

На правах рукописи



Абаимов Николай Анатольевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПОТОЧНОЙ ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНЕРГЕТИКЕ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рыжков Александр Филиппович

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов;
Тугов Андрей Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва, заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств;

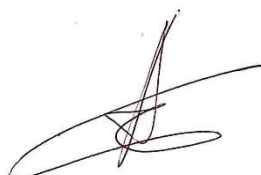
Ведущая организация: ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита диссертации состоится 07 июня 2019 года в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=289005>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Разработка высокоэффективных теплоэнергетических установок на твердом топливе, безопасных для окружающей среды и климата, является предметом интенсивных исследований во всем мире. По оценкам большинства зарубежных и отечественных специалистов, один из наиболее перспективных способов использования твердого углеродсодержащего топлива для энергетики – конверсия в парогазовых установках с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ). Применение ПГУ-ВЦГ позволяет решить ряд ключевых задач, стоящих перед современной угольной энергетикой: повысить КПД электростанции до 50–55%; максимально снизить выбросы углекислого газа в атмосферу (при улавливании и захоронении углерода); повысить гибкость выработки электроэнергии совмещением электрогенерации с производством химических продуктов; использовать широкий спектр твердых топлив. В проекте Энергетической стратегии России на период до 2035 г. подчеркивается необходимость создания и применения ПГУ-ВЦГ с КПД нетто 50%. Принципиально ПГУ-ВЦГ отличаются от ПГУ, работающих на природном газе, структурой узла подготовки топливного газа, ключевым элементом которого является газификатор. Одним из наиболее эффективных типов газификаторов большой мощности считается воздушный поточный газификатор. Для повышения основных показателей работы газификатора (химический КПД, степень конверсии углерода топлива и др.) и его стоимости необходимо интенсифицировать термохимические процессы поточной воздушной газификации угля. Исследования в этой области осложнены нехваткой подробных экспериментальных данных и надёжных расчётных моделей.

Тема работы соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 08 - Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика), Перечню критических технологий РФ (п. 27 - Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе), основным научным направлениям УрФУ и кафедры Тепловые электрические станции.

Степень разработанности проблемы. Проблемами конверсии (сжигания и газификации) твёрдого топлива, в основном угля, занимались в разные периоды времени многие отечественные исследователи: Предводителей А.С., Вулис Л.А., Хитрин Л.Н., Канторович Б.В., Кнорре Г.Ф., Померанцев В.В., Франк-Каменецкий Д.А., Бабий В.И., Хзмалян Д.М., Головина Е.С., Баскаков А.П. и др. Конкретно вопросы, связанные с поточной газификацией твёрдого топлива, затрагивали следующие отечественные учёные: Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Клер А.М., Тю-

рина Э.А., Дектерёв А.А., Чернецкий М.Ю., Бурдуков А.П., Шестаков Н.С., Мингалеева Г.Р., Николаев Ю.Е. и др. Из зарубежных авторов данной тематикой занимались: Грабнер М., Майер Б., Хигман К., Ватанабе Х., Майстренко А.Ю., Гиуффрида А., Оки И., Ханьялич К., Мессерле В.Е, Чернявский Н.В., Чен К., Кунзе К., Никритюк П., Вискеллари М., Хассе К., Кумар М., Гхонием А., Ли Х. и др. Исследования вышеперечисленных авторов посвящены эксперименту и его первичной обработке, либо моделированию работы установки в узком диапазоне входных параметров.

Цели и задачи исследования. Объект исследования - термохимические процессы, происходящие при поточной воздушной газификации угля в различных энергетических установках.

Предмет исследования – способы интенсификации термохимических процессов поточной воздушной газификации угля применительно к энергетике.

Цель работы - исследовать способы интенсификации термохимических процессов поточной воздушной газификации угля, позволяющие повысить теплоту сгорания и отношение H_2/CO в синтез-газе (экологический показатель, рост которого снижает генерацию NO_x при сжигании синтез-газа (Hasegawa T., 2010)), с помощью комбинации экспериментальных и расчётных методов.

Задачи работы:

1) Адаптация и верификация по литературным и полученным экспериментальным данным CFD-модели поточной газификации, включающей в себя подмодели, необходимые для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля.

2) Проведение экспериментальных исследований способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля.

3) Анализ полученных экспериментальных данных с помощью нульмерной термодинамической модели и адаптированной CFD-модели.

4) Определение чувствительности основных характеристик процесса поточной газификации к воздействию способов интенсификации термохимических процессов с помощью полученных экспериментальных данных и адаптированной CFD-модели.

5) Оценка эффекта от применения способов интенсификации воздушной поточной газификации угля, происходящей в промышленном газификаторе с использованием адаптированной CFD-модели.

Научная новизна:

1) Адаптирована и верифицирована по литературным и полученным экспериментальным данным CFD-модель поточной воздушной газификации, включающая в себя подмодели, необходимые для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при этом способе газификации угля.

2) Получены экспериментальные данные по влиянию способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля на теплоту сгорания синтез-газа и отношение H_2/CO в нём. Экспериментальные исследования включали в себя четыре крупных серии на трёх различных стендовых установках, на каждой из которых изучался свой перечень способов интенсификации. Обработка экспериментов проведена с помощью термодинамической модели и адаптированной CFD-модели.

3) Исследована эффективность применения способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля, происходящей в промышленном газификаторе с использованием адаптированной CFD-модели. Определена чувствительность теплоты сгорания синтез-газа и отношения H_2/CO в нём к способам интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля. Предложен комплексный способ интенсификации термохимических процессов, позволяющий повысить отношение H_2/CO до 0,75, при поддержании теплоты сгорания синтез-газа на требуемом для газовой турбины уровне 5 МДж/м³.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) Адаптированная и верифицированная по литературным и полученным экспериментальным данным CFD-модель поточной газификации может использоваться для исследования поточной воздушной газификации твёрдого топлива в достаточно широком диапазоне рабочих параметров, а также для разработки поточных газификаторов твёрдого топлива разного масштаба и режимов работы.

2) Экспериментальные результаты работы и их обработка с использованием термодинамической модели и адаптированной CFD-модели вносят свой вклад в понимание воздействия способов интенсификации термохимических процессов поточной газификации угля на основные параметры работы установок. С использованием экспериментальных результатов работы возможно проводить верификацию размерных моделей поточной газификации твёрдого топлива.

3) Полученные значения чувствительностей основных параметров работы промышленного газификатора к способам интенсификации термохимических

процессов целесообразно использовать при модернизации конструкции или режима работы полномасштабных газификаторов твёрдого топлива.

Результаты работы, приведённые в разделах 1.3.2 и 3.2.1, использованы в Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (гос. контракт № 14.516.11.0043 от 29.03.2013) по теме «Разработка технологии подготовки рабочего тела для перспективной ПГУ с внутрицикловой газификацией»; часть раздела 3.2.2 – в гранте Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-08-01226 от 18.07.2013) по теме «Фундаментальные основы модернизации ПГУ для сжигания низкосортных твердых топлив»; разделы 2.1, 2.2, 4.1 и 4.2 – в гранте Российского научного фонда (проект №14-19-00524 от 4.03.2014) по теме «Решение проблемы применения бедных промышленных и синтез-газов для выработки электроэнергии в комбинированном цикле»; разделы 2.3 и 4.3 – в гранте Российского фонда фундаментальных исследований (№16-38-50188 от 14.03.2016) по теме «Экспериментальное и численное исследование высокотемпературной паровоздушной газификации угля в поточной установке». Часть результатов внедрена и используется в НПО ЦКТИ, Институте теплофизики СО РАН, Сибирском федеральном университете, а также на кафедре ТЭС УрФУ в дисциплинах «Математическое моделирование», «Горение и газификация», «Высокие наукоёмкие технологии в теплоэнергетике и теплотехнике» и др.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются:

1) Экспериментальный метод. Проведено четыре крупные серии опытов на трёх экспериментальных установках.

2) Термодинамическое моделирование. Использован метод максимизации энтропии (экстремальный принцип максимальной скорости порождения энтропии).

3) Численное CFD-моделирование. Данное моделирование основано на CFD-методе (Computational Fluid Dynamics, вычислительная гидродинамика).

Кроме того, применены методы измерения, сравнения, аналогии, обобщения, анализа, синтеза и специальные методы научного познания. Методология работы заключается в комбинировании и взаимодополнении экспериментальных исследований, термодинамического и CFD-моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Адаптированная и верифицированная по литературным и полученным экспериментальным данным CFD-модель поточной газификации, включающая в

себя подмодели, необходимые для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля.

2) Полученные экспериментальные данные по влиянию способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля на теплоту сгорания синтез-газа и отношение H_2/CO в нём.

3) Результаты исследования эффективности применения способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля, происходящих в экспериментальных и в промышленном газификаторе с использованием адаптированной CFD-модели.

Личный вклад автора: Общее направление экспериментальных и теоретических работ задавалось научным руководителем проф., д.т.н. Рыжковым А.Ф. Совместно с сотрудниками кафедры ТЭС УрФУ автор участвовал в научных исследованиях в рамках ряда грантов. Автором лично:

1) Проанализирована научно-техническая информация и поставлены задачи исследования.

2) Составлена программа исследований на трёх экспериментальных установках. Принято участие в проведении экспериментов.

3) Адаптирована и верифицирована по литературным и полученным экспериментальным данным CFD-модель поточной газификации.

4) Обработаны результаты проведённых экспериментов с помощью термодинамической модели и адаптированной CFD-модели.

5) Исследована эффективность и определена чувствительность применения способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля, происходящих в экспериментальных и в промышленном газификаторе с использованием адаптированной CFD-модели.

Автор выражает благодарность коллективу НПО ЦКТИ (зав. лабораторией № 54 Шестакову Н.С. и инженеру Шурчалину А.А.), коллективу ИТ СО РАН (гл. науч. сотр. Бурдукову А.П. и инженеру-исследователю Бутакову Е.Б.) за помощь в организации экспериментов, а также старшему преподавателю кафедры ТЭС УрФУ Осипову П.В. за предоставление ряда кинетических констант гетерогенных реакций используемых углей.

Автор признателен научному руководителю проф., д.т.н. Рыжкову А.Ф., а также коллективу кафедры ТЭС УрФУ и лично, доц., к.т.н. Богатовой Т.Ф. за большое количество потраченного времени и сил, а также ценные замечания и полезные советы.

Достоверность результатов работы:

1) При проведении экспериментальных исследований использовались апробированные методики измерений и метрологически поверенные приборы. Полученные экспериментальные результаты согласуются с литературными данными. Относительная погрешность измерительных приборов не превышала 3-5%.

2) Термодинамическое моделирование равновесного состава продуктов реагирования выполнено с помощью метода максимизации энтропии (экстремальный принцип максимальной скорости порождения энтропии). Метод основан на фундаментальных законах термодинамики и неоднократно верифицировался в литературе при решении задач такого рода.

3) Адаптированная CFD-модель включает в себя подмодели, необходимые для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля. Верификация модели проведена с использованием как собственных экспериментальных результатов, так и литературных данных. Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что говорит о применимости разработанной CFD-модели для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля.

Апробация результатов. Основные результаты работы прошли апробацию на: Минском Международном Форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2012, 2016); конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике» (Екатеринбург, 2013); международной научно-технической конференции «Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 2014, 2016); международной научно-практической конференции «Энергоэффективность энергетического оборудования» (Санкт-Петербург, 2014); Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014, 2018); 31st Annual International Pittsburgh Coal Conference: Coal - Energy, Environment and Sustainable Development (Питтсбург, США, 2014); Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2014, 2016); всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015, 2018); международной конференции "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках" (Казань, 2015); International Seminar on Flame Structure (Новосибирск, 2017).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликована 21 работа, 15 из которых напечатаны в изданиях, определенных ВАК (из них 12 проиндексированы в международной базе Scopus и 4 в Web of Science). В список работ

также вошли 2 главы в коллективной монографии и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура работы. Работа изложена на 194 страницах, содержит 5 глав, 59 рисунков и 24 таблицы. При подготовке работы использован 231 литературный источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации приведены актуальность темы исследования; степень ее проработанности; цели и задачи; научная новизна; теоретическая и практическая значимость работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту; степень достоверности и апробации результатов, а также другие сведения.

В **первой главе** работы проведён анализ научно-технической информации и постановка задач исследования. На основе проведённого анализа выделены следующие целесообразные способы интенсификации термохимических процессов, протекающих при поточной газификации угля: нагрев реагентов (дутьевого воздуха и угля); повышение давления; подача водяного пара; механоактивация (тонкий помол угля (<40 мкм), сопровождающийся увеличением кинетической составляющей скорости реагирования); многоуровневый подвод реагентов.

Обзор отечественных и зарубежных экспериментальных установок выявил необходимость использования экспериментальных газификаторов с требуемыми режимными и конструктивными особенностями. Для моделирования идеализированных процессов или для первичной оценки экспериментальных результатов целесообразно использовать нульмерную термодинамическую модель. При комплексном многопараметрическом исследовании применяют модели, основанные на методе вычислительной гидродинамики (CFD).

Во **второй главе** рассмотрены конструкции и принципы работы экспериментальных газификаторов. Для проведение экспериментальных исследований способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля, подобраны три экспериментальные установки, одна из которых располагается в ЦКТИ (Санкт-Петербург) и две в ИТ (Новосибирск). На каждой из этих установок исследуется свой набор способов интенсификации.

Установка ЦКТИ (установка №1) использована для исследования влияния впрыска воды (водяного квенчинга) на одноступенчатую воздушную газификацию угля в условиях повышенного давления и высокотемпературного дутья. Установка тепловой мощностью по топливу 0,1 МВт является одноступенчатым

автотермическим газификатором под давлением (до 1,6 МПа) со стадией паровой коррекции в секции водяного квенчинга синтез-газа.

Газификатор представляет собой вертикально расположенный сосуд под давлением высотой 5,6 м и диаметром 0,72 м, состоящий из двух частей (рис. 1). В верхней части расположена камера газификации диаметром 0,21 м и высотой 1,6 м покрытая обмуровкой. В нижней части – камера охлаждения (секция водяного квенчинга и шлаковая ванна). В качестве топлива использовался кузнецкий каменный уголь марки Д стандартного помола. Экспериментальные данные свидетельствуют о стабильной работе установки при подогреве дутья до 400-500°С и стенок до 1100-1300°С, а также о росте теплоты сгорания до 4 МДж/м³ при коэффициенте расхода воздуха (α) 0,44.

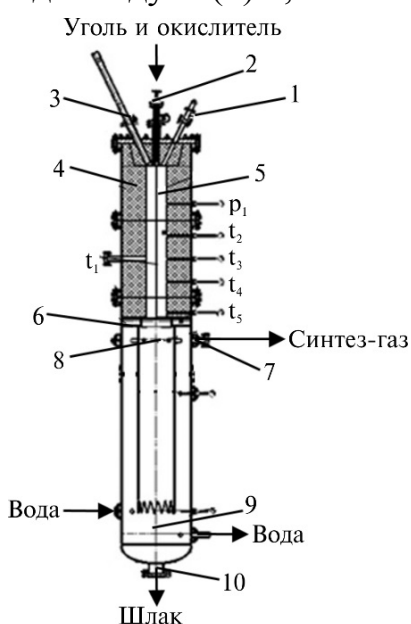


Рисунок 1 - Установка одноступенчатой газификации:

- 1 – смотровое окно,
- 2 – двухтопливная горелка,
- 3 – запально-стабилизирующее устройство,
- 4 – обмуровка камеры газификации,
- 5 – реакционная камера,
- 6 – водоохлаждаемое кольцо,
- 7 – патрубок вывода синтез-газа,
- 8 – секция водяного квенчинга,
- 9 – шлаковая ванна,
- 10 – шаровой кран для слива шлака

Двухступенчатый процесс газификации в установках ИТ организуется подачей в первую ступень угля тонкого помола, а во вторую ступень: угля стандартного помола – установка № 2 (5 МВт); пара - установка № 3 (1 МВт). Обе установки представляют собой цилиндрические футерованные изнутри сосуды атмосферного давления, на одном конце которых находится улиточный завихритель, в который подаётся первичный механоактивированный уголь напрямую из мельницы-дезинтегратора. Осесимметрично с камерой реагирования в торце завихрителя расположено сопло подачи вторичного угля стандартного помола у воздушной установки и пара у паровоздушной (рис. 2). Размеры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры воздушной и паровоздушной установок

Номер установки	L ₁ , м	L ₂ , м	L ₃ , м	D ₁ , м	D ₂ , м	D ₃ , м
2	0,14	1,5	0	0,5	0,32	0,05
3	0,1	1,1	0,1-0,25	0,3	0,15	0,03

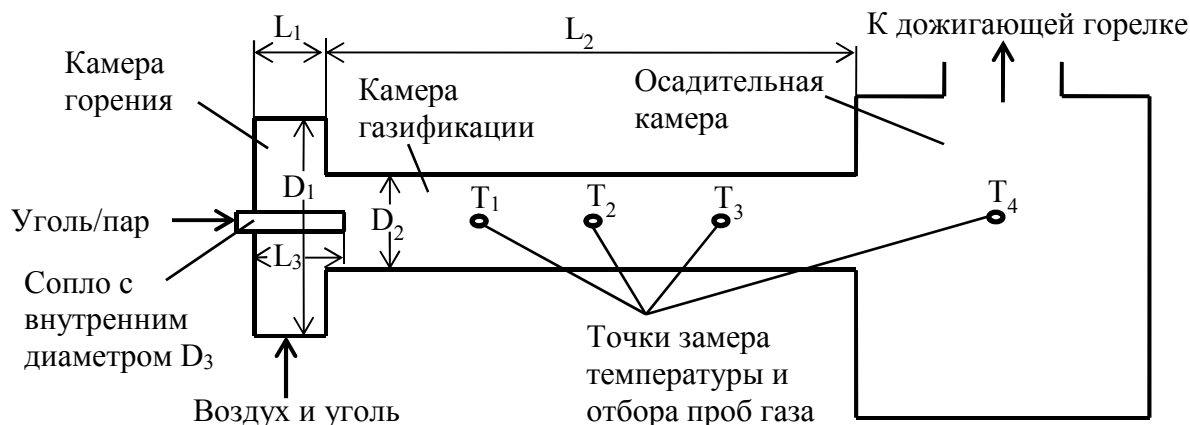


Рис. 2. Установки воздушной и паровоздушной двухступенчатой газификации

Установка № 2 использована для исследования влияния двухступенчатого подвода угля разного помола на процесс воздушной газификации в условиях подвода реагентов с низкой температурой. В экспериментах применялся каменный Кузнецкий уголь марки Д РОКІ. Экспериментальные данные говорят о стабилизации автотермического режима даже при использовании холодных реагентов благодаря подаче угля тонкого помола в первую ступень и о росте теплоты сгорания до $3,43 \text{ МДж/м}^3$ при снижении α от 1,1 до 0,41.

Установка № 3 использована для исследования влияния расхода и точки подвода пара на процесс паровоздушной газификации угля тонкого помола при подводе реагентов с низкой температурой. Экспериментальные данные подтверждают полученные результаты о стабилизации автотермического режима даже при использовании холодных реагентов благодаря подаче механоактивированного угля в первую ступень. В первой серии опытов теплота сгорания увеличивалась на 70% при увеличении расхода пара до 0,5 кг/кг угля. Однако увеличение теплоты сгорания оказалось связано не с повышением расхода пара, а с ростом температуры стенки с 400 до 1100°C. Во второй серии опытов вторичная среда (водяной пар) при подаче в улиточный завихритель препятствовала стабилизации процесса, поэтому паровое сопло во всех случаях было погружено в камеру реагирования и дальнейшее его погружение до 1,67 калибров (L_3/D_2) увеличивало теплоту сгорания на 40%. Первая серия проведена с использованием каменного Кузнецкого угля марки Д РОКІ, вторая - с Переясловским бурым углём ЗБР.

В первых трёх сериях экспериментов в качестве переменного параметра выступает α , а в четвёртой – глубина погружения парового сопла в установку № 3.

Третья глава содержит описание используемой термодинамической модели и адаптированной CFD-модели, а также верификацию и настройку последней. Термодинамическое моделирование равновесного состава продуктов реагирования выполнено с помощью метода максимизации энтропии (экстремальный прин-

цип максимальной скорости порождения энтропии). В настоящей работе данный метод используется для проведения следующих двух расчётов.

Расчёт 1 выполнен с целью определения конечных параметров синтез-газа при проведении процесса газификации с заданными в эксперименте расходах и температурах угля, пара и воздуха в идеализированной постановке: безостаточная газификация, термодинамическое равновесие, достигаемое при соответствующих температурах и давлении.

Расчёт 2 выполнен с целью анализа экспериментальных данных процесса газификации в представлении достижения термодинамического равновесия уже на выходе из камеры реагирования. Выходная температура и давление в расчёте принимается как в эксперименте. В этом расчёте количество входящих реагентов (угля и пара) снижается до таких значений, при которых равновесный состав продуктов реагирования становится близким к экспериментальным данным. Таким образом определяется количество прореагировавших реагентов (угля и пара).

Адаптированная CFD-модель представляет собой комплекс взаимосвязанных подмоделей. Адаптация заключалась в подборе наиболее адекватной для вихревого режима течения подмодели турбулентности, применении кинетических констант используемых углей, настройке и отработке модели в целом. К базовым подмоделям CFD-моделирования относятся уравнения: неразрывности, энергии, переноса компонентов среды, равновесия сил для дискретной фазы, закон сохранения импульса и т.д. В результате верификации из трёх популярных подмоделей турбулентности (k-ε, k-ω SST, RSM SSG) выбрана подмодель турбулентности k-ω SST. В качестве модели радиации (переноса энергии излучением) использована дискретная подмодель излучения (32 луча) с подмоделью “серых” газов. Выход летучих веществ из угля описывается одноступенчатой подмоделью с литературными кинетическими константами. Подмодель газофазного (гомогенного) реагирования учитывает скорость кинетического реагирования газов, а также их диффузионное перемешивание. Размер частиц угля менялся пропорционально изменению их массы (модель стягивающегося ядра). Подмодель гетерогенного реагирования – диффузионно-кинетическая:

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -\pi d_p^2 p_g \frac{k_d k_c}{k_d + k_c}; \quad k_d = D_0 \frac{[T_p + T_g/2]^{0.75}}{d_p}; \quad k_c = A_c e^{(E_c/RT_p)},$$

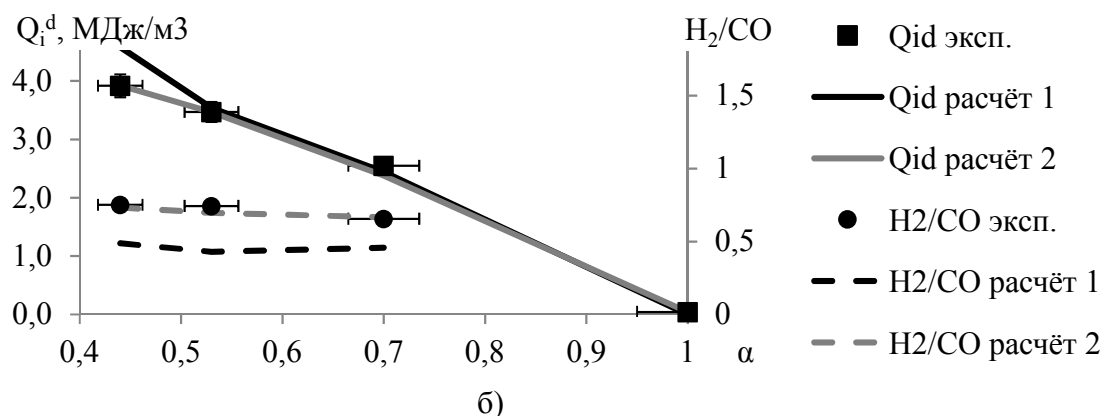
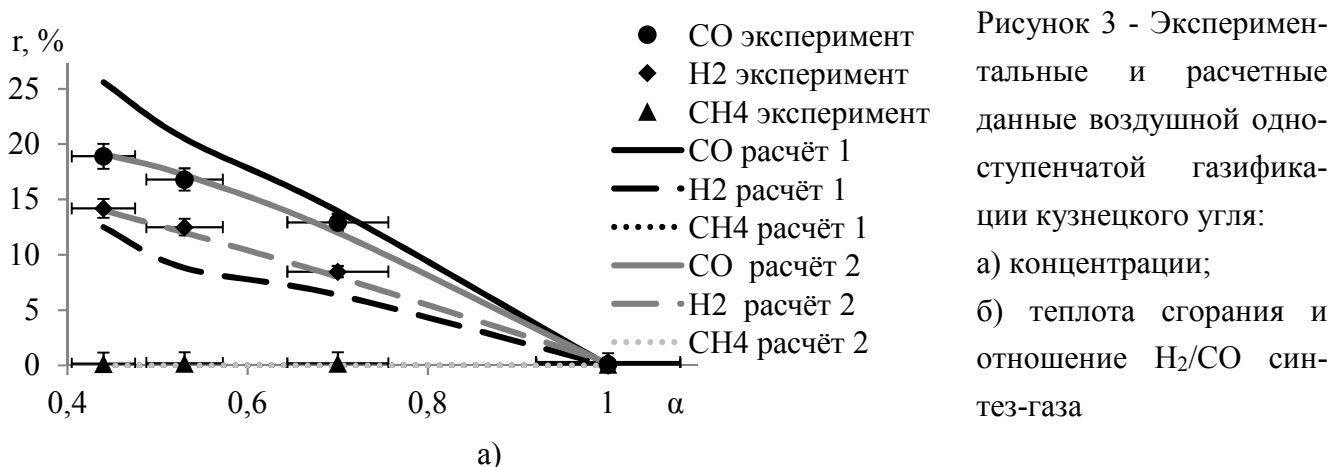
где m_p – масса частицы угля (кг); τ – время (с); d_p – диаметр частицы (м); p_g – парциальное давление газа (Па); k_d – диффузионный коэффициент скорости реакции (кг/(с·м²·Па)); k_c – кинетический коэффициент скорости реакции (кг/(с·м²·Па)); D_0 – константа диффузии (кг/(с·м·Па·К^{0.75})); T_p – температура частицы (К); T_g – тем-

пературы газа (К); A_c – предэкспоненциальный множитель (кг/(с·м²·Па)); E_c – энергия активации (Дж/моль); R – универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)). Кинетические константы A_c и E_c используемых углей получены на приборе термогравиметрического анализа (Abaimov N.A., Osipov P.V., Ryzhkov A.F., 2016).

Верификация подмодели турбулентности проведена с использованием литературных экспериментальных данных по распределению давления и скорости, полученных на изотермической циклонной камере ИТМО НАН Беларуси (Пицуха Е.А., 2012). CFD-модель верифицирована с использованием экспериментальных данных, полученных на двух газификаторах с расходом топлива 2 т/сут (Watanabe H., 2006) и 1700 т/сут (Hashimoto T., 2009). Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что говорит о применимости разработанной CFD-модели для исследования способов интенсификации термохимических процессов воздушной поточной газификации угля.

В четвёртой главе приведён анализ полученных экспериментальных данных с помощью термодинамической модели и адаптированной CFD-модели.

Расчётно-экспериментальные исследования, проведенные на установке № 1, позволили решить первую поставленную задачу - исследовать влияние впрыска воды (водяного квенчинга) на одноступенчатую воздушную газификацию угля в условиях повышенного давления и высокотемпературного дутья.



Концентрации компонентов синтез-газа (рис. 3а), полученного на экспериментальной установке, отличаются от равновесных расчетных концентраций в основном ввиду протекания реакции сдвига водяного газа при водяном квенчинге и неполного выгорания углерода топлива. При химическом реагировании водяных паров секции квенчинга с газотопливным потоком в количестве 0,3 кг на 1 кг топлива отношение H_2/CO возрастает на 0,2-0,27 (рис. 3б).

Расчетный механический недожог составил порядка 10 % при $\alpha=0,44$ и около 0 % при $\alpha=1$. Количество воды, прореагировавшей в секции водяного квенчинга, превысило количество воды, содержащейся в угле, в 3 раза при $\alpha=0,44$. В режиме полного сгорания ($\alpha=1$) реакция сдвига водяного газа не оказала значительного влияния на конечный состав синтез-газа из-за отсутствия в продуктах сгорания CO и H_2 .

Для оценки влияния процессов, проходящих в секции водяного квенчинга, на работу газификатора использована разработанная CFD-модель (рис. 4).

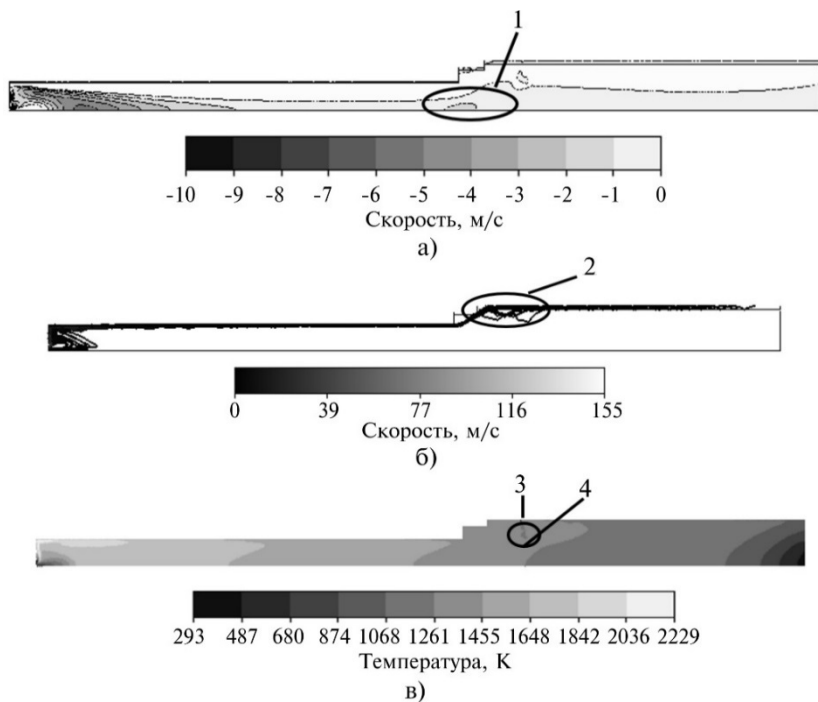


Рисунок 4 – CFD-исследование влияния впрыска воды (водяного квенчинга) на одноступенчатую воздушную газификацию угля:

- а) скорость возвратных течений (белый цвет – к выходу из камеры);
- б) траектории движения угольной пыли на начальном участке;
- в) распределение температур в продольном сечении сегмента

В области внезапного расширения (на выходе из реакционной камеры перед точкой подачи воды) в приосевой зоне образуется относительно сильный возвратный вихрь (зона 1, рис. 4а), который увеличивает время пребывания и реагирования газов с водяным паром квенчинга. Но этот эффект почти не воздействует на траекторию движения топлива, так как оно движется в пристеночной области (зона 2, рис. 4б). В секции квенчинга водяная струя (зона 3) не достигает приосевой области при этом вода физически охлаждает синтез-газ на 200-500 К, поэтому снижение температуры (зона 4) потока газов заметно лишь у стенки (рис. 4в).

Расчётно-экспериментальные исследования, проведенные на *установке № 2*, позволили решить поставленную задачу - исследовать влияние двухступенчатого подвода угля разного помола на процесс воздушной поточной газификации в условиях подвода реагентов с низкой температурой. На рис. 5 приведены экспериментальные точки в сравнении с расчетной зависимостью равновесного состава продуктов конверсии исследуемого угля. При возрастании α концентрации горючих компонент (CO , H_2) и теплота сгорания синтез-газа снижаются, а негорючих (CO_2) возрастают как в эксперименте, так и в расчёте. Отношение H_2/CO слабо падает с повышением α .

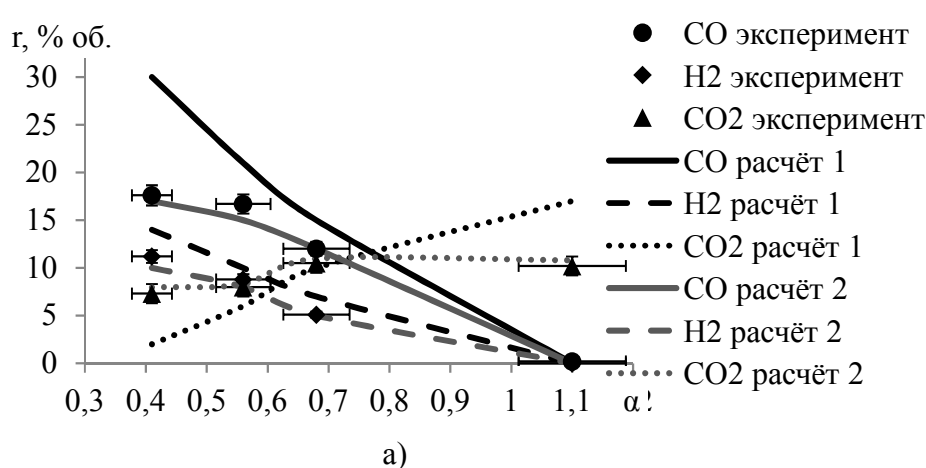
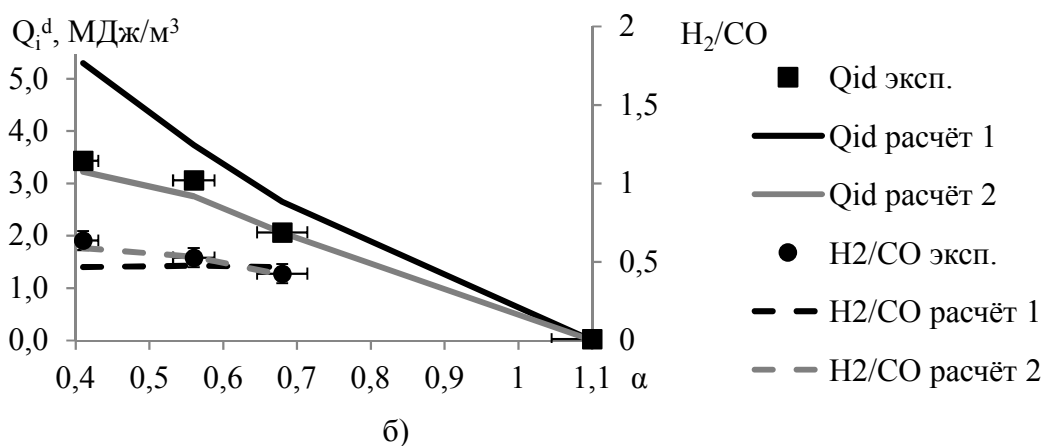


Рисунок 5 – Экспериментальные и расчетные данные воздушной двухступенчатой газификации угля:
 а) концентрации;
 б) теплота сгорания и отношение H_2/CO синтез-газа



При подаче угля стандартного помола в завихритель наблюдается неустойчивость его конверсии (горения). Повышение за счёт механоактивации реакционной способности угля позволяет решить проблему энергодефицита в автотермических газификаторах ИТ с неадиабатной стенкой на холодном (20°C) воздушном дутье с низким $\alpha=0,41$. Несовпадение значений, полученных в эксперименте и в расчёте 1, объясняется наличием механического недожога. Лабораторное исследование коксозольного остатка, отобранного после циклона, показало, что масса углерода в коксовом остатке 38 %, остаточные летучие 6 %, зольность 56 %. Степень конверсии отобранных образцов угля не превышает 50%. Близкие оценки получаются при термодинамическом и CFD расчетах.

Анализ результатов CFD-моделирования показал, что процесс горения первичного угля начинается в улиточном завихрителе и продолжается вдоль стенок реакционной камеры. Вторичный уголь начинает интенсивно выгорать лишь ближе к выходу из реакционной камеры. Установка работает на дутье комнатной температуры, поэтому у входных патрубков наблюдаются зоны с низкими температурами (рис. 6).

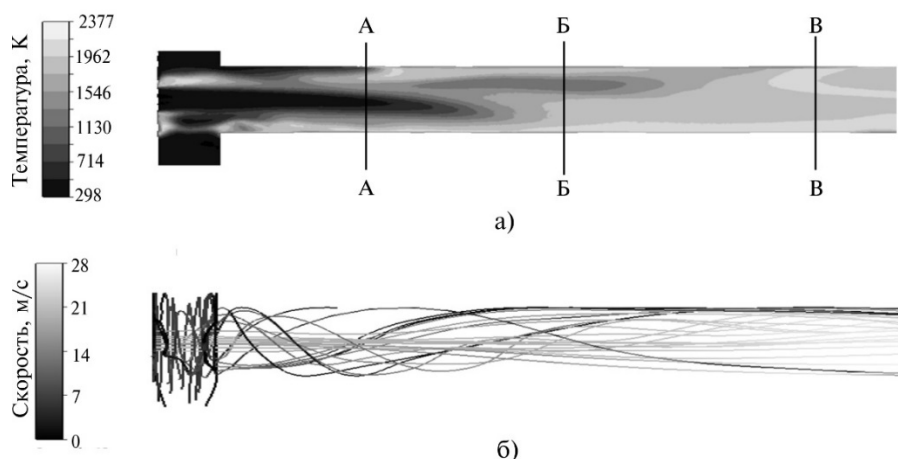


Рисунок 6 – CFD-исследование двухступенчатой воздушной газификации:

- а) распределение температур в продольном сечении;
- б) траектории движения угольной пыли

Расчётно-экспериментальные исследования, проведенные на *установке № 3* позволили решить поставленную задачу - исследовать влияние расхода и места подвода пара на процесс поточной газификации угля тонкого помола в условиях подвода реагентов с низкой температурой. При повышении расхода пара в эксперименте увеличивалось содержание в синтез-газе CO и H₂, теплота сгорания и отношение H₂/CO. Теплота сгорания растёт из-за увеличения средней температуры стенки установки с 400 до 1100°C, что было выявлено в результате CFD-моделирования. Расчёт 1 демонстрирует снижение концентрации CO и теплоты сгорания синтез-газа, которое иллюстрирует случай с постоянной температурой стенки. Кроме того, расчёт 1 показывает, что полученный из угля при $\alpha=0,42$ и $g_{п}=0,5$ кг/кг с $T_{п}=200^{\circ}\text{C}$ сухой синтез-газ равновесного состава будет иметь теплоту сгорания порядка 4,4-5 МДж/м³, соответствующую теплоте сгорания воздушного синтез-газа при отношении H₂/CO несколько больше 1 (рис. 7).

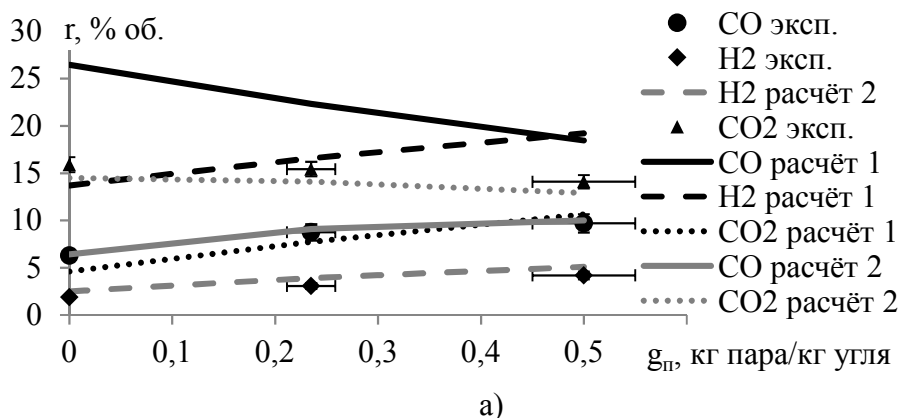
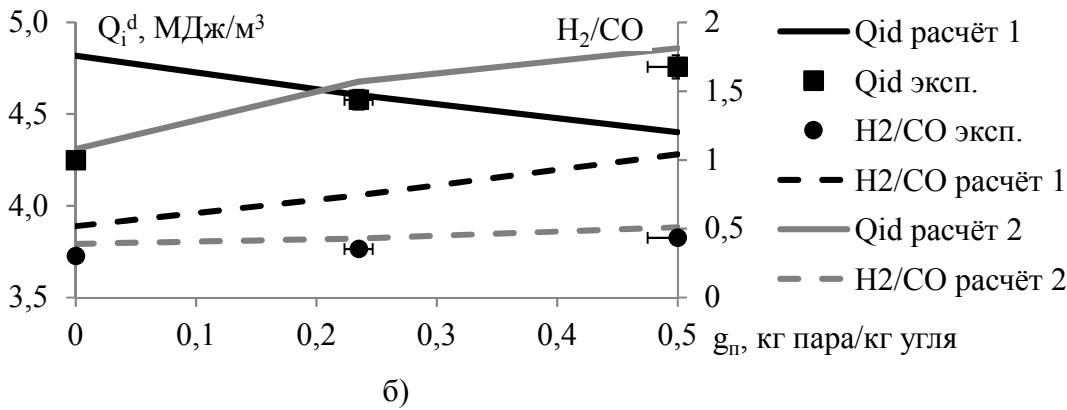


Рисунок 7 – Экспериментальные и расчетные данные паровоздушной двухступенчатой газификации угля при варьировании $g_{п}$:

- а) концентрации;
- б) теплота сгорания и отношение H₂/CO синтез-газа



б)

Анализ данных, полученных с помощью CFD-модели, показывает, что процесс конверсии в общем случае протекает в три стадии, локализация которых зависит от входных режимных и конструктивных параметров (рис. 8). Ввод в газификатор аксиальной струи относительно холодного слабоперегретого пара создаёт гидродинамическую, структурную и температурную неоднородность.

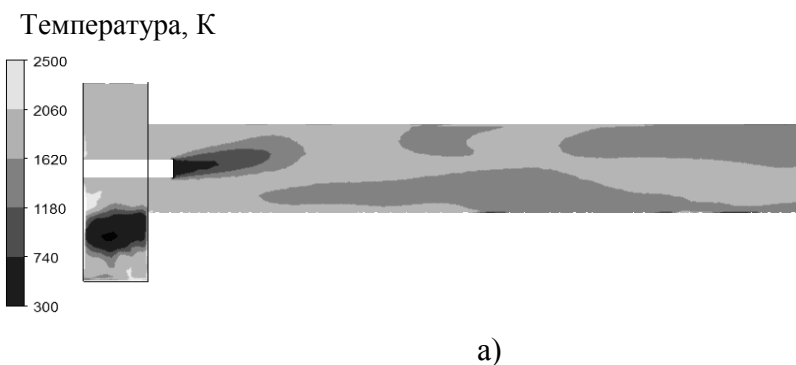
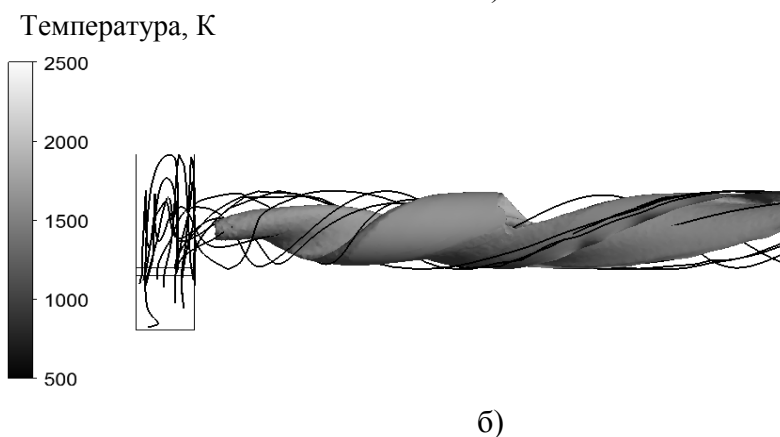


Рисунок 8 – CFD-исследование двухступенчатой паровоздушной газификации: а) распределение температур; б) изоповерхность при доле пара $H_2O=30\%$ об. и траектории частиц угля



Вторая серия расчётно-экспериментальных исследований, проведенных на установке №3, позволила решить поставленную задачу - исследовать влияние механоактивирования угля и точки подвода пара на процесс поточной газификации угля. Результаты расчёта 1 не зависят от положения парового сопла, так как расчёт 1 не учитывает степень конверсии реагентов (топлива, пара и др.). Отдаление сопла подачи от торца газификатора приводит к увеличению теплоты сгорания синтез-газа, степени конверсии углерода и снижению отношения H_2/CO . Это вызвано уменьшением времени контакта топливно-воздушной смеси со струей пара и снижением степени конверсии пара.

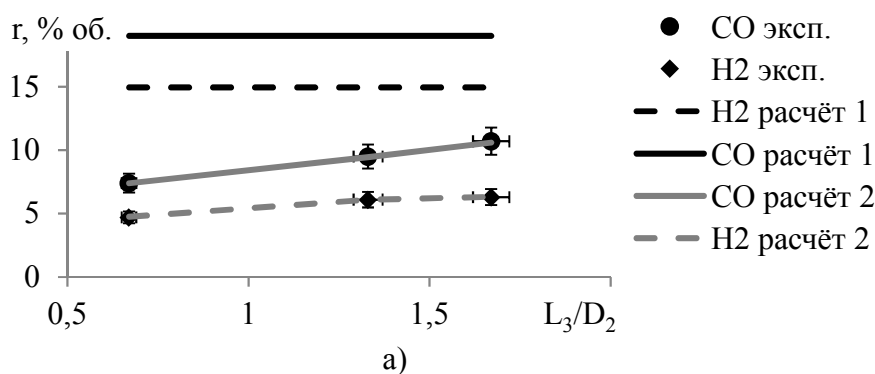
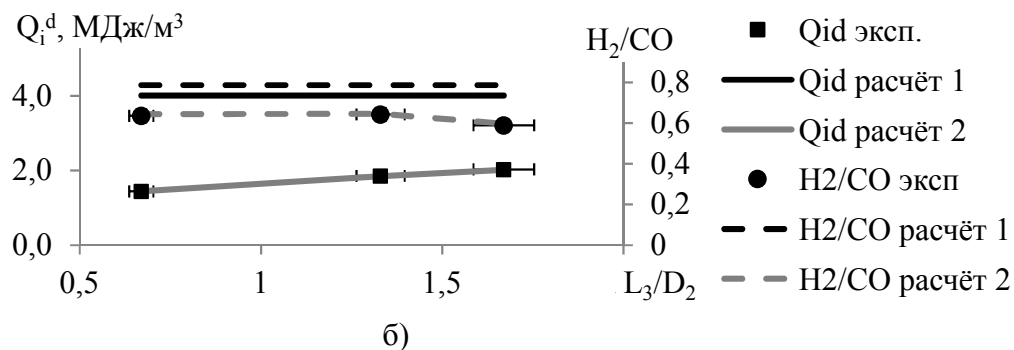


Рисунок 9 – Экспериментальные и расчетные данные паровоздушной двухступенчатой газификации: а) концентрации; б) теплота сгорания и отношение H₂/CO синтез-газа



Пятая глава посвящена оценке эффективности способов интенсификации термохимических процессов в промышленном газификаторе с помощью многовариантного CFD-моделирования работы двухступенчатого воздушного поточного газификатора МНІ с расходом топлива 1700 т/сут. Количественная оценка влияния способов интенсификации на теплоту сгорания и H₂/CO синтез-газа приведена в таблице 2.

Таблица 2. Влияние способов интенсификации на теплоту сгорания и H₂/CO синтез-газа

Параметр	T _в	P	g _п (T=500°C)	g _п (T=1200°C)	g _{МАУ}
Диапазон	500-1200, °C	3-10, МПа	0-0,5, кг/кг угля	0-0,5, кг/кг угля	0-100, %
ΔQ _i ^d , %	4,1	2,6	-12,3	-14,9	2,9
ΔH ₂ /CO, %	11,7	9,2	91,4	83,9	13,5

С целью определения чувствительности Q_i^d и H₂/CO к способам интенсификации найдены безразмерные коэффициенты чувствительности (s), которые, например, для температуры рассчитываются по формулам:

$$s_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \frac{T_{max}}{Q_{max}}; \quad s_{H_2/CO} = \frac{\Delta(H_2/CO)}{\Delta T} \frac{T_{max}}{(H_2/CO)_{max}}$$

Анализ чувствительности Q_i^d (рис. 10а) выявил, что наибольшее положительное влияние оказывает температура дутьевого воздуха (T_в), затем идут давление в газификаторе (P) и доля механоактивированного угля (g_{МАУ}). Наибольшее отрицательное влияние оказывает подача пара (g_п) при температуре паровоздушного дутья 1200°C.

Из анализа чувствительности H₂/CO в (рис. 10б) видно, что все исследованные способы интенсификации имеют положительное влияние. Наибольшее влия-

ние оказывает $g_{п}$ при температуре паровоздушного дутья 500°C , а при 1200°C влияние немного слабее. Значительно меньшее влияние оказывает $T_{в}$, затем идут P и $g_{МАУ}$.

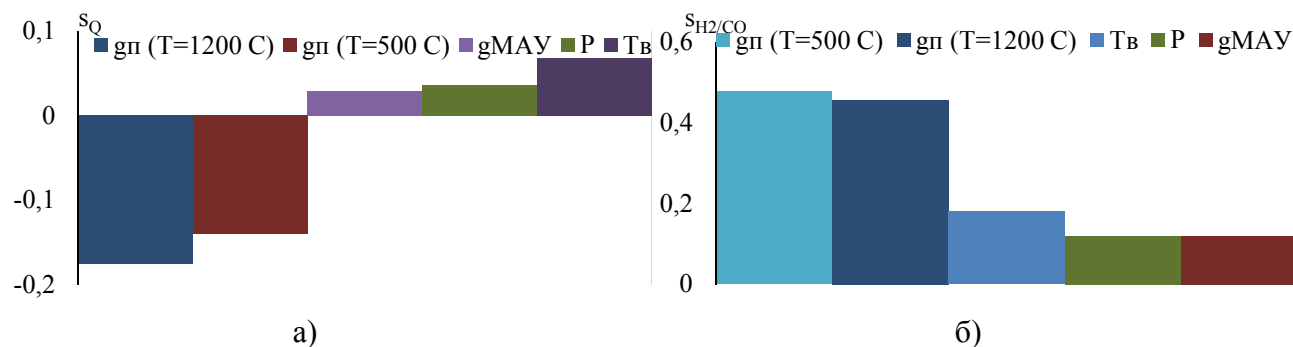


Рисунок 10 – Анализ чувствительности: а) теплоты сгорания синтез-газа; б) отношения H_2/CO

На основе проведённого в главах 4 и 5 анализа предложено техническое решение, способное оказывать комплексное влияние на процесс газификации и на работу установки в целом. Решение заключается в использовании установок предварительной подготовки реагентов перед газификацией. Конструкционно они схожи с установками №2 и №3. Такие установки позволят использовать механо-активированный уголь для нагрева дутьевого воздуха и первичного угля до 1200°C для первой ступени, а также пара с расходом $0,5$ кг/кг угля и вторичного угля для второй ступени газификатора типа МНІ. На рисунке 11 представлено сравнение влияния такого комплексного подхода и рассмотренных способов интенсификации на теплоту сгорания и отношение H_2/CO синтез-газа.

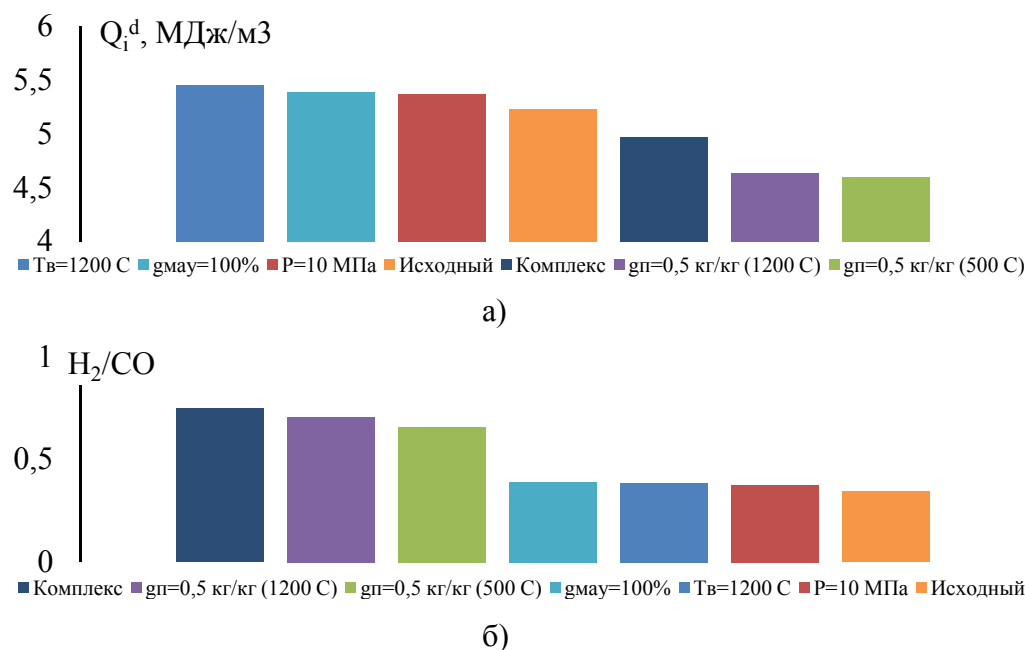


Рисунок 11 – Сравнение влияния на:
а) теплоту сгорания;
б) отношение H_2/CO синтез-газа

Из рисунка 11 видно, что комплексный подход позволяет повысить теплоту сгорания синтез-газа по сравнению с подачей пара температурой 500 и 1200°C и приблизиться к случаям без подачи пара. Синтез-газ, полученный с использова-

нием комплексного воздействия, имеет максимальное значение H_2/CO , немного выше, чем в случаях с подачей пара и существенно выше, чем в остальных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью комбинации экспериментальных и расчётных методов выполнено исследование способов интенсификации термохимических процессов поточной воздушной газификации угля, позволяющих повысить теплоту сгорания и отношение H_2/CO в синтез-газе.

Получены следующие основные результаты:

1) Адаптирована и верифицирована по литературным и собственным экспериментальным данным CFD-модель поточной воздушной газификации. Для верификации использованы экспериментальные данные, полученные на трёх установках, а также литературные данные по работе циклонной камеры ИТМО НАН Беларуси, газификаторов МНІ с расходом угля 2 т/сут и 1700 т/сут. Результаты CFD-моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что говорит о применимости разработанной CFD-модели для исследования способов интенсификации термохимических процессов, происходящих при воздушной поточной газификации угля в различных установках.

2) Проведены экспериментальные исследования способов интенсификации термохимических процессов, протекающих при воздушной газификации угля. Для проведения исследований использованы три экспериментальные установки, на каждой из них исследуется свой набор способов интенсификации: в установке №1 - впрыск воды (водяной квенчинг) в зону с температурами 1100-1200°C; в установке №2 - тонина помола (механоактивация) первичного угля и двухступенчатый подвод топлива; в установке №3 - тонина помола (механоактивация) угля и подвод пара (расход и место).

3) Осуществлён анализ полученных экспериментальных данных с помощью термодинамической модели и адаптированной CFD-модели.

а) Установка № 1. При химическом реагировании водяных паров в секции квенчинга с газотопливным потоком в количестве 0,3 кг на 1 кг топлива отношение H_2/CO возрастает на 0,2-0,27. В секции квенчинга струя воды не достигает приосевой области, что снижает степень конверсии. Снижение температуры потока газов у стенки составляет 200-500 К в зависимости от α . При $\alpha=0,44$ теплота сгорания синтез-газа составляет 4 МДж/м³.

б) Установка № 2. При $\alpha=0,41$ теплота сгорания синтез-газа составляет 3,43 МДж/м³, а $H_2/CO=0,64$. Повышение за счёт механоактивации (тонкого помола)

реакционной способности первичного угля позволяет решить проблему энергодефицита в установке с неадиабатной стенкой на холодном (20°C) воздушном дутье с низким $\alpha=0,41$. Процесс горения первичного топлива начинается в улиточном завихрителе и продолжается вдоль стенок реакционной камеры. Максимальная неравномерность температуры ($\approx 2000^{\circ}\text{C}$) наблюдается у торца улиточного завихрителя. Первичный уголь имеет винтовое периферийное движение на всем протяжении установки, а движение потока вторичного угля на участке 3-5 калибров прямолинейное. Впоследствии слабодисперсный поток вторичного угля вовлекается во вращательное движение с нарастающим размытием.

в) Установка № 3. При увеличении расхода пара до $0,5$ кг/кг угля и температуры внутренней стенки установки с 400 до 1100°C теплота сгорания синтез-газа увеличивается на 70% , а H_2/CO на 45% . При погружении парового сопла в камеру реагирования с $0,67$ до $1,67$ калибров теплота сгорания синтез-газа возрастет на 40% , а H_2/CO снижается на 7% . Ввод в установку аксиальной струи относительно холодного слабоперегретого пара создаёт гидродинамическую, структурную и температурную неоднородность. Процесс конверсии в установке протекает в три стадии, локализация которых зависит от входных режимных и конструктивных параметров.

4) Оценена эффективность способов интенсификации термохимических процессов в промышленном газификаторе с помощью многовариантного CFD-моделирования работы двухступенчатого воздушного поточного газификатора типа МНІ 1700 т/сут. Анализ чувствительности теплоты сгорания синтез-газа выявил, что наибольшее положительное влияние оказывает $T_{\text{в}}$, затем идут P и $g_{\text{МАУ}}$. Наибольшее отрицательное влияние оказывает $g_{\text{п}}$ при температуре паровоздушного дутья 1200°C , а при 500°C влияние слабее. Из анализа чувствительности отношения H_2/CO в синтез-газе видно, что все исследованные способы интенсификации имеют положительное влияние. Наибольшее влияние оказывает $g_{\text{п}}$ при температуре паровоздушного дутья 500°C , а при 1200°C влияние немного слабее. Значительно меньшее влияние оказывает $T_{\text{в}}$, затем идут P и $g_{\text{МАУ}}$.

5) Предложен комплексный способ интенсификации термохимических процессов поточной газификации, позволяющий повысить теплоту сгорания синтез-газа по сравнению с подачей пара температурой 500 и 1200°C и приблизиться к случаям без подачи пара. Данный способ позволяет получать синтез-газ с максимальным отношением H_2/CO , при поддержании теплоты сгорания синтез-газа на требуемом для газовой турбины уровне около 5 МДж/м³.

Перспективы дальнейшей разработки темы: проведение экспериментов с дутьём разного состава (включая CO₂); совершенствование CFD-модели; разработка принципов конструирования перспективных газификаторов ПГУ-ВЦГ.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Абаимов Н.А. О предпроектной проработке гибридной угольной ПГУ с воздухонагревателем / Гордеев С.И., Вальцев Н.В., Богатова Т.Ф., Левин Е.И., Шульман В.Л., Рыжков А.Ф., **Абаимов Н.А.** // Электрические станции. - 2012. - № 10 (975). С. 17-21; 0,23 п.л./0,05 п.л.

2. Abaimov N.A. Development of low-temperature thermochemical conversion reactors for coal power engineering / Ryzhkov A.F., Bogatova T.F., ValTsev N.V., Gordeev S.I., Khudyakova G.I., Osipov P.V., **Abaimov N.A.**, Chernyavskii N.V., ShulMan V.L. // Thermal Engineering. - 2013. - Vol. 60, № 12. - pp. 895-903; 0,47 п.л./0,1 п.л. (CA(pt), Scopus, Springer).

3. Абаимов Н.А. Численное исследование и оптимизация циклонного газификатора бурых углей / **Абаимов Н.А.**, Рыжков А.Ф., Теплицкий Ю.С., Пищуха Е.А., Бучилко Э.К. // Научное обозрение. - 2014. - № 8-2. С. 630-637; 0,41 п.л./0,3 п.л.

4. Abaimov N.A. The analysis of hybrid scheme of steam-gas technologies on igcc low-calorie gases / Bogatova T.F., Ryzhkov A.F., Gordeev S.I., **Abaimov N.A.**, Valtsev N.V. // 31st Annual International Pittsburgh Coal Conference: Coal - Energy, Environment and Sustainable Development, PCC 2014 31, Coal - Energy, Environment and Sustainable Development. 2014; 0,12 п.л./0,03 п.л. (Scopus).

5. Абаимов Н.А. Разработка способа сжигания бедных газов в камере сгорания / Левин Е.И., **Абаимов Н.А.**, Филиппов П.С., Буян Б., Рыжков А.Ф. // Тепло-вые процессы в технике. 2015. № 6. С. 282-287; 0,29 п.л./0,15 п.л. (CA(pt)).

6. Abaimov N.A. Development of a model of entrained flow coal gasification and study of aerodynamic mechanisms of action on gasifier operation / **Abaimov N.A.**, Ryzhkov A.F. // Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 62. № 11. - pp. 767-772; 0,35 п.л./0,3 п.л. (CA(pt), Scopus, Springer).

7. Abaimov N.A. Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl / Chernetskiy M.Y., Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., **Abaimov N.A.**, Ryzhkov A.F. // Thermophysics and Aeromechanics. - 2016. - Vol. 23. № 4. - pp. 591-602; 0,64 п.л./0,2 п.л. (Scopus, Springer, WoS).

8. Abaimov N.A. Making more efficient use of blast-furnace gas at Russian metallurgical plants / Ryzhkov A.F., Levin E.I., Filippov P.S., **Abaimov N.A.**, Gordeev S.I. // Metallurgist. 2016. - Vol. 60. № 1-2. - pp. 19-30; 0,64 п.л./0,3 п.л. (CA(pt), Scopus, Springer, WoS).

9. Abaimov N.A. Experimental and computational study and development of the bituminous coal entrained-flow air-blown gasifier for IGCC / **Abaimov N.A.**, Osipov P.V., Ryzhkov A.F. // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. - Vol. 754. № 11. - UNSP 112001; 0,35 п.л./0,3 п.л. (Scopus).

10. Abaimov N.A. Development of advanced air-blown entrainedflow two-stage bituminous coal IGCC gasifier / **Abaimov N.A.**, Ryzhkov A.F. // EPJ Web of Conferences. - 2017. - Vol. 159. - UNSP. 0001; 0,35 п.л./0,33 п.л. (Scopus).

11. Abaimov N.A. Investigation of two-stage air-blown and air-steam-blown entrained-flow coal gasification / **Abaimov N.A.**, Ryzhkov A.F., Butakov E.B., Burdukov A.P. // Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Vol. 899. № 9. - UNSP. 092001; 0,35 п.л./0,3 п.л. (Scopus, WoS).

12. Abaimov N. Study of the two-stage gasification process of pulverized coal with a combined countercurrent and concurrent flow system / Kuznetsov V., Chernetskiy M., **Abaimov N.**, Ryzhkov A. // MATEC Web of Conferences. - 33. - 2017. - UNSP. 03008; 0,17 п.л./0,03 п.л. (Scopus).

13. Abaimov N.A. Investigation of steam-air-blown two-stage entrained-flow gasification of mechanoactivated coal / **Abaimov N.A.**, Butakov E.B., Burdukov A.P., Ryzhkov A.F. // AIP Conference Proceedings. - 2018. - Vol. 2015(1). - UNSP. 020001; 0,42 п.л./0,33 п.л. (Scopus).

14. Abaimov N.A. Investigation of coal entrained-flow gasification in O₂-CO₂ mixtures for oxy-fuel IGCC / Ralnikov P.A., Abaimov N.A., Ryzhkov A.F. // Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 1128(1). - UNSP. 01200; 0,42 п.л./0,15 п.л. (Scopus).

15. Abaimov N.A. Modernization of air-blown entrained-flow gasifier of integrated gasification combined cycle plant / Ryzhkov A.F., **Abaimov N.A.**, Donskoi I.G., Svishchev D.A. // Combustion Explosion and Shock Waves. - 2018. - Vol. 54, № 3. - pp. 337-344; 0,41 п.л./0,2 п.л. (Scopus, Springer, WoS).

Патенты:

16. Патент на полезную модель № 137358 Российская Федерация, МПК F 28 F 1/40. Теплообменная труба с внутренней вставкой / В.А. Микула, А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, **Н.А. Абаймов**, В.Л. Шульман; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – № 2013140134/02; заявл. 28.08.13; опубл. 10.02.14.

Главы в монографиях:

17. **Абаимов Н.А.**, Осипов П.В., Рыжков А.Ф. Экспериментальные и численные исследования поточной газификации проектного топлива // Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / под редакцией А.Ф. Рыжкова. Екатеринбург. - 2016. - С. 296-323; 1,57 п.л./1,2 п.л.

18. **Абаимов Н.А.**, Донской И.Г., Кузнецов В.А., Свищёв Д.А., Чернецкий М.Ю. Численные исследования работы перспективного поточного газогенератора // Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / под ред. А.Ф. Рыжкова. Екатеринбург. - 2016. - С. 324-397; 4,24 п.л./3,3 п.л.

Другие публикации:

19. Абаимов Н.А. Экспериментальное и численное исследование поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья / **Абаимов Н.А.**, Шурчалин А.А., Шестаков Н.С., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием Горение топлива: теория, эксперимент, приложения (16–18 ноября 2015 г.), Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск. 2015. С. 15; 0,06 п.л./0,02 п.л.

20. Абаимов Н.А. Физическое моделирование и численный анализ работы двухстадийного реактора конверсии угольной пыли / **Абаимов Н.А.**, Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Гордеев С.И., Осипов П.В., Худяков П.Ю. // Сборник тезисов докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену, 23-26 мая 2016 г., Минск: изд. НАН Беларуси. 2016. Т. 3. С. 389-393; 0,23 п.л./0,1 п.л.

21. Абаимов Н.А. Экспериментальная отработка методов получения синтез-газа в одно- и двухступенчатых газификаторах / **Абаимов Н.А.**, Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Осипов П.В., Рыжков А.Ф., Шестаков Н.С., Шурчалин А.А. // Сборник трудов XV Минского Международного Форума по тепло- и массообмену (23-26 мая 2016 г.), Минск, 2016. Т. 2. С. 3-6; 0,17 п.л./0,07 п.л.

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

_____._____.2019

Офсетная печать

Тираж 110

Заказ №

Ризография НИЧ ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19