

На правах рукописи



ЧЕРНЫХ Артем Петрович

**ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА УГЛЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
С ЦЕЛЮ ПРОИЗВОДСТВА КУСКОВОГО ПОЛУКОКСА
И ГАЗОВОГО ТОПЛИВА**

Специальность 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание учетной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в филиале ООО «Сибниуглеобогащение» в г. Красноярске

Научный руководитель – доктор технических наук
Исламов Сергей Романович

Официальные оппоненты: **Клер Александр Матвеевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел теплосиловых систем №70, заведующий отделом;

Жуйков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, заведующий лабораторией.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита диссертации состоится 05 апреля 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, корпус №14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предусматривает внедрение инновационных технологий использования угля, направленных на повышение качества и расширение номенклатуры угольной продукции, интенсификацию процессов переработки добываемого сырья при высоком уровне экологической безопасности производства.

Обеспечение условий для повышения конкурентоспособности российских угольных компаний, связано с развитием технологий термической переработки угля, позволяющих, наряду с получением термококса, бездымного топлива, брикетов и других продуктов его обогащения, обеспечить параллельное производство тепловой энергии. Достижение высоких экологических и экономических показателей такой технологии возможно только за счет использования принципа энерготехнологического комбинирования. Решение этой актуальной задачи позволит придать импульс развитию примышленной теплоэнергетики и смежных отраслей промышленности страны.

Основной проблемой известных способов термической переработки бурых углей является низкая прочность и соответственно мелкий размер частиц получаемого твердого продукта, затрудняющий транспортировку, брикетирование же неизбежно приводит к его удорожанию.

Перспективным решением указанной проблемы является технологический процесс комбинированного производства энергоносителей на основе термической переработки энергетических углей при избыточном давлении. Нагрев угля под давлением позволяет получить кусковой полукокс, обладающий высокой механической прочностью, повышенной теплотой сгорания, низким водопоглощением, высокой реакционной способностью и большим удельным электросопротивлением, что актуально для его использования в металлургии. При этом, помимо полукокса, производится второй продукт – горючий газ, используемый для производства тепловой энергии (горячей воды или пара).

Степень разработанности темы. К настоящему времени отечественными и зарубежными учеными Чухановым З.Ф., Гинзбургом Д.М., Грязновым Н.С., Джапаридзе П.Н., Ипатьевым В.Н., Гойхрахом И.М., A. Thau, H. Koppers, R. Heinze созданы научные основы различных процессов комбинированного получения из угля твердых и газообразных энергоносителей, описаны механизмы физико-химических превращений, предложены различные математические модели процессов, разработаны устройства для работы в широком диапазоне режимных параметров. При этом избыточное давление применялось только в процессах газификации и гидрогенизации твердых топлив с целью получения синтез-газа для последующего синтеза газообразных и жидких продуктов, таких как бензин, метанол, аммиак и т.п. Таким образом, существующих результатов исследований оказывается недостаточно для создания технологии одновременного получения кусковой углеродной продукции и газового топлива из бурых углей.

Цель исследования состоит в разработке процесса комбинированного производства энергоносителей в виде газового топлива и кускового полукокса из энергетических углей под давлением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ технологий термической переработки угля, направленных на получение твердых и газообразных продуктов, в том числе при избыточном давлении, оценить состояние исследований в данной области и уровень их промышленного использования, определить направление исследований.

2. Исследовать закономерности процесса нагрева угля при избыточном давлении, выявить основные управляющие параметры, изучить влияние этих параметров на показатели процесса комбинированного производства энергоносителей и характеристики получаемого кускового полукокса и газового топлива.

3. Разработать технологический процесс комбинированного производства тепловой энергии и кускового полукокса из энергетических углей под давлением и промышленный реактор для его осуществления.

4. Оценить экономическую эффективность комбинированного производства тепловой энергии в виде газового топлива и полукокса под давлением, а также степень его воздействия на окружающую среду.

Объектом исследования является процесс комбинированного производства газового топлива и кускового полукокса из энергетических углей под давлением.

Предмет исследования – характеристики процесса и получаемых энергоносителей в процессе их комбинированного производства под давлением.

Научная новизна:

1. Установлены закономерности влияния давления на следующие характеристики полукокса при энерготехнологической переработке кусковых энергетических углей различных марок: насыпная плотность, относительный выход, водопоглощение, пористость, прочность. Определены характеристики получаемого газового топлива (состав и теплота сгорания газа).

2. Определены оптимальные режимные параметры (давление и температура нагрева) при комбинированном производстве кускового полукокса и горючего газа под давлением:

для бурых углей – 2,0-3,0 МПа, 570 °С;

для каменных углей – 1,5 МПа, 520 °С.

3. Предложена схема технологического процесса комбинированного производства кускового полукокса и горючего газа под давлением с обеспечением нагрева за счет горючего газа, получаемого в самом процессе.

Практическая значимость:

1. Полученные соотношения режимных параметров процесса термической переработки угля (скорость нагрева, температура и давление переработки) и характеристик продуктов приняты для использования при проектировании промышленных технологических установок на основе разработанного процесса.

2. На основе результатов исследований разработаны технологические регламенты процесса комбинированного производства энергоносителей для углей марок 1Б, 2Б, Д, используемые угледобывающими предприятиями и проектными организациями (АО «СУЭК-Красноярск», ООО «Сибниинуглеобогащение» и др.).

3. Разработана и научно обоснована схема энерготехнологического производства продукции из угля марок 1Б, 2Б, Д. Выполнено экономическое обоснование создания предприятия мощностью 100 тыс. т/год по кусковому полукоксу и 320 тыс. ГДж/год по тепловой энергии.

Теоретическая значимость

Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для дальнейшего изучения вопросов глубокой переработки угля, разработки математических моделей процессов частичной газификации угля.

Методология и методы исследования. В работе использованы комплексные исследования, включающие научный анализ практики термической переработки угля, экспериментальные методы исследования на специально созданных лабораторной и стендовой установках. При обработке экспериментальных данных использован расчетно-теоретический анализ, основу которого составили положения теории теплообмена.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования процесса комбинированного производства тепловой энергии в виде газового топлива и кускового полукокса из энергетических углей под давлением, а именно зависимость от давления насыпной плотности, относительного выхода, водопоглощения, пористости, прочности кускового полукокса и состава газового топлива.

2. Новый технологический процесс термического комбинированного производства газового топлива и кускового полукокса из энергетических углей под давлением и его аппаратное оформление в виде шахтного трубчатого реактора.

3. Технологическая схема промышленного производства энергоносителей на базе термической переработки кускового энергетического угля в реакторе под давлением с обеспечением нагрева за счет горючего газа, получаемого в самом процессе.

Реализация результатов работы.

1. Результаты исследования процесса термической переработки углей под давлением использованы в качестве исходных данных при разработке конструкторской документации на опытно-промышленный реактор производительностью 4 600 т/год для АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский им. М.И. Щадова» (получен акт о внедрении результатов диссертационной работы).

2. Результаты исследования процесса термической переработки углей под давлением использованы при разработке инвестиционного проекта по созданию комплекса термической переработки при повышенном давлении угля марки 2Б АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский им. М.И. Щадова» мощностью 100 тыс. т/год по кусковому полукоксу и 320 тыс. ГДж/год по тепловой энергии (получен акт о внедрении результатов диссертационной работы).

Достоверность полученных результатов обеспечена применением современных методик экспериментальных исследований, использованием должным образом калиброванных средств измерений, имеющих государственную поверку; результаты расчетов имеют высокую степень корреляции с экспериментальными данными, полученными на стендовой установке.

Апробация результатов диссертационных исследований. Основные материалы диссертационной работы были обсуждены и доложены на семинарах Управления НИОКР ООО «Сибниинуглеобгащение», Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021), XLII Международной научно-практической конференции «Научный форум: технические и физико-математические науки» (Москва, 2021), XLV Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2021), XCVIII Международной научно-практической конференции «Современный этап развития естественных и технических наук: актуальные вопросы теории и практики» (Казань 2021), X Международной научно-практической конференции «Современные технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов» (Петрозаводск 2021), XXXVIII Международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology» (Москва 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей, в том числе 2 в изданиях, рекомендованном Высшей Аттестационной Комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, а также получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора состоит в самостоятельном анализе литературных источников, подготовке, постановке и проведении экспериментов по карбонизации углей различных марок, обработке полученных экспериментальных данных, разработке технологии комбинированного производства тепловой энергии в виде газового топлива и кускового полукокса из энергетических углей при повышенном давлении и практических рекомендаций по реализации данной технологии в промышленном масштабе. В работах с соавторами соискателю принадлежит от 50 до 75 % результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных литературных источников и 4 приложений. Работа содержит 157 страниц машинописного текста, в том числе 134 страницы основного текста диссертации и 23 страницы приложений, 75 рисунков и 22 таблицы. Список использованных источников включает 104 наименования.

Основное содержание работы

Во введении определены актуальность темы, охарактеризована степень ее разработки в России и мире, сформулированы цели исследования, его новизна, основные положения, выносимые на защиту, а также приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен критический обзор существующих технологий термической переработки угля, в том числе переработки под давлением, в России и мире, рассмотрены основные принципы этих технологий, особенности и недостатки их практического применения.

Завод ЗАО «Карбоника-Ф» в г Красноярске производит углеродный сорбент и энергетический газ на базе технологии «ТЕРМОКОКС-С». В технологическом процессе используется схема частичной газификации угля с обращенным дутьем, в рамках которой окислитель и топливо подаются прямотоком, а первичное зажи-

гание производится со стороны выхода продуктового газа. В отличие от классической схемы с прямым дутьём, производимый в данном процессе газ не содержит конденсированных продуктов пиролиза угля. Одним из недостатков указанной технологии получения кокса из бурого угля является мелкий размер частиц получаемого продукта, что затрудняет его транспортировку, а при необходимости использования в кусковом виде требует брикетирования, что неизбежно приводит к удорожанию.

В 2007 году на Березовском разрезе (г. Шарыпово, Красноярский край) запущена в эксплуатацию опытно-промышленная линия по производству тепловой энергии и среднетемпературного кокса на основе технологии «ТЕРМОКОКС-КС». Комбинированная переработка угля производится в модифицированном котельном агрегате с топкой кипящего слоя. Котлоагрегат, сохраняя паспортные энергетические характеристики, имеет улучшенные экологические показатели по газовым выбросам, а вместо золошлаковых отходов производит мелкозернистый углеродсодержащий продукт. На сегодняшний день производство расширено до производительности 30 тыс. т/год по термококсу и 251 ГДж/год по тепловой энергии. Получаемый мелкозернистый продукт также требует брикетирования. Углеродсодержащие продукты, получаемые из бурого угля по технологиям серии ТЕРМОКОКС близки по характеристикам и обладают одинаковыми недостатками.

Австралийской компанией Licella Holdings Ltd. по технологии Cat-HTR производится биотопливо путем переработки пластиковых отходов. Суть ее заключается в термической обработке предварительно подготовленной суспензии под давлением с последующим охлаждением полученного продукта. Последующий вариант адаптации технологии для переработки угля, позволяет получать синтетическую «нефть» и угольный порошок с высокой теплотой сгорания. Однако, использование давлений в диапазоне 100-350 бар накладывает серьезные ограничения на аппаратное исполнение технологии. Для промышленных установок необходимо использовать толстостенные реакторы, что приводит к повышенной металлоемкости и, как следствие, высоким капитальным затратам. Также, конечный продукт, позиционируемый как металлургическое топливо, имеет размер частиц менее 100 мкм. Без предварительного формования его транспортировка практически невозможна.

На основе выполненного аналитического обзора реализованных зарубежных и отечественных разработок в сфере термической переработки угля видно, что избыточное давление широко применяется в процессах переработки твердых топлив с получением только газообразных и жидких продуктов, таких как синтез-газ, СЖТ, метанол, аммиак и др.

Основной недостаток существующих технологий производства полукокса из бурого угля – это мелкий размер частиц получаемого продукта, затрудняющий его транспортировку, а использование полукокса в кусковом виде требует брикетирования, что неизбежно приводит к его удорожанию.

По итогам обзора сформулированы задачи дальнейших исследований.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований термической переработки углей различных марок под давлением.

В качестве сырья для опытов были использованы: уголь марки 1Б РУ «Новошахтинское» Ханкайского угольного бассейна, уголь марки 2Б разреза «Бородинский им. М. И. Щадова» Канско-Ачинского угольного бассейна и уголь марки Д разреза «Черногорский» Минусинского угольного бассейна. Полукоксам, полученным из перечисленных углей, были присвоены наименования ПКВД-1Б, ПКВД-2Б и ПКВД-Д соответственно. Технический и элементный состав исследуемых углей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Технический и элементный состав исходного угля

Марка угля	W_t^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	O^{daf} , %	S_t^d , %	Q_i^r , МДж/кг
1Б	42,3	7,9	55,4	64,2	6,2	1,1	28,2	0,3	13,4
2Б	31,3	4,0	48,0	74,8	5,1	1,0	19,1	0,3	17,6
Д	10,7	10,6	40,5	80,0	4,5	1,7	13,1	0,6	23,9

Эксперименты проводили на лабораторной установке (рисунок 1), представляющей собой реактор диаметром 100 мм из нержавеющей стали, рассчитанный на давление до 5,0 МПа, нагреваемый при помощи электропечи.

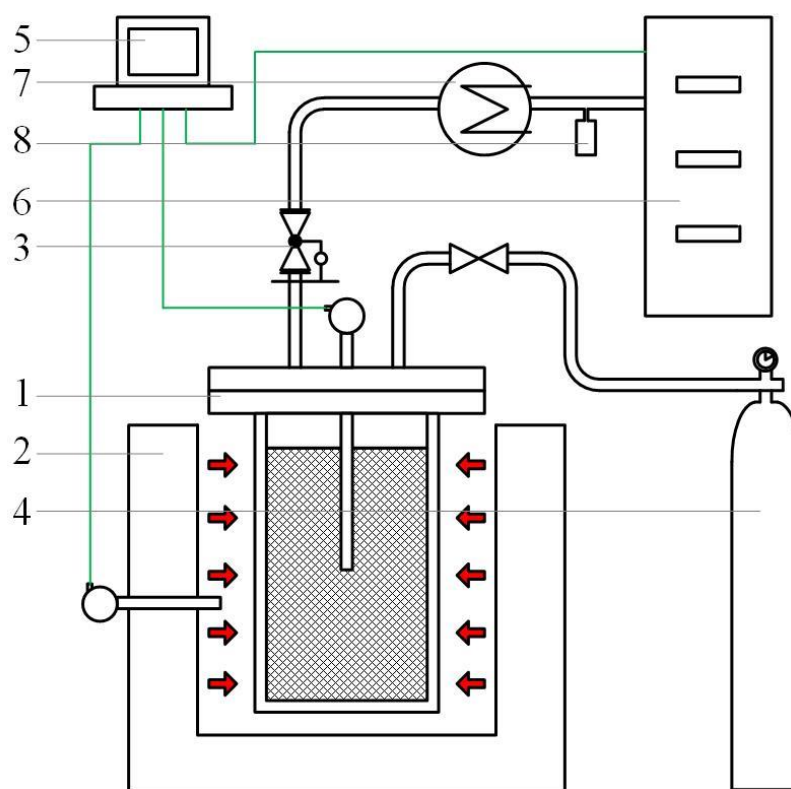


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

1 – реактор; 2 – электропечь; 3 – регулятор давления 4 – газовый баллон;
5 – компьютер; 6 – газоанализатор; 7 – теплообменник; 8 – отводчик

Реактор оснащен системой автоматического поддержания необходимого давления. В начальный момент времени необходимое давление создается при помощи баллона с инертным газом. Выходящий из реактора газ направляли в блок газового

анализа через охладитель, оснащенный отводчиком конденсата. Температуры и состав газа фиксировались в режиме реального времени. В ходе нагрева температура измерялась в трех точках – в печи, на стенке реактора и в центре угольной засыпки.

Работы велись с узким классом крупности угля 20-25 мм. В качестве целевого показателя остаточного содержания летучих веществ в полукоксе принято значение V^{daf} около 15 %. При использовании в электрометаллургических печах это значение обеспечивает снижение склонности колошникового слоя шихты к спеканию и, как следствие, повышение его газопроницаемости и снижение удельного расхода электроэнергии.

На первом этапе работ при атмосферном давлении была определена зависимость остаточного выхода летучих веществ получаемого полукокса от температуры нагрева. Известно, что при нагреве угля под давлением часть содержащихся в нем летучих веществ закоксуывается, поэтому при тех же температурах остаточное содержание летучих веществ при повышенном давлении всегда ниже, чем при атмосферном. При этом, разница между численными значениями содержания летучих веществ в диапазоне давлений 0-4,0 МПа невелика, что позволило с достаточной точностью определить необходимую температуру нагрева при атмосферном давлении. Опыты были выполнены в диапазоне температур 400-600 °С. Как показано на рисунке 2, в исследуемом диапазоне остаточное содержание летучих веществ в полукоксе с достаточной степенью достоверности характеризуется линейными зависимостями. Так, искомый показатель для бурых углей составляет 570 °С, для каменного – 520 °С, и второй этап исследований производился с нагревом угля до указанных температур.

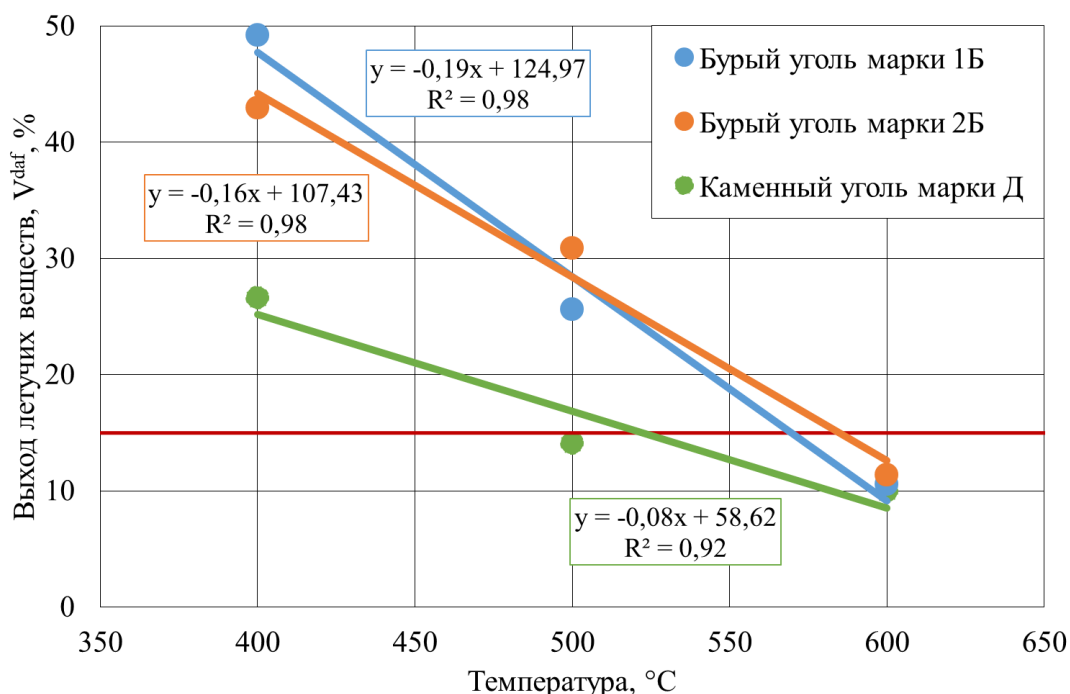


Рисунок 2 – Зависимость выхода летучих веществ от температуры при атмосферном давлении

На втором этапе с целью определения влияния режимных параметров процесса на теплотехнические характеристики полукокса были выполнены эксперименты в диапазоне давлений 0,0-4,0 МПа. В качестве ключевых показателей были определены значения прочности на истирание, пористости и водопоглощения. Прочность полукокса определяет возможность совершения механических операций (транспортировки, перегрузки и т.д.), а также сохранение газопроницаемости слоя шихты в металлургических процессах. Также условия транспортировки определяет пористость – низкое значение этого показателя положительно характеризует исследуемый материал с точки зрения склонности к самовозгоранию. Что, в свою очередь, является одним из определяющих фактором при хранении и транспортировке. Низкое водопоглощение полукокса позволяет осуществлять его доставку навалом в вагонах без ухудшения качественных характеристик продукта. В результате исследования процесса полукоксования бурых углей марок 1Б и 2Б и каменного угля марки Д при повышенном давлении были выявлены зависимости ключевых характеристик полукокса от давления.

Определение прочности на истирание исходных углей и полученных образцов полукокса проводились на основе ГОСТ 15490-70. Проба помещалась в малый барабан, после 100 оборотов выгружалась и рассеивалась на ситовом грохоте. Прочность M_{10} – это отношение массы остатка на сите 10 мм после отсева на ситах к общей массе пробы. Экспериментально определено, что механическая прочность исходных углей практически не различается, значение их показателя M_{10} составляет 80-85 %. Установлено (рисунок 3), что для получения полукокса из бурого угля 1Б с прочностью, сопоставимой с исходным углем, требуется приложить давление в 1,5 раза выше, чем при использовании угля марки 2Б и в 2 раза выше, чем при использовании угля марки Д.

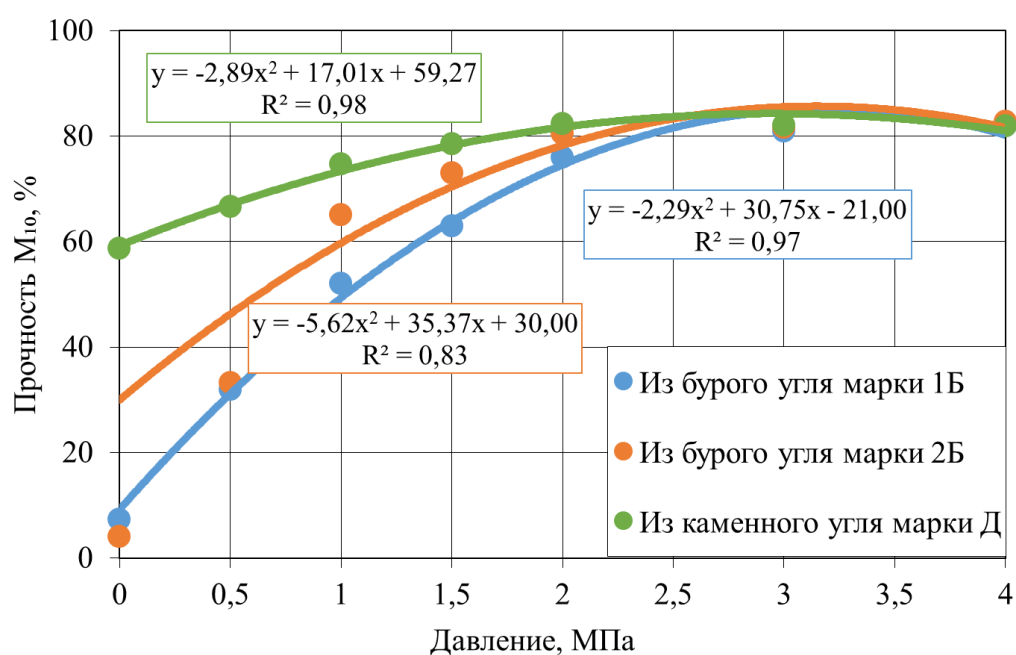


Рисунок 3 – Зависимость прочности M_{10} полукокса от давления процесса для бурых углей (1Б, 2Б) и каменного угля (Д)

Суммарный объем пор определяли по ГОСТ 17219-71. Метод определения суммарного объема пор по воде основан на заполнении водой пор при кипячении навески угля в воде и удалении избытка воды с поверхности зерен путем отсасывания созданием разряжения 8,0 кПа. На рисунке 4 представлена зависимость суммарного объема пор полукокса от давления процесса. При атмосферном давлении указанный параметр полукокса из каменного угля марки Д ниже, чем из бурого угля марок 1Б и 2Б в 1,5 и 1,2 раза соответственно. Однако, уже при давлении 1,5 МПа значения объема пор полукокса, полученного из всех исследуемых углей, становятся практически одинаковыми и не изменяются с дальнейшим ростом давления.

Зависимости показателя прочности M_{10} и объема пор по воде от давления процесса с хорошей точностью описываются квадратичными функциями.

Водопоглощение определяли по ГОСТ 21290-2018. Сущность метода заключается в определении в процентах величины, вычисляемой на основании разности весов образцов, до и после насыщения водой путем помещения в сосуд с водой и выдержкой в течение 2 часов. Наибольшим водопоглощением при атмосферном давлении обладает полукокс из бурого угля марки 1Б – 17 %, наименьшим – полукокс из каменного угля марки Д (10 %). При увеличении давления до 1,5 МПа значение водопоглощения всех марок полукокса становится почти одинаковым и составляет 6-7 %. Дальнейший рост давления не приводит к значительному снижению водопоглощения.

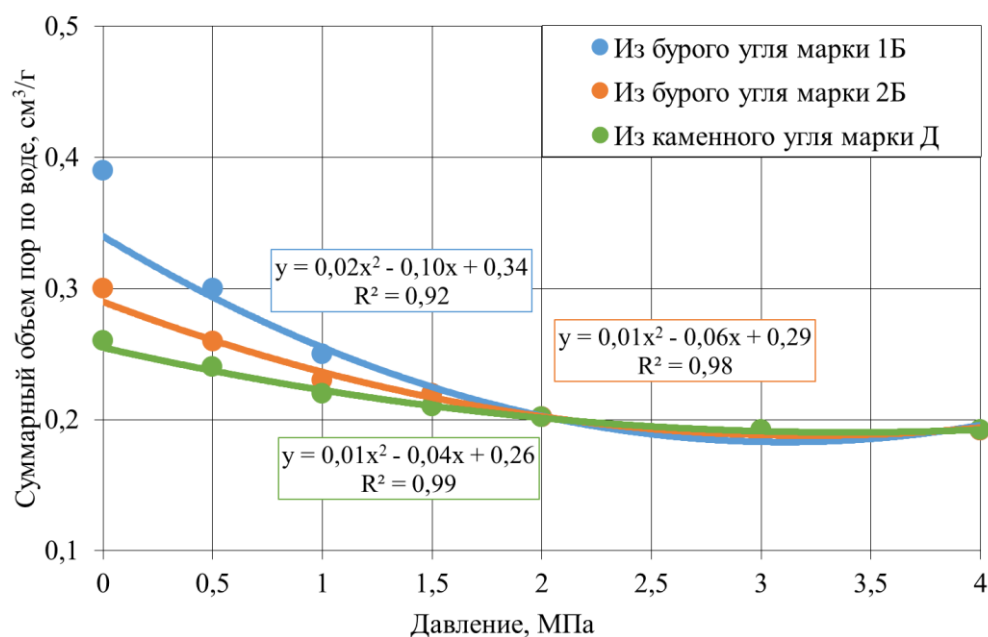


Рисунок 4 – Зависимость суммарного объема пор от давления процесса для бурых углей (1Б, 2Б) и каменного угля (Д)

Таким образом, в качестве оптимальных режимов процесса комбинированного производства полукокса и газового топлива были определены следующие давление и температура нагрева: для бурого угля марки 1Б – 3,0 МПа, 570 °С, для бурого угля марки 2Б – 2,0 МПа, 570 °С, для каменного угля марки Д – 1,5 МПа,

520 °С. В таблице 2 представлены параметры энерготехнологической переработки углей указанных марок, а также характеристики полученной продукции.

Во всех случаях характеристики полученных продуктов в полной мере удовлетворяют требованиям к углеродистым продуктам, используемым в металлургии.

В таблице 3 приведен тепловой баланс процессов переработки энергетических углей под давлением. Как видно из представленных данных, для исследуемых углей количество полной тепловой энергии, производимой в процессе переработки под давлением (теплота сгорания газа + энтальпия газа), превышает количество теплоты, требуемой на нагрев угля до заданной температуры, а температура сгорания газа превышает необходимую температуру нагрева. Количество получаемой полной тепловой энергии в виде газового топлива для бурых углей марок 1Б и 2Б составляет 3,2 и 1,6 ГДж/т соответственно. Для каменного угля марки Д – 1,0 ГДж/т. Таким образом, при организации промышленного технологического процесса в качестве греющего агента возможно применение дымовых газов, получаемых при сжигании горючего газа, произведенного в самом процессе.

Таблица 2 – Характеристики оптимальных параметров получения полукокса

Параметр	Значение		
Марка угля	1Б	2Б	Д
Температура нагрева, °С	570	570	520
Избыточное давление, МПа	3,0	2,0	1,5
Относительный выход полукокса, %	35	50	72
Технический и элементный состав полукокса, %			
W ^r	3,0	1,1	0,4
A ^d	16,1	7,0	13,2
V ^{daf}	13,5	11,9	14,6
C ^{daf}	88,3	90,7	89,6
H ^{daf}	2,9	5,0	3,8
N ^{daf}	1,1	1,3	2,0
O ^{daf}	7,2	2,8	4,1
S ^d	0,24	0,19	0,41
Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг	26,9	31,3	29,3
Насыпная плотность, кг/м ³	500	500	550
Водопоглощение, %	7,0	6,0	5,0
Объем пор по воде, см ³ /г	0,19	0,19	0,19
Прочность M ₁₀ , %	82	80	79
Удельное электросопротивление, Ом·см	40,5	41,0	40,7
Реакционная способность CRI, %	90,0	89,6	86,5
Средний элементный состав газа, об. %			
H ₂	3,1	2,5	2,0
CO	11,4	10,1	15,9
CO ₂	5,7	8,3	10,3
CH ₄	8,9	5,9	8,1
N ₂	1,2	1,4	1,5
H ₂ O	69,7	71,8	62,2
Теплота сгорания газа, МДж/м ³	4,95	3,65	5,49
Адиабатическая температура сгорания газа, °С	1200	1100	1230

Таблица 3 – Тепловой баланс процесса получения полукокса

Тепловой баланс процесса	Марка угля		
	1Б	2Б	Д
	ГДж		
Теплота сгорания угля	13,8	17,6	23,9
Теплота на нагрев угля до заданной температуры	1,3	1,2	0,9
<i>Итого приход:</i>	15,1	18,8	24,8
Теплота сгорания полукокса	9,4	14,8	21,1
Теплота сгорания газа	3,5	2,0	1,7
Энтальпия влажного газа	1,6	1,2	1,0
Энтальпия полукокса при конечной температуре	0,3	0,4	0,6
Тепловые потери	0,4	0,4	0,4
<i>Итого расход:</i>	15,1	18,8	24,8

Теперь необходимо формализовать довольно сложную задачу нагрева засыпки угля под давлением через стенку газовым теплоносителем. Так как нагрев данным случае обеспечивается в основном за счет теплопроводности, можно представить засыпку угля под давлением в виде сплошного однородного материала. Термическое сопротивление стенки реактора на несколько порядков меньше термического сопротивления засыпки, поэтому в расчете его можно не учитывать. Тогда прогрев материала можно рассчитать, используя модель нагрева бесконечного цилиндра с граничными условиями III рода. В безразмерной форме значение температуры центра и поверхности цилиндра для любого момента времени будет иметь вид:

$$\Theta_{\text{ц}} = N_0 (\text{Bi}) \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}), \quad (1)$$

$$\Theta_{\text{п}} = P_0 (\text{Bi}) \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}), \quad (2)$$

Числа Био и Фурье зависят от коэффициентов теплопроводности и температуропроводности соответственно, поэтому для расчета температур центра и поверхности цилиндра при нагреве необходимо определить эти коэффициенты для условного материала, в виде которого была представлена угольная засыпка. Так как коэффициенты изменяются при нагреве, то были определены их усредненные значения для всей засыпки в заданном диапазоне температур. Результаты экспериментального определения коэффициентов теплопроводности представлены в таблице 3.

Таблица 4 – Средние эффективные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности угольной засыпки при нагреве

Значение	Марка угля		
	1Б	2Б	Д
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/м·°С	0,205	0,235	0,405
Коэффициент температуропроводности, α , м ² /с·10 ⁶	0,278	0,319	0,423

Зная начальную температуру засыпки, а также обеспечив заданную температуру греющего агента, используя численную модель процесса нагрева угольной за-

сыпки, можно определить температуру засыпки в любой момент времени и, соответственно, время, необходимое для нагрева реактора любого диаметра до заданной температуры. Так, например, для реактора диаметром 150 мм определено расчетное время нагрева бурого угля марки 2Б – 171 минута.

Третья глава посвящена решению задач, связанных с аппаратным оформлением разработанного технологического процесса. В качестве аппарата для комбинированного производства тепловой энергии и полукокса под давлением принят реактор, представляющий собой герметичный вертикальный сосуд, состоящий из верхнего и нижнего корпусов, и трубного пучка с внешним обогревом газовым теплоносителем. Внешний вид модели промышленного реактора представлен на рисунке 5.

С целью подтверждения расчетных данных, а также апробации конструкторских решений, была разработана и смонтирована опытная установка полукоксования угля под давлением, представляющая собой основной элемент реактора в натуральную величину – трубу диаметром 150 мм, заполненную углем. Схема опытного стенда представлена на рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден..**



Рисунок 5 – Модель реактора

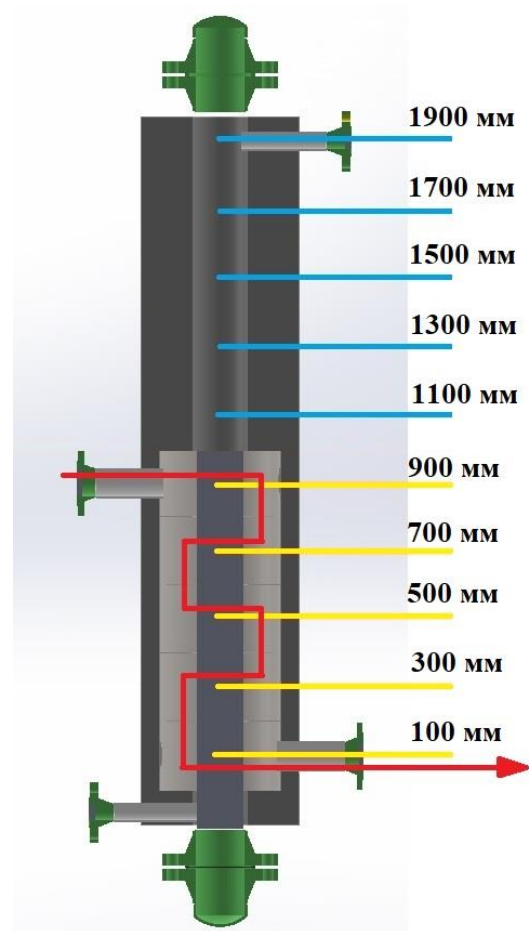


Рисунок 6 – Схема опытного стенда

В реактор помещается исходный уголь, после чего компрессором в нем создается необходимое давление. Далее, греющий агент (воздух) прокачивается через воздухонагреватель и попадает в теплообменный контур реактора, тем самым обогревая засыпку угля. По мере нагрева из угля начинает испаряться влага и выходить летучие вещества, при этом давление поддерживается на заданном уровне при помощи регулятора, через который горючий газ выходит из реактора, предварительно остывая в теплообменнике. На выходе из реактора горючий газ сразу же попадает в дожигатель, дымовые газы выбрасываются в атмосферу. Схема движения греющего агента на рисунке показана линией красного цвета. Температура регистрируется по оси засыпки по всей высоте реактора при помощи термопар типа ТХА. Также фиксировались температуры греющего воздуха на входе в реактор и на выходе из него.

В испытаниях в качестве сырья использовался уголь марки 2Б разреза «Бородинский им. М. И. Щадова» Канско-Ачинского угольного бассейна класса крупности 13-50 мм. Выбранный класс крупности обуславливается тем, что, с одной стороны позволяет получить кусковой полукокс с содержанием мелочи, сопоставимым с коксовым орешком, с другой – его подготовка в промышленном масштабе требует минимальных затрат.

На рисунке 7 представлены экспериментально определенные средние значения температур теплоносителя и засыпки, а также результаты расчета нагрева угля марки 2Б при избыточном давлении 2,0 МПа на опытном стенде.

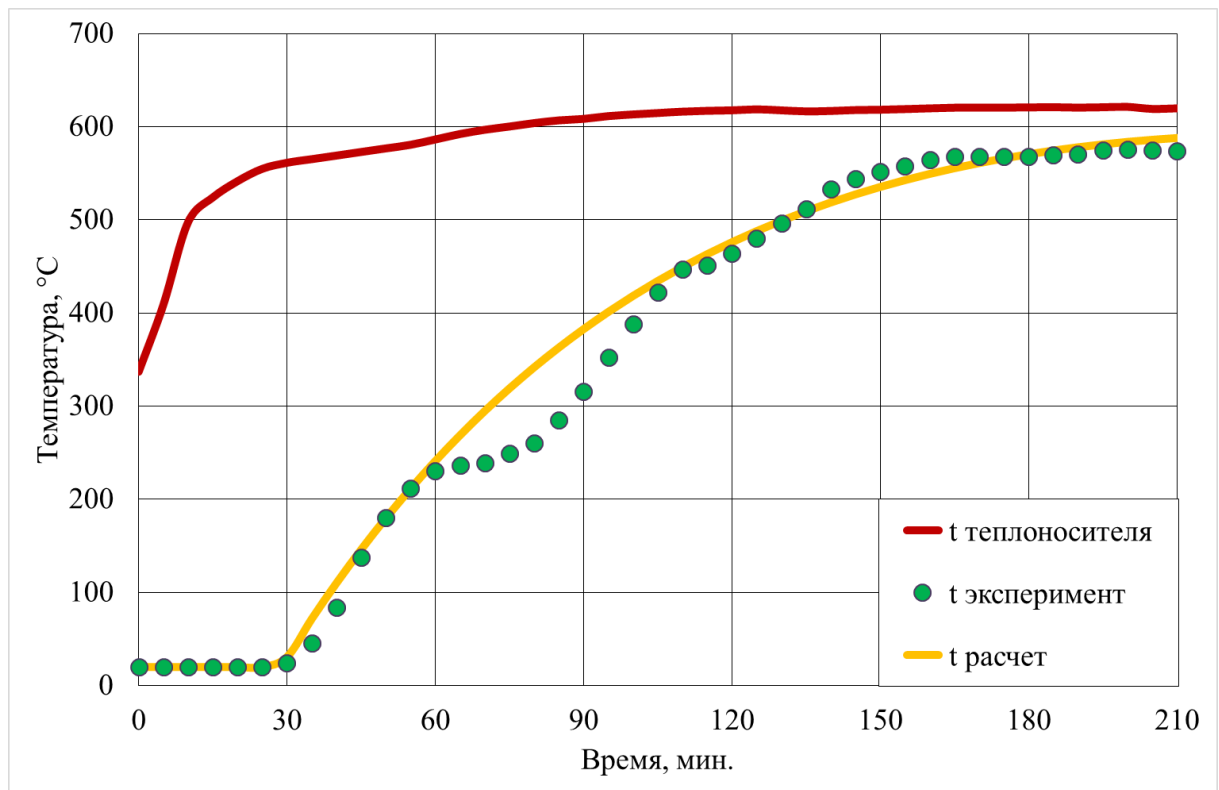


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных данных с расчетом

Как видно из графика нагрева засыпки угля, в области температур около 250 °С наблюдается отрицательный тепловой эффект, связанный с испарением влаги. Этот эффект не учитывается в расчетной модели, тем не менее, расчет времени нагрева по эффективным теплофизическим свойствам обеспечивает достаточно высокую точность.

Экспериментально определенное время для нагрева засыпки на опытном реакторе составило 180 минут, что подтверждает достоверность созданной модели. Погрешность определения длительности нагрева составляет 5,3 %

Таким образом, определенные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и режимные параметры и использование численной модели позволяют определить производительность промышленного реактора. Расчетные данные, а также результаты экспериментов, определенные во второй и третьей главах, стали исходными данными для разработки конструкторской документации на промышленный реактор.

Четвертая глава посвящена вопросам промышленной реализации результатов диссертационной работы.

На основе взаимосвязанных расчетов материального и теплового балансов была разработана принципиальная технологическая схема промышленной реализации процесса (рисунок 8):

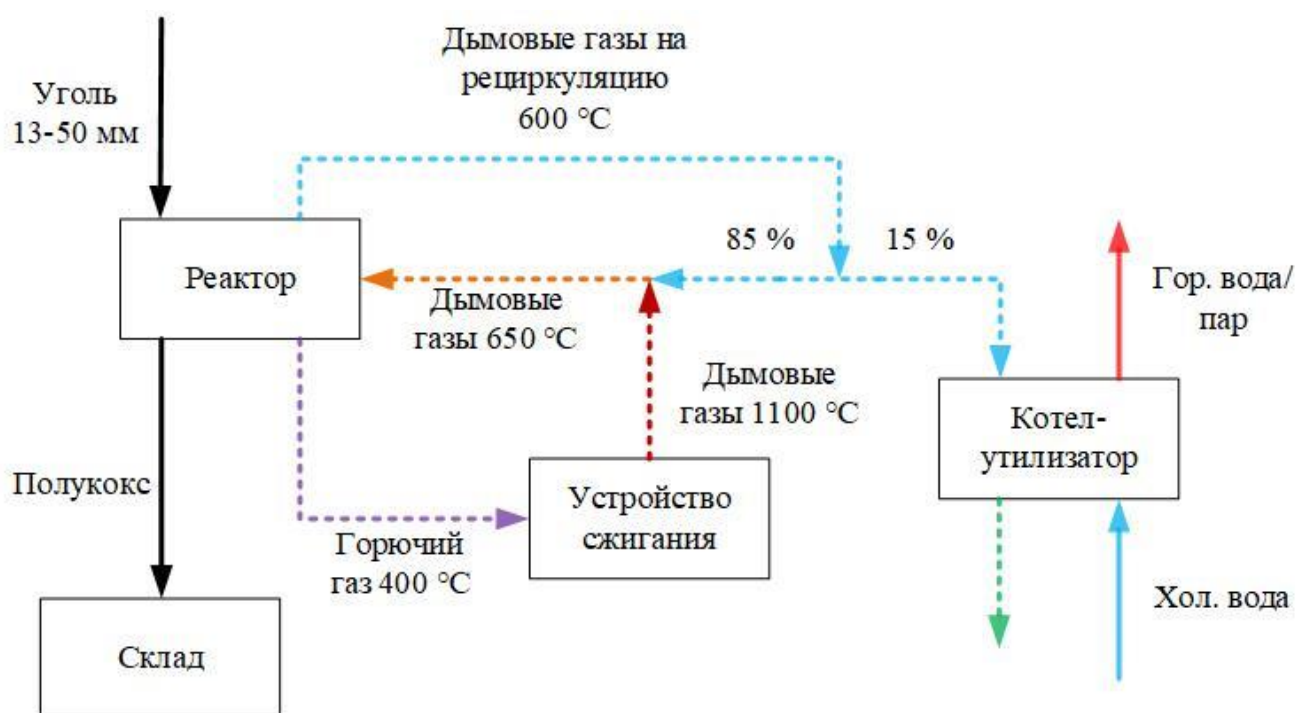


Рисунок 8 – Принципиальная схема технологического процесса

Уголь класса крупности 13–50 мм подаётся в промышленные реакторы, откуда после термообработки под давлением перемещается в виде кускового полукокса на склад готовой продукции. Горючий газ из реактора, в начальный момент времени имеющий температуру 400 °С, подается в устройство сжигания для генерации дымовых газов с температурой 1100 °С.

Греющий агент – дымовые газы с температурой 650 °С – подаётся в теплообменный контур реакторов, при прохождении через который охлаждается до 600 °С, нагревая при этом уголь, после чего небольшое количество охлаждённых дымовых газов поступает на котел-утилизатор и далее через дымовую трубу в атмосферу, а основная часть дымовых газов после реактора возвращается на рециркуляцию с целью снижения температуры греющего агента до 650 °С благодаря смешиванию с соответствующим количеством дымовых газов из устройства сжигания.

При реализации комплекса комбинированного производства тепловой энергии и полукокса по указанной схеме, в блоке из 6 реакторов возможно обеспечить замкнутый цикл, с нагревом за счет сжигания горючего газа, выделяющегося в этом же блоке. Дополнительно производится тепловая энергия, полученная от сжигания горючего газа и от охлаждения полукокса, за вычетом энергии, затраченной на нагрев угля. При этом, на 1 тонну исходного угля марки 2Б производится 1,6 ГДж полезной тепловой энергии и 0,5 т полукокса.

В 2019 году в рамках инвестиционного проекта на АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский имени М.И. Щадова» было выполнено технико-экономическое обоснование строительства комплекса по производства тепловой энергии и кускового полукокса производительностью 100 тыс. т/год по полукоксу и 320 тыс. ГДж/год по тепловой энергии. Дисконтированный срок окупаемости инвестиций в проект составил 3,5 года с начала эксплуатации при цене реализации продукта 15 000 руб./т. Объем инвестиций в создание комплекса оценён в 2,7 млрд руб. без НДС.

Оценка степени воздействия комплекса комбинированного производства кускового полукокса и тепловой энергии на окружающую среду произведена для отдельно стоящего объекта (таблица 5). Сравнение с прямым сжиганием угля в водогрейном котле выполняли в расчете на одинаковое количество производимой энергии.

Таблица 5 – Выбросы загрязняющих веществ

Выбросы загрязняющих веществ, г/ГДж	Прямое сжигание	Термическая переработка под давлением
Оксид азота, NO	39,5	8,20
Диоксид азота, NO ₂	242,4	50,26
Оксид серы, SO ₂	264,9	162,5
Оксид углерода, CO	815,1	407,6
Бенз(а)пирен	0,00160	0,00160
Твёрдые частицы	169,6	-

Как видно из представленных результатов, количество выбросов вредных веществ атмосферу при термической переработке угля под давлением по разработанному технологическому процессу ниже, чем при прямом сжигании. Значительная часть серы остается в полукоксе, поэтому выбросы оксида серы снижаются в 1,6 раза. Также, вследствие отсутствия воздушного дутья почти в 5 раз снижаются выбросы оксидов азота, а главное, при сжигании газового топлива вместо твердого, практически отсутствуют выбросы твердых частиц.

Далее было выполнено сравнение эмиссии CO_2 при производстве углеродистого восстановителя методом полукоксования под давлением из трех исследуемых углей и классического кокса (таблица 6).

Таблица 6 – Эмиссия CO_2

Вид восстановителя	Эмиссия CO_2 на 1 т готовой продукции, т
Полукокс из бурого угля марки 1Б	0,942
Полукокс из бурого угля марки 2Б	0,46
Полукокс из каменного угля марки Д	0,46
Классический кокс	1,003

Снижение эмиссии CO_2 при производстве углеродистого восстановителя разработанным способом обуславливается тем, что выделяющийся горючий газ после дожигания имеет температуру, достаточную для обеспечения нагрева. Тем самым, процесс становится не только автотермическим, но и сопровождается получением дополнительной тепловой энергии. При производстве классического кокса для обеспечения процесса требуется сжигание дополнительного топлива, что и приводит к повышенной эмиссии парниковых газов.

Таким образом, разработанная технология при переработке углей марок 2Б и Д позволяет вдвое снизить эмиссию CO_2 в сравнении с производством классического кокса на тонну продукции. При этом, все выбросы CO_2 могут быть отнесены на производство полукокса, тогда газовое топливо производится с нулевыми выбросами углекислого газа и наоборот.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ технологий термической переработки угля. Определено, что избыточное давление широко применяется только в процессах газификации и гидрогенизации твердых топлив с целью получения синтез-газа для последующего синтеза газообразных и жидких продуктов, таких как бензин, метанол, аммиак и т.п.

2. Исследованы закономерности процесса нагрева угля при избыточном давлении. Определено влияние повышенного давления на показатели процесса термической переработки и характеристики получаемых энергоносителей в процессе нагрева кусковых энергетических углей. Определены зависимости качественных характеристик полукокса от температуры и давления процесса. Определены характеристики получаемого газового топлива.

3. Разработан процесс энерготехнологической переработки угля под давлением с целью производства кускового полукокса и газового топлива. На основе результатов исследований разработана технология комбинированного производства энергоносителей, а также разработаны конструкторская документация на промышленный реактор и инвестиционный проект по созданию комплекса переработки угля марки 2Б АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский имени М.И. Щадова».

4. Выполнена оценка экономической эффективности комбинированного производства кускового полукокса и газового топлива под давлением. В соответствии

с расчетом, реализация проекта позволяет наладить рентабельное промышленное производство и обеспечить дисконтированный срок окупаемости инвестиций в проект 3,5 года с начала эксплуатации.

5. Выполнена оценка степени воздействия такого комплекса на окружающую среду. В сравнении с прямым сжиганием угля значительно снижаются выбросы азота, углерода и серы, а также практически исключаются выбросы твердых частиц. Кроме того, разработанная технология позволяет вдвое снизить эмиссию CO_2 в сравнении с производством классического кокса в расчете на тонну углеродистого восстановителя. При условии отнесения выброса CO_2 на производство полукокса, газовое топливо производится с нулевыми выбросами углекислого газа и наоборот.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективным направлением дальнейших исследований является увеличение скорости нагрева угольной засыпки в диапазоне более высоких давлений. В результате интенсификации процесса производства полукокса при сохранении его прочностных характеристик возможно улучшить экономические показатели производства даже несмотря на повышение капитальных затрат, связанных с возрастанием металлоемкости реактора. Оптимизация представленного процесса и разработка новых энерготехнологических процессов имеют важное научно-практическое значение для энергетики и существенное значение для развития страны.

Автор выражает благодарность научным работникам филиала ООО «Сибниуглеобогащение» в г. Красноярске: канд. техн. наук Д.А. Логинову, С.Н. Гикалову, С.В. Деменчуку и др., принимавшим непосредственное участие в создании экспериментальных установок и проведении на них исследовательских работ. Автор благодарит д-ра техн. наук Исламова С.Р. за поддержку в проведении исследований и помощь в работе над диссертацией.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях:

1. Логинов, Д. А. Экспериментальное исследование влияния давления на процесс полукоксования бурого угля / Д.А. Логинов, **А.П. Черных**, С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Химия твердого топлива. – 2021. – № 2. – С. 67-70. [Chernykh A.P., An Experimental Study of the Effect of Pressure on the Process of Brown Coal Semicoking / D. A. Loginov, A. P. Chernykh, S. R. Islamov // Solid Fuel Chemistry – 2021. – Vol. 55 – No. 2. – pp. 129–132. – DOI 10.3103/S036152192102004X.

2. Логинов, Д. А. Термическая переработка энергетического угля под давлением с получением полукокса и тепловой энергии / Д.А. Логинов, **А.П. Черных**, С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – № 14(4). – С. 399–407.

Патенты:

3. Патент № 2725792 Российская Федерация, МПК C10B 49/00 (2006.01). Способ получения кускового карбонизата : № 2019139394 заявл. 04.12.2019 :

опубл. 06.07.2020 / Исламов С. Р., Логинов Д. А., **Черных А. П.** ; заявитель АО «СУЭК-Красноярск». – 5 с. : ил. – Текст: непосредственный.

Публикации в сборниках материалов конференций:

4. Логинов, Д. А. Влияние избыточного давления процесса термической переработки бурого угля на водопоглощение полученного полукокса / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, **А.П. Черных** – Текст: непосредственный // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XLII Международной научно-практической конференции. – М., Изд. «МЦНО». – 2021. – № 2(42).

5. Логинов, Д. А. Термическая переработка низкочольного бурого угля при повышенном давлении / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, **А.П. Черных** – Текст: непосредственный // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам XLV Международной научно-практической конференции. – М., Изд. «Интерна-ука». – 2021. – № 2(42).

6. Логинов, Д. А. Экспериментальное исследование влияния давления на прочность полукокса из бурого угля / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, **А.П. Черных** – Текст: непосредственный // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. ст. международной научной конференции. 30–31 января 2021 г. – Казань: ООО «Конверт». – 2021. – С. 90–91.

7. Логинов, Д. А. Снижение водопоглощения буроугольного полукокса повышением давления при термической переработке / Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, **А.П. Черных** – Текст: непосредственный // Сборник статей XXXVIII международной научно-практической конференции. – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». – 2021. – С. 32–34.

8. **Черных, А.П.** Термическая переработка энергетического угля под давлением / А.П. Черных, Д.А. Логинов, С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Современные технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов: сб. ст. X Международной научно-практической конференции (5 августа 2021 г.). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука». – 2021. – С. 10–15.

9. Логинов, Д. А. Влияние давления на прочность полукокса из бурого угля различных марок/ Д.А. Логинов, С.Р. Исламов, **А.П. Черных** – Текст: непосредственный // Процесс обмена знаниями в условиях научно-технического прогресса: сборник научных трудов Материалы Международных научно-практических мероприятий Общества Науки и Творчества. – Казань. – 2021. – С. 81–83.