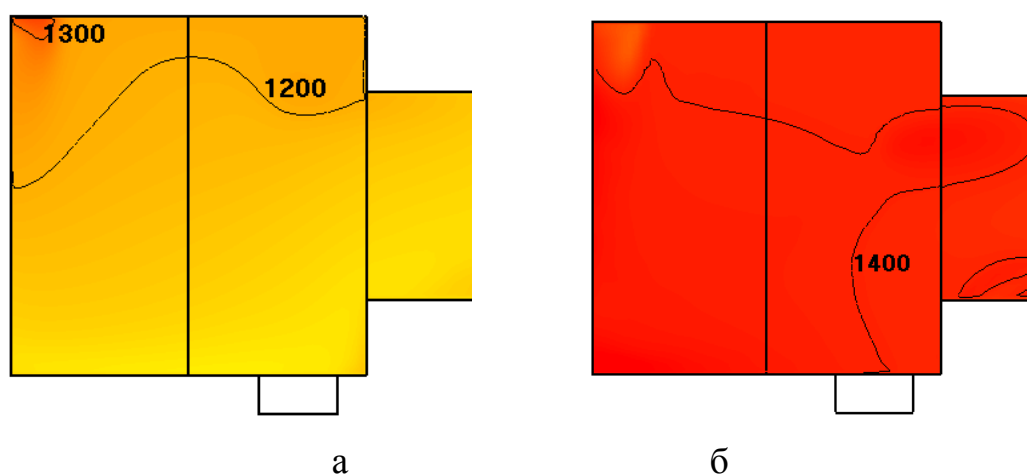


Рисунок 4.11 – Поле распределения температуры ($^{\circ}\text{C}$) в поперечном сечении на высоте $z = 0.4$ м топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунке 4.12 для режима твердого шлакоудаления (2-ой вариант) представлены графики распределения температуры вдоль котла на разном удалении от боковой стенки, $X=0.0$ соответствует сечению в центре камеры, $X=0.9$ расположено вблизи стенки. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

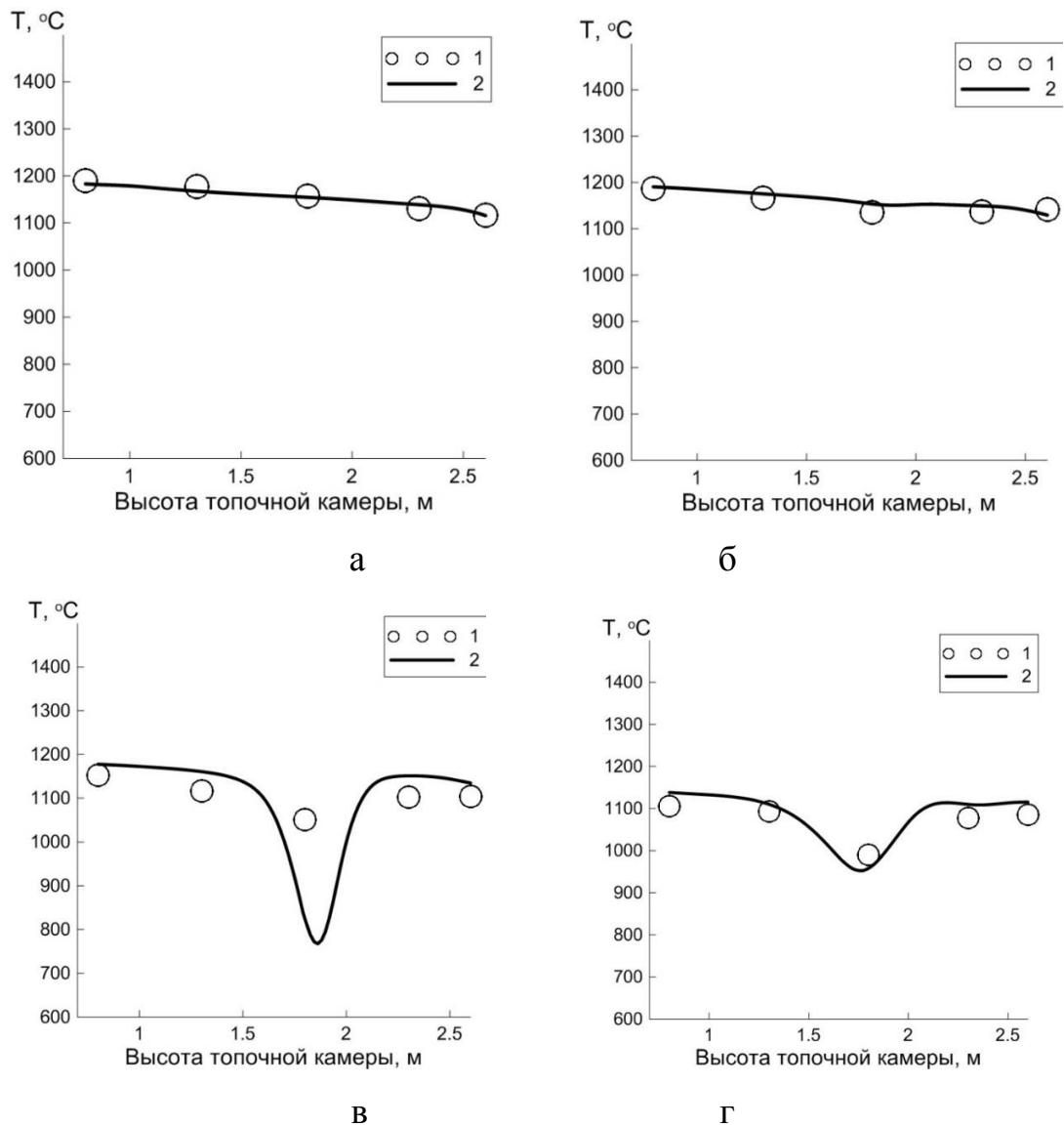


Рисунок 4.12 – Распределение температуры в топке котла для режима твердого шлакоудаления (вариант 2), 1 – эксперимент, 2 – расчет. а) $X = 0.0$, б) $X = 0.3$, в) $X = 0.6$, г) $X = 0.9$

В таблице 4.10 для режима твердого шлакоудаления (вариант 2) приведены сравнения расчетных результатов с показаниями всех термопар в эксперименте. По результатам расчета можем видеть удовлетворительное совпадение результатов моделирования процессов воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревом потоке с результатами экспериментальных данных.

Таблица 4.10 – Сравнение температуры в топке котла для твердого шлакоудаления (эксперимент/расчет), °С

Относительная координата X		X = 0.0	X = 0.3	X = 0.6	X = 0.9
Номер отверстия в схеме измерения температуры	№1	1190 / 1185	1186 / 1195	1153 / 1175	1106 / 1135
	№2	1177 / 1175	1166 / 1175	1117 / 1145	1093 / 1115
	№3	1157 / 1160	1135 / 1155	1051 / 800	990 / 975
	№4	1131 / 1145	1137 / 1150	1102 / 1135	1078 / 1120
	№5	1116 / 1125	1141 / 1135	1104 / 1120	1085 / 1125
	№6	1146 / 1135	1121 / 1110	1061 / 1115	1040 / 1060
	№7	1167 / 1155	1146 / 1160	1103 / 1135	1079 / 1140
	№8	1227 / 1200	1207 / 1205	1150 / 1190	1115 / 1145
	№9	1204 / 1205	1175 / 1200	1084 / 955	917 / 1015

В таблице 4.11 для режима жидкого шлакоудаления (вариант 7) приведено распределение температуры в точках для $X = 0.7$. Сравнивая результаты расчетов и экспериментальные данные, можем видеть удовлетворительное совпадение основного параметра процесса воспламенения и горения водоугольного топлива в вихревом потоке.

Таблица 4.11 – Сравнение температуры в топке котла для жидкого шлакоудаления ($X = 0.7$), °С

Относительная координата X	Номер отверстия в схеме измерения температуры								
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
Эксперимент	1405	1403	1407	1373	1365	1414	1377	1412	1027
Расчет	1410	1405	1420	1360	1375	1420	1370	1420	9035

На рисунках 4.13 – 4.15 показаны векторные поля скорости в различных сечениях топочной камеры, для разных вариантов работы котла. Можно видеть, что в верхней части камеры образуется вертикальное циркуляционное движение горючих газов (рисунок 4.13). Также зона горизонтальной

циркуляции образуется в центральном сечении котла и протягивается до самого низа (рисунок 4.14, 4.15). За счет вихревой структуры потока обеспечивается стабильное воспламенение и горение органической массы водоугольного топлива, так как увеличивается время нахождения угольных частиц в объеме топочной камеры, что обеспечивает более полное выгорание. Данное течение соответствует обоим режимам горения водогрейного котла.

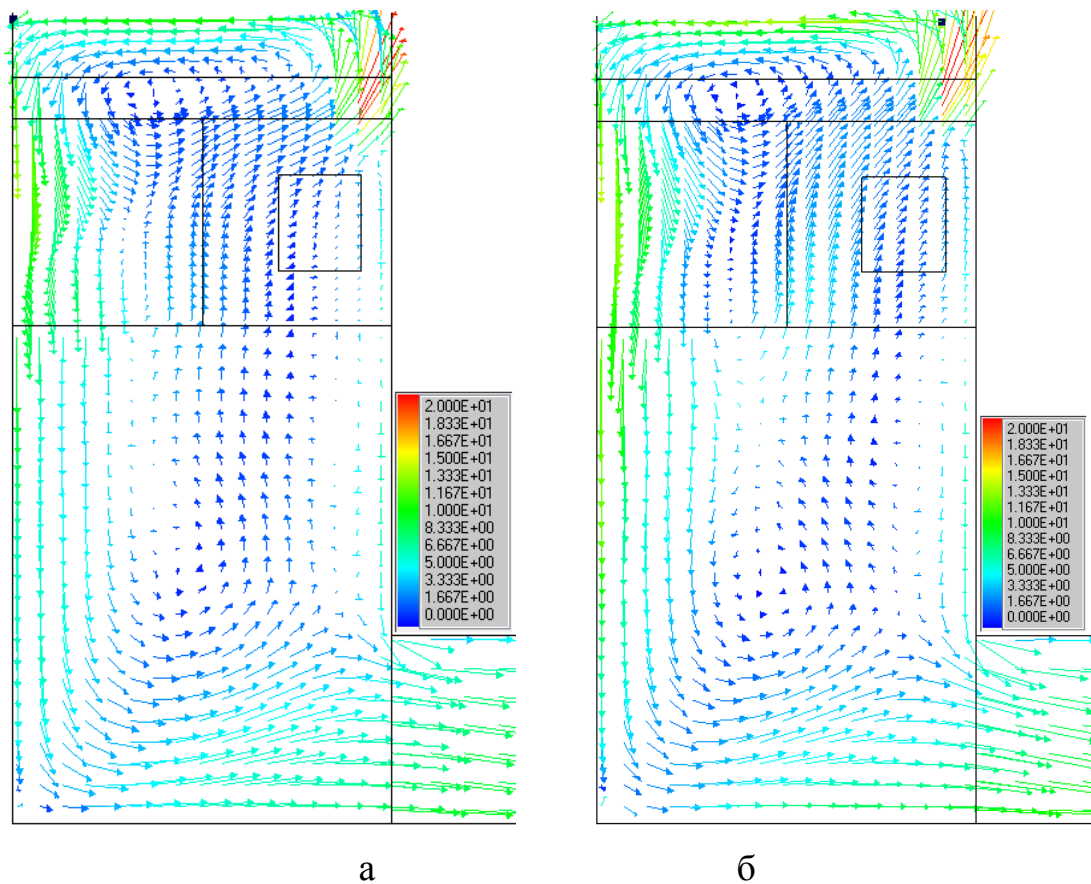


Рисунок 4.13 – Векторное поле скорости (м/с) в центральном сечении топочной камеры, вектора окрашены в соответствии с магнитудой скорости:
 а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

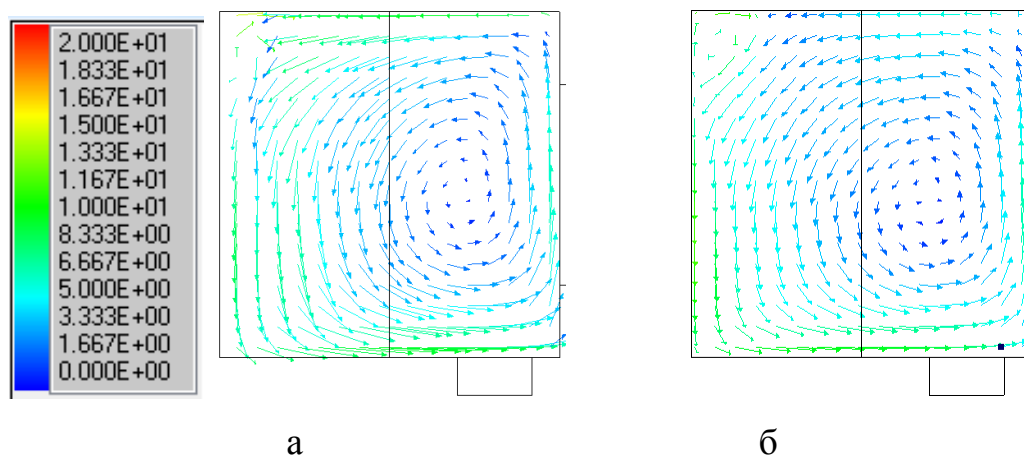


Рисунок 4.14 – Векторное поле скорости (м/с) в сечениях на высоте $z = 1.8$ м топочной камеры, вектора окрашены в соответствии с магнитудой скорости: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

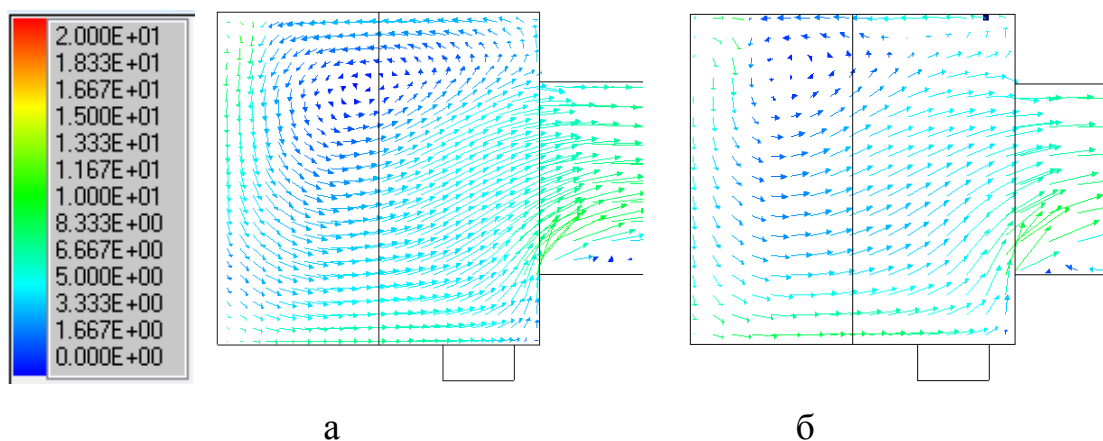


Рисунок 4.15 – Векторное поле скорости (м/с) в сечениях на высоте $z = 0.4$ м топочной камеры, вектора окрашены в соответствии с магнитудой скорости: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунках 4.16 – 4.18 показаны поля распределения концентрации кислорода в различных сечениях топочной камеры, при разных режимах работы котла на водоугольном топливе. Для режима твердого шлакоудаления (вариант 2) в основной части объема топочной камеры концентрация кислорода выше, в сравнении с вариантом 7, и составляет 7.5-12.5 % (рисунок

4.16а – 4.18а). Это связано с высоким коэффициентом избытка воздуха для данного варианта. Снижение расхода топлива от 0,12 до 0,097 кг/с и повышение избыточного количества воздуха от $\alpha=1.25$ до $\alpha=1.7$ для данного котла, приводит к снижению температуры в топочной камере в среднем на 200-250°C. Избыточный воздух не участвует в реакциях окисления топлива и является балластом. Для режима жидкого шлакоудаления (вариант 7), в основной части объема топочной камеры концентрация кислорода не превышает 5% (рисунок 4.16б – 4.18б).

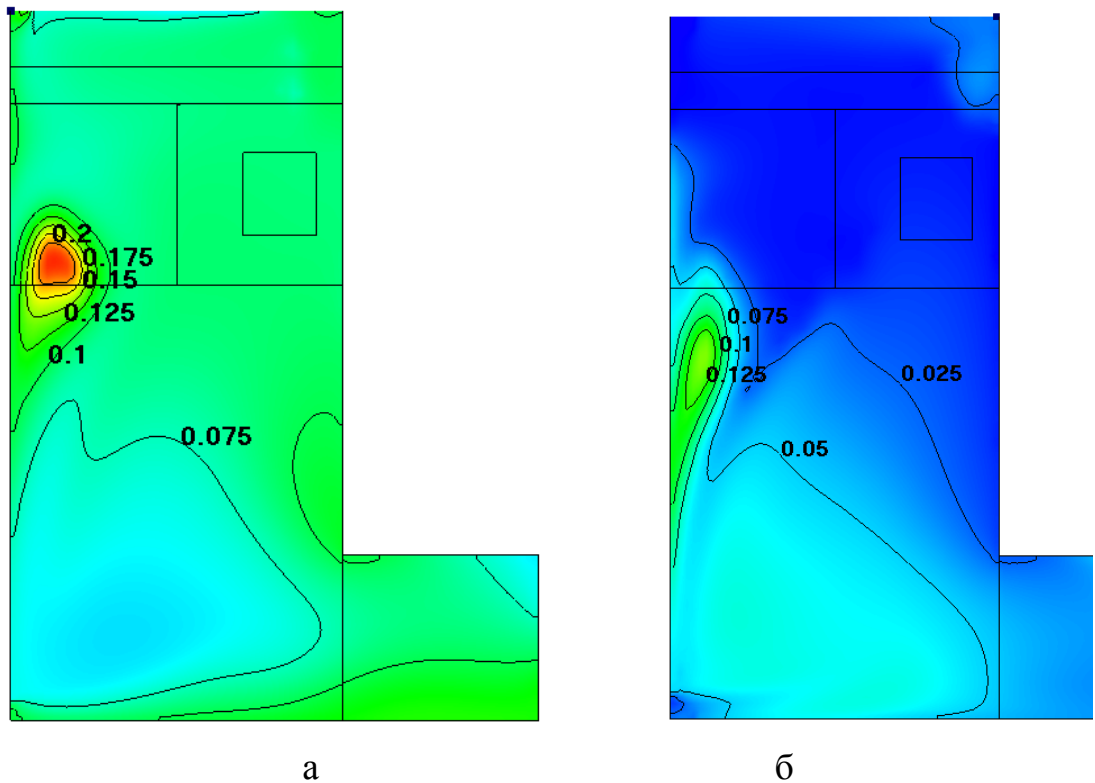


Рисунок 4.16 – Поле распределения концентрации кислорода (кг/кг) в центральном сечении топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

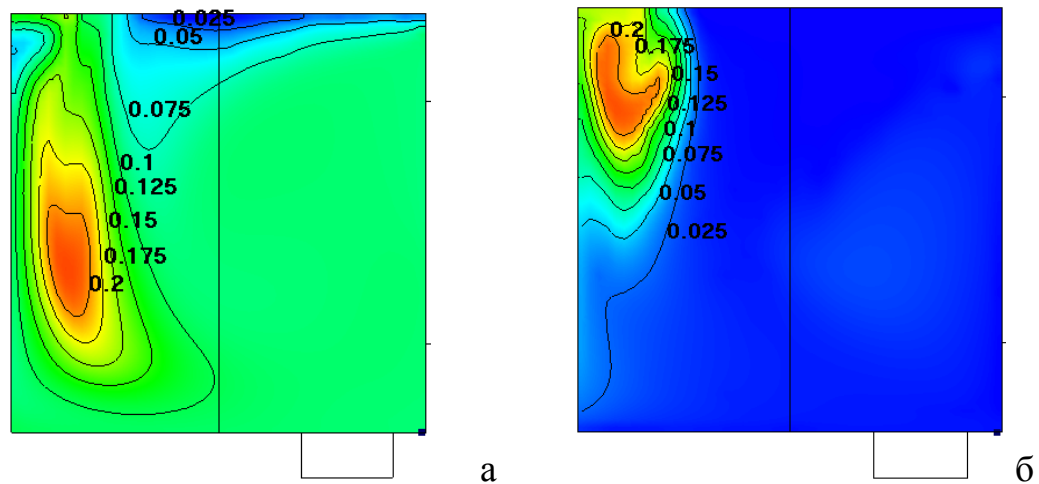


Рисунок 4.17 – Поле распределения концентрации кислорода (кг/кг) в поперечном сечении на высоте $z = 1.3$ м топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

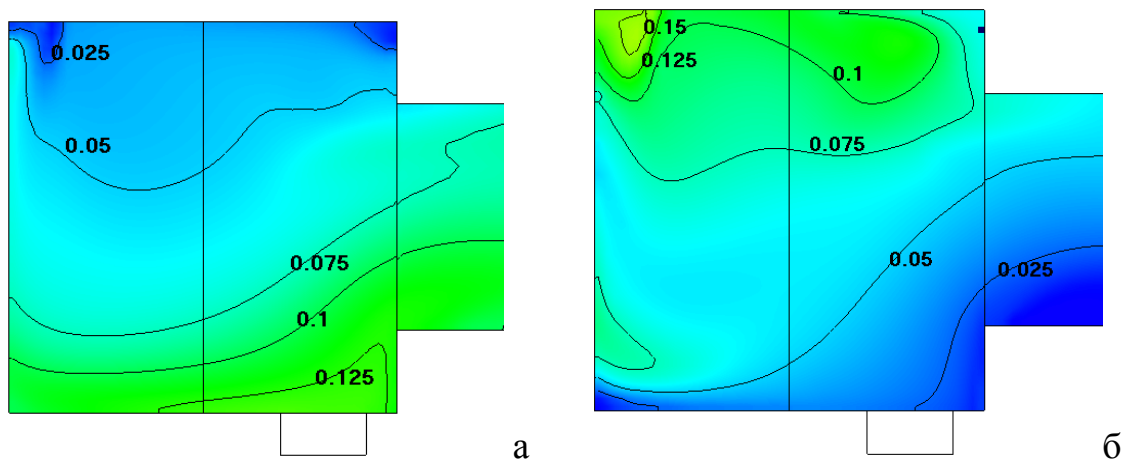


Рисунок 4.18 – Поле распределения концентрации кислорода (кг/кг) в поперечном сечении на высоте $z = 0.4$ м топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

На рисунке 4.19 показаны концентрации оксидов азота в центральном сечении топочной камеры для двух режимов работы котла на водоугольном топливе. Как известно, термический оксид азота появляется в заметных количествах лишь при температуре в топочной камере равной 1300°C [108]. В связи с этим, сравнивая два режима сжигания, мы наблюдаем высокие

концентрации NO для режима жидкого шлакоудаления (вариант 7) в сравнении с вариантом 2. Вклад термических оксидов для твердого режима шлакоудаления незначительный т.к. температура в котле в среднем не превышает 1200°C. Топливные оксиды азота появляются на начальном участке факела в период реакций превращений азотосодержащих летучих веществ при температуре более 650-750°C, а при температуре 1200-1400°C его концентрация достигает максимального значения. Для обоих режимов работы котла вклад промотированных NO незначителен, так как температура в топочной камере не превышает 1500°C [108]. Таким образом видно, что при повышении средней температуры газов с 1150 до 1400°C в топке котла происходит рост концентрации оксидов азота в основном за счет термического механизма образования NO_x .

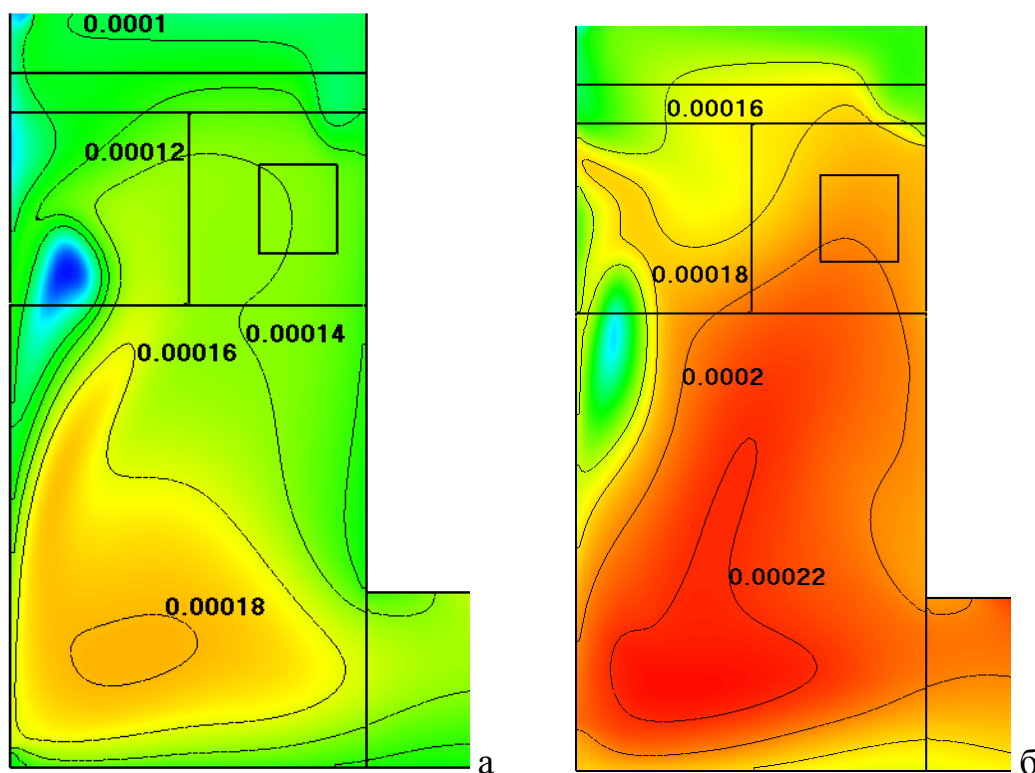


Рисунок 4.19 – Поле распределения концентрации NO (кг/кг) в центральном сечении топочной камеры: а) режим твердого шлакоудаления (вариант 2), б) режим жидкого шлакоудаления (вариант 7)

В таблице 4.12 представлены результаты расчетного исследования сжигания водоугольного топлива в перспективном котле. Можно видеть, что при повышении температуры подаваемого воздуха от 25°C до 400°C увеличивается концентрация NO в дымовом газе на 27 ppm для вариантов 1-3 и на 39ppm для вариантов 6-8. В первую очередь это связано с ростом термического оксида азота [108], так как температура в камере сгорания и температура дымовых газов возрастает. Стоит отметить, что выбросы оксидов азота при сжигании водоугольного топлива на исследуемом котле в 5-6 раз меньше в сравнении с энергетическими котлами, работающими на пылеугольном топливе с жидким шлакоудалением.

На рисунке 4.20 представлены результаты расчетного исследования в виде концентрации кислорода и оксидов азота в сечении $X=0$. Как известно, снижение концентрации окислителя в зоне горения воздействует на образование NO двояким образом: с одной стороны, их концентрация падает в следствие меньшего образования топливного NO, с другой стороны, возрастает концентрация термического NO в связи с ростом температуры при снижении значения α . Для вариантов 2 и 5 (таблица 4.12, рисунок 4.20) при повышении коэффициента избытка воздуха происходит снижение концентрации термического NO в связи с уменьшением температуры. Топливные NO изменяются незначительно, так как для данного режима избыточный воздух является балластом и не участвует в реакции окисления.

Для вариантов 7 и 10 при увеличении коэффициента избытка воздуха от 1,25 до 1,35 концентрация оксидов азота в дымовых газах увеличивается на 50ppm (таблица 4.12). Это происходит за счет увеличения топливных NO (рисунок 4.20б) в связи с увеличением кислорода в камере сгорания (рисунок 4.20а), так как для данного режима коэффициент избыточного воздуха близок к стехиометрическому значению и добавленный кислород активно участвует в окислительных реакциях. В подтверждение этому происходит уменьшение механического недожога на 1,6% (таблица 4.12) при увеличении количества воздуха.

Результаты расчета в виде концентрации оксидов азота в дымовых газах удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Параметры дымовых газов на выходе из камеры сгорания

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура дымовых газов (расч.), °С	1037	1133	1197	1196	1098	1236	1382	1422	1390	1327
Температура дымовых газов (экспер. [38]), °С	-	1134	-	-	-	-	1412	-	-	-
Механический недожог, %	5.9	4.5	4.1	4.9	4.3	9.8	8.6	8.4	12.6	7.0
NO, ppm (расч.)	57	80	84	82	75	78	101	114	90	151
NO, ppm (экспер. [38])	-	83.6	-	-	-	-	104.4	-	-	-

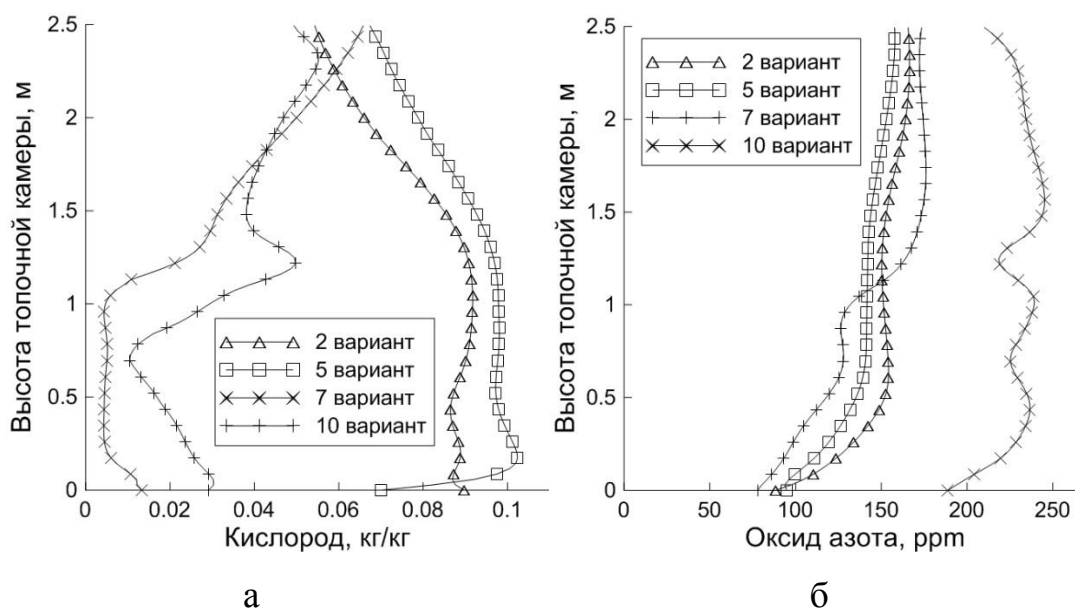


Рисунок 4.20 – Концентрация газов в центральном сечении топочной камеры:

а) кислород, б) оксид азота

Выводы по главе 4

На основе проведенного анализа отечественной и зарубежной литературы и численных результатов разработан двухстадийный реактор конверсии твердого топлива для угольной ПГУ, основанный на технологии EAGLE с использованием, в отличие от оригинальной технологии, Кузнецкого угля, воздушного дутья, присадки водяного пара и увеличения производительности по углю с 150 т/день до 1700 т/день. Показано, что предлагаемые технические решения позволяют обеспечить требуемую эффективность конверсии твердого топлива. Установлена взаимосвязь между направлением подачи пылеугольного потока верхнего яруса поточного двухстадийного газификатора с аэродинамикой, тепло - и массопереносом, процессом газификации угольной пыли в камере газификации. Показано, что увеличение угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов, приводит к повышению скорости нисходящих потоков газа вдоль стенок с 8 до 14 м/с, что приводит к интенсификации процесса газификации. Выполненные расчетные исследования влияния высокотемпературного пара на процесс газификации угольной пыли установили, что увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг пара на кг угля с температурой 1173 К приводит к увеличению химического КПД процесса газификации с 83 до 87 %, при снижении температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К при коэффициенте избытка воздуха 0.32. Получено, что снижение доли угольной пыли в нижний ярус камеры газификации с 25 до 15 % от общего количества позволяет уменьшить область высокотемпературного горения с незначительным изменением состава газов и химического КПД.

Проведен анализ результатов физико-математического моделирования процессов воспламенения и горения водоугольного топлива, приготовленного на основе отходов обогащения коксующихся углей (фильтр – кек), в топке действующего водогрейного котла оригинальной конструкции, разработанного ИТ СО РАН совместно с ЗАО «Корпорация ПРОТЭН»,

расположенного в Березовском городском округе Кемеровской области в поселке станции Барзас. На основе результатов численного исследования была показана стабильность работы данного котла на ВУТ. Проведено исследование влияния режимных параметров работы котла на процесс образования оксидов азота. Показано, что концентрации оксидов азота в дымовых газах уменьшается на 30% при снижении средней температуры в объеме топочной камеры с 1400 до 1200°С ($\alpha=1.25$). При $\alpha=1.7$ снижение средней температуры с 1200 до 1100°С позволяет сократить концентрацию оксидов азота примерно на 32 %. Сравнение расчетных и экспериментальных данных способствует более полному пониманию работы котла и позволяет вносить более обоснованные изменения, как в его конструкцию, так и в режим эксплуатации. Предложенный численный метод математического моделирования горения водоугольного топлива позволяет определять основные параметры процессов, протекающих в топочной камере, с достаточной для инженерных целей точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена численному исследованию физико-химических процессов при нетрадиционных способах переработки угольного топлива. Такое исследование, в дополнение к экспериментальным данным, позволяет получить большой объём детальной информации об аэродинамике, локальном и суммарном тепломассообмене, лучше понять топочные процессы и, соответственно, разработать способы оптимизации топочных устройств с целью увеличения эффективности и снижения вредных выбросов. Для численного моделирования были проведены апробация и верификация методов моделирования процессов горения и газификации угольного топлива в пространственных постановках и их адаптация к задачам моделирования.

Было проведено сопоставление различных моделей турбулентности для задачи горения угольной пыли в закрученном потоке. Как показали исследования, все модели турбулентности (стандартной $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST Ментера, RSM) дают схожие результаты основных параметров. Но при расчете пульсационной составляющей скорости модель RSM дает более низкий уровень пульсаций и лучше согласуется с экспериментальными данными. Это, в первую очередь, сказывается на расчете скорости горения летучих веществ, где используются турбулентные характеристики потока. Также при использовании модели RSM значения концентрации оксидов азота значительно ниже, чем при использовании двухпараметрических моделей турбулентности и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Это объясняется разными значениями пульсаций как для скорости, так и для температуры. Скорость реакции образования топливных NO экспоненциально зависит от температуры.

По результатам тестирования комплексной математической модели процессов гидродинамики, тепломассообмена и кинетики термохимических превращений топлива при горении и газификации угля показано, что

выбранная модель, основанная на RANS подходе, удовлетворительно описывает основные параметры процесса газификации.

Анализ результатов моделирования газификации угольного топлива показывает зависимость физико-химических процессов от аэродинамики. Установлена взаимосвязь между направлением подачи пылеугольного потока верхнего яруса поточного двухстадийного газификатора с аэродинамикой, тепло - и массопереносом, процессом газификации угольной пыли в камере газификации. Выявлено, что увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг пара на кг угля с температурой 1173 К приводит к увеличению химического КПД процесса газификации с 83 до 87 %, при снижении температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К при коэффициенте избытка воздуха 0.32.

Для топки действующего водогрейного котла показана возможность стабильной работы на ВУТ. Исследования влияния режимных параметров на работу котла показали, что концентрации оксидов азота в дымовых газах уменьшается на 30% при снижении средней температуры в объеме топочной камеры с 1400 до 1200°С ($\alpha=1.25$). При $\alpha=1.7$ снижение средней температуры с 1200 до 1100°С позволяет сократить концентрацию оксидов азота примерно на 32 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Гайворонский А. И., Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях: монография / А. И. Гайворонский, В. А. Марков, Ю. В. Илатовский. - М. : ИРЦ Газпром, 2007. - 478 с.
- 2) Тугов А.Н., Майданик М.Н., Угольная электрогенерация в России: Состояние и перспективы //Материалы II Международной научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» Москва ОАО «ВТИ» 26-27 октября 2017 г. С. 31- 41.
- 3) A reference Higman C. State of the Gasification Industry –the Updated Worldwide //International Pittsburgh Coal Conference Beijing, CHINA, September 16 – 19, 2013.
- 4) Higman C., Burt M., Gasification. Elsevier Science. 2008. 435 p.
- 5) Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Лазарев С.И., Лапин Д.А., Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности. Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 25.
- 6) Ходаков Г.С., Водоугольные суспензии в энергетике, Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 35–45.
- 7) Aiuchi K., Moriyama R., Takeda S., Kitada S., Onozaki M., Katayama Y., A preheating vaporization technology of coal-waterslurry for the gasification process, Fuel Processing Technology. 2007. V. 88. № 4. P. 325–331.
- 8) Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., Органо-водоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор). Теплоэнергетика, 2016, № 10, с. 31–41.
- 9) Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С., Дьяченко К.И., Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития, Уголь №7-2016.

- 10) Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 2. Регионы и бассейны / под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: Изд-во МГГУ, 1999. – 445 с.
- 11) Марочный состав и потребительские свойства российских углей, ЗАО «РОСИНФОРМУГОЛЬ», Москва, 2015
- 12) Заворин А. С. и др., Теплотехнические характеристики углей месторождения ШИВЭ–ОВОО Монголии как энергетического топлива, Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 4
- 13) Назаров Ш.Б., Перспектива использования твердых энергоресурсов и проблемы охраны атмосферного воздуха от загрязнения.
- 14) Акулов А.О., Влияние угольной промышленности на окружающую среду и перспективы развития по модели Ддкаплинга, Регион: экономика и социология, 2014, №1(81), с.272-288.
- 15) Бирюков А.Б., Дробышевская И.П., Рубан Ю.Е.. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: Учебное пособие. Донецк: ДНТУ, 2014. 79 с.
- 16) Бойко Е.А., Котельные установки и парогенераторы: Учебное пособие. Красноярск: КГТУ, 2005. 292 с.
- 17) Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Энергия, 1976. 488 с.
- 18) Kotler V. R., Reduction in nitrogen oxides emissions boilers of thermal power plants during solid fuel combustion., Souzenergo, 1982
- 19) Zhou H., Cen K.F., Fan J.R., Energy 29 (1), 167–183 (2004)
- 20) Hill S.C., Smoot L.D., Prog. Energy and Combust. Sci. 26 (4/6), 417–458 (2000) Higman C., Burgt M. Gasification. Elsevier Science. 2008. 435 p.
- 21) Бурматова О.П. Модернизация инструментов экологической политики и проблемы их внедрения // Регион: экономика и социология, 2011, №3, с.170-194.

22) ИТС НДТ КТЭУ, Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии, информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям, Москва, Бюро НДТ, 2016-2017

23) Nagasaki N., Takeda Y., Akiyama T., Kumagai T., Progress toward commercializing new technologies for coal use — oxygen-blown IGCC + CCS, Hitachi Rev. 59 (3) (2010) 77–82.

24) Kaneko S., Development of IGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle), Energy Resour. 31 (2) (2010) 92-82

25) R. Clean Coal Power, D Co., Ltd., The termination of Nakoso IGCC demonstration test and commercial use of IGCC facilities in 2013.

26) Hashimoto T., Shinada O., Kitagawa Y., Ishii H., Takashima Y., Susaki M., Air-blown IGCC system—world's first successful continuous three-month operation and commercial application plans, Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev. 46 (1) (2009) 5–8.

27) Степанов, С.Г. Технология совмещенного производства полукокса и горючего газа из угля / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов, А.Б. Морозов. // Уголь. – 2002. – №6.

28) Богомоллов А.Р., Алексеев М.В., Сорокин А.Л., Прибатурин Н.А., Кагакин Е.И., Шевырёв С.А., Исследование конверсии углей и шламов в потоке перегретого пара, Теплоэнергетика, №: 12, 2013, Стр. 33-39.

29) Донской И.Г., Свищев Д.А., Шаманский В.А., Козлов А.Н., Математическое моделирование процесса ступенчатой пылеугольной газификации, Научный вестник НГТУ том 58, № 1, 2015, с. 231–245

30) Абаимов Н.А., Шурчалин А.А., Шестаков Н.С., Осипов П.В., Рыжков А.Ф., Экспериментальное и численное исследование поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья, труды IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», 16-18 ноября 2015 года, Новосибирск.

31) Бутаков Е.Б., Экспериментальное исследование горения механоактивированных углей микропомола в моделях камер сгорания ГТУ, труды XIV всероссийской школа-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 22-25 ноября 2016 года.

32) Султангузин И.А., Федюхин А.В., Курзанов С.Ю., Степанова Т.А., Тумановский В.А, Разработка технических решений для производства отечественных когенерационных установок с использованием технологий газификации и пиролиза местного твердого топлива, Промышленная энергетика, № 5, 2015, Стр. 51-54.

33) Богатова Т.Ф., Бусоргин В.А., Рыжков А.Ф., Твердотопливные ПГУ с частичной газификацией, Вопросы современной науки и практики, №2(8). 2007

34) Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Кузьмин А.Г. Технико-экономические показатели ПГУ ТЭЦ с газификацией угля, Научный вестник НГТУ. - 2009. - № 3

35) Лапицкий К.С., Малыхин А.А., Применение местных углей на ТЭС Хабаровского края, Международный студенческий научный вестник, №: 3-1, 2015 стр. 45-46.

36) Загрудинов Р.Ш., Малыхин Д.Г., Сеначин П.К., Шитова С.Н., Внедрение газотурбинных технологий с внутрицикловой газификацией угля в технологические схемы ТЭС, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, №1(2), 2011

37) Kiso F, Akiyama T, Morihara A, Takahashi K, Kida E, Iritani J, et al. EAGLE project for IGFC in Japan. 25th International conference on coal utilization & fuel systems; March 7-10, 2000. Clearwater, FL, USA.

38) Алексеенко С.В. и др. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2017. - Т. 328. № 12. - С. 16–28.

- 39) Пневматическая форсунка (Варианты): пат. Рос. Федерация №2523816; заявл. 22.01.2013 ; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 10 с.
- 40) Делягин Г.Н., Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха// Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: «Наука». - 1967. - С.45-55.
- 41) Бабий В.И. Воспламенение и горение капель водоугольной суспензии // Мат. 9 Всерос. симп. по горению и взрыву. – Черноголовка. – 1989. – С. 56–59.
- 42) Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива // Горение и плазмохимия: – ч. 1, 2007, вып. 3, с. 178-188; – ч. II, 2007, вып. 3, с. 187-197; – ч. III, 2008, вып. 1, с. 56-59; – ч.IV, 2008, вып. 4, с. 178-187.
- 43) Huang Z. et all. Theoretical analysis of CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. – USA, Orlando. Part 1. – 1986. – P. 343-358.
- 44) Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition of coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986. – P. 388-407.
- 45) Liu, G. E. and Law, C. K., Combustion of coal-water slurry droplets , Fuel 65,171 (1986).
- 46) Szekely, G. A. and Faeth, G. M., Reaction of carbon black slurry agglomerates in combustion gases, AIAA Jou. 20,422 (1982).
- 47) Szekely, G. A. and Faeth G. M. Combustion Properties of Carbon Slurry Drops, in Nineteenth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, p.1077 (1983).
- 48) Szekelly, G. A. (1982) PhD Thesis, Pennsylvania State University, and references therein.
- 49) Tran, X. P., Malone D. J. and Spann, J. F., Evaporation of Coal-Water fuel Droplets Under Intense Heating Conditions. Presented at the Spring meeting of the Western States Section p. 25 (1985).

- 50) Fu W.B., Wei J.B., Han H.Q., Zhang Y.P., A study of the evaporation and ignition of a single coal-water slurry (CWS) droplet, *Combust. Sc. And Tech.*, Vol. 43, pp. 67-83 (1985)
- 51) Elperin T., Krasovitov B., Evaporation of liquid droplets containing small solid particles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No 12, pp. 2259-2267 (1995)
- 52) Делягин Г.Н., Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. - М.: «Наука». - 1967. - С.45-55.
- 53) Делягин Г.Н., Обводненное твердое топливно-энергетическое топливо / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. -М.: «Наука». — 1967. - С.5-13.
- 54) Делягин, Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий на опытно-промышленной установке / Г.Н. Делягин, Б.В. Канторович, В.И. Караченцев и др. // Уголь. - 1964. - № 9. - С. 86-87.
- 55) Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Томск, 2014.– С. –133.
- 56) Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сб. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: изд-во АН СССР, 1967. С. 45-55.
- 57) Делягин Г.Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии // В кн.: Кинетика и аэродинамика процессов горения топлива. – М.: Наука, 1969. С. 71-77.
- 58) Levendis Y.A., Metghalchi M., Wise D., COMBUSTION BEHAVIOR OF SINGLE COAL-WATER SLURRY DROPLETS. p.392, New Orleans, LA, May 21-24 (1993)
- 59) Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Стрижко Ю.В., Луценко С.В.. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого

топлива в циклонном предтопке. Энергетик №7, НТФ«Энергопрогресс», Москва, 2011. – с. 45-47

60) Цепенюк А.И., Серант Ф.А., Белоружский И.Ю., Квривишвили А.Р., Ставская О.И., Полосков В.А., Боярченко В.Г., Егоров П.Р. Разработка и внедрение муфельизированных предтопок для снижения технического минимума пылеугольных котлов. Сборник VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012 г. С.101-108

61) Tavangar S., Hashemabadi S. H., Saberimoghdam A., CFD simulation for secondary breakup of coal–water slurry drops using OpenFOAM, Fuel Processing Technology 132, 153–163 (2015)

62) Flock A.K., Guildenbecher D.R., Chen J., Sojka P.E., Bauer H.J., Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops, Int. J. Multiphase Flow 47 (2012) 37–49.

63) Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. / Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 209 с.

64) Померанцев В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.И. Арефьев, Д.В. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

65) Launder B.E., Lectures in mathematical models of turbulence / Launder B.E., Spalding D.B. – London: Academic Press, 1972. – 236 p.

66) Launder B.E., Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc / Launder B. E., Sharma B. I. // Letters in Heat and Mass Transfer. – 1974. – V. 1. I. 2. – P. 131 – 137.

67) Smirnov P.E., Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term / Smirnov P.E., Menter F.R. // Journal of Turbomachinery. – 2009. – V. 131. I. 4. – P. 1-8.

68) ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory.

- 69) Белов И.А., Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. / Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А – Л.: Судостроение, 1989. С. –253.
- 70) Siegel R., Thermal Radiation Heat Transferr / Siegel R., Howell J.R. – Washington D.C.: Hemisphere Publishing Corp, 1992. – 1072 p.
- 71) Faeth G.M., Mixing, transport and combustion in sprays / Faeth G.M. // Progress in Energy and Combustion Science. – 1987. – V. 13. I. 4. – P. 293–345.
- 72) Berlemont A. Particle Lagrangean simulation in turbulent flows / Berlemont A, Desjonqueres P, Gouesbet G. // International Journal of Multiphase Flow. – 1990. – V. 16. I. 1. – P. 19–34.
- 73) Peters A.A.F., Weber R. Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame, Combustion Science and Technology, 1997, 122. I(1-6), 131-182.
- 74) Kobayashi H., Howard J.B., Sarofim A.F., Proc. Combust. Inst. 1977, 16, 411-425.
- 75) Cho C.P., Jo S., Kim H.Y., Yoon S.S., Numer. Heat Transfer, Part A: Appl. 2007, 52, 1101-1122.
- 76) Ubhayakar S.K., Stickler D.B., von Rosenberg C.W., Gannon R.E., Proc. Combust. Inst., 1976, 16, 427-436.
- 77) Fletcher T.H., Kerstein A.R., Pugmire R.J., Grant D.M. Energy Fuels, 1990, 4, 54-60.
- 78) Genetti D., Fletcher T.H. Predicting C NMR measurements of chemical structure based on the elemental composition and volatile matter content of coal. Utah: Brigham Young University, Department of Chemical Engineering, 1998.
- 79) Magnussen B.F. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow / Magnussen B.F., Hjertager B.W. // In: Proc 19th AIAA Aerospace Meeting, St. Louis, USA. – 1981.– P. 23-29
- 80) Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва / Хитрин Л.Н. –Изд-во Московского ун-та, 1957. – 442 с.

- 81) Baum M.M. Predicting the combustion behaviour of coal particles / Baum M.M., Street P.J. // *Combust. Sci. Tech.* – 1971. – 3(5). – P. 231-243.
- 82) Smith I.W. The combustion rates of coal chars: A review / Smith I.W. // *19th Int. Symp. On Combustion.* – 1982. – P. 1045-1065.
- 83) Brown B.W. Measurement and prediction of entrained-flow gasification processes / Brown B.W., Smoot L.D., Smith P.J., Hedman P.O. // *AIChE J* – 1988. – P. 34:435–46.
- 84) Zeldovich Y.B., Sadvnikov P.Y., Frank-Kamenetckiy D. A., AS USSR. p. 317 (1947)
- 85) DeSoete G.G. In: Fifteenth symposium (international) on combustion. The Combustion Institute; p. 1093–1102 (1975)
- 86) Chen W., PhD thesis of Brigham Young University, (1994)
- 87) Быстров Ю. А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
- 88) Crow C. T. The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for gas droplet flows / C. T. Crow, M. P. Sharma, D. E. Stock // *Journal of Fluids Engineering.* – 1977. – P. 325–332.
- 89) Peters A.A. Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame / Peters A.A., Weber R. F. // *Combustion Science and Technology.* – 1997. – Vol. 122, No. 1-6. – P. 131-182.
- 90) Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor / A. P. Burdukov, V. I. Popov, T. S. Yusupov, M. Yu. Chernetskiy, K. Hanjalić // *Fuel.* 2014. V. 122. P. 103-111.
- 91) Моделирование и натурные испытания вихревых плазменно-топливных систем для воспламенения высокозольного энергетического угля / В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, Ю.Е. Карпенко, М.Ю. Чернецкий, А.А. Дектерев, С.А. Филимонов // *Теплоэнергетика.* 2015. № 6. С. 59-69.

- 92) Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки / Ю.А. Аникин, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 6. С. 815-818.
- 93) Investigation into the structure of a swirling flow in a model of a vortex combustion chamber by laser doppler anemometry / I.S. Anufriev, Yu. A. Anikin, A.I. Fil'kov, E.L. Loboda, M.V. Agafontseva, D.P. Kasymov, A.S. Tizilov, A.V. Astanin, A.V. Pesterev, E.V. Evtuyshkin // Technical Physics Letters. 2013. V. 39. № 1. P. 30-32.
- 94) Разработка низкотемпературных реакторов термохимической конверсии для угольной энергетики / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Н.В. Вальцев, С.И. Гордеев, Г.И. Худякова, П.В. Осипов, Н.А. Абаимов, Н.В. Чернявский, В.Л. Шульман // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 47-55.
- 95) Численное исследование и оптимизация циклонного газификатора бурых углей / Н.А. Абаимов, А.Ф. Рыжков, Ю.С. Теплицкий, Е.А. Пицуха, Э.К. Бучилко // Научное обозрение. 2014. № 8-2. С. 630–637.
- 96) Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 81-93.
- 97) Анализ RANS моделей турбулентности на примере расчёта стационарного течения в отсасывающей трубе гидротурбины Turbine-99 / А.В. Сентябов, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерёв, А.В. Минаков // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 1. С. 86-93.
- 98) Brown B.W. Measurement and prediction of entrained-flow gasification processes / Brown B.W., Smoot L.D., Smith P.J., Hedman P.O. // AIChE J – 1988. – P. 34:435–46.
- 99) Kumar M., Multiphysics simulations of entrained flow gasification. Part II: Constructing and validating the overall model/ Kumar M, Ghoniem A.F. // Energy Fuels – 2012 – 26(1). – P. 464–79.
- 100) Abani N., Large eddy simulations of coal gasification in an entrained flow gasifier / Abani N, Ghoniem A.F. // Fuel – 2013. – 104. – P. 664–80.

101) Pedel J, Thornock J.N., Smith P.J. Large eddy simulation of pulverized coal jet flame ignition using the direct quadrature method of moments / Pedel J, Thornock J.N., Smith P.J. // *Energy Fuels*. – 2012. – 26(11):66. – P. 86–94.

102) Богомолов С.В., Козлов С.Г., Алфимов Е.Г., Фелькер А.А., Сжигание водоугольной суспензии ерковецкого угля на огневом стенде, сборник научных трудов: Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях сибиря. Красноярск. 1995 г.

103) Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Литвинцев К.Ю. «Использование программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов» // *Вычислительные технологии*. – 2003. – Т. 8, Ч. 1. – С. 250–255.

104) Wasaka S., Operational experience at the 150 t/d EAGLE gasification pilot plant / Wasaka S, Suzuki E. // *Gasification technologies conference*; October 12-15, 2003. SanFrancisco, CA, USA.

105) Wasaka S., The development of coal energy application for gas, liquid & electricity EAGLE / Wasaka S, Sotooka M, Kobori K. // *Japan: ICOPE*; November 9-13, 2003

106) Kiso F., A simulation study on the enhancement of the shift reaction by water injection into a gasifier/ F. Kiso, M. Matsuo// *Energy*. – 2011 – 36. – P. 4032-4040

107) Козлов В. А., Влияние химического состава золы углей на технологические свойства кокса / В.А. Козлов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – №. 55. – С. 231–237.

108) Ходаков Ю.С., Оксиды азота и теплоэнергетика: проблемы и решения. М.:ООО «ЭСТ-М», 2001. – 432с.: ил.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ
РЕЗУЛЬТАТОВ В ЗАО «КОРПОРАЦИЯ ПРОТЭН»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ЗАО «Корпорация ПРОТЭН»

/ Л.В. Карташова /

«03» апреля 2017 г.



АКТ

об использовании в ЗАО «Корпорация ПРОТЭН» научных результатов, полученных аспирантом Сибирского федерального университета КУЗНЕЦОВЫМ ВИКТОРОМ АЛЕКСАНДРОВИЧЕМ

Мы, нижеподписавшиеся: технический директор Кравченко И.В., руководитель отдела разработок Кравченко А.И., составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы КУЗНЕЦОВА В.А. используются в практической деятельности ЗАО «Корпорация ПРОТЭН» (ИНН 5409234487, КПП 540901001, ОГРН 1105473002315), а именно:

- математическая модель процессов аэродинамики, теплообмена и горения водоугольного топлива в топочной камере промышленного котла KE 10-13,
- результаты расчетного исследования сжигания водоугольного топлива,
- результаты расчетов конструктивных изменений и способов организации топочного процесса в котле на водоугольном топливе.

_____/ И.В. Кравченко /

_____/ А.И. Кравченко /

«03» апреля 2017 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)
УРАЛЬСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (УралЭНИИ)
ул. С.Ковалевской, 5, Екатеринбург, 620002
тел./факс.: (343) 375-41-87
e-mail: enin@urfu.ru



УТВЕРЖДАЮ:

Директор Уральского
энергетического института
С.Ф. Сарапулов
« 21 » мая 2018 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Кузнецова Виктора Александровича на соискание степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Кузнецова Виктора Александровича внедрены и используются в учебном процессе и исследовательской деятельности кафедры Тепловые электрические станции Уральского энергетического института Уральского федерального университета в рамках учебного курса «Математическое моделирование». В диссертационной работе, посвященной изучению процессов тепло- и массообмена для нетрадиционных способов энергетического использования угольного топлива, рассмотрена задача исследования режимных параметров на конверсию пылевидного угля в двухстадийном газификаторе с комбинированной противоточно-прямоточной схемой движения потоков. Результаты диссертации расширяют область научных знаний по методам численного моделирования процессов тепло- и массообмена при нетрадиционных способах переработки пылеугольного топлива. Полученные результаты численного исследования служат основой для инженерного проектирования поточных газификаторов и моделирования таких устройств. Основные результаты диссертационной работы используются при разработке экологически безопасных и высокоэффективных технологий переработки угольного топлива, а также при оптимизации характеристик проектируемых топочных камер и при поиске оптимальных конструктивных решений.

Зав. кафедрой ТЭС, к.т.н., доц.

Т.Ф. Богатова

Профессор кафедры ТЭС, д.т.н., проф.

А.Ф. Рыжков

Инженер первой категории, старший преподаватель
кафедры ТЭС

Н.А. Абаимов