

*На правах рукописи*



**ЛОГИНОВ**  
Дмитрий Александрович

**КОМБИНИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО  
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ И УГЛЕРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ  
ИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Красноярск 2022

Работа выполнена в ООО «Сибниинуглеобогащение»

Научный консультант:

доктор технических наук Исламов Сергей Романович

Официальные оппоненты:

Мунц Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра теплоэнергетики и теплотехники, заведующий кафедрой.

Богомолов Александр Романович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики института энергетики, заведующий кафедрой.

Нурмухаметов Денис Рамильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория энергетических соединений и нанокompозитов института углехимии и химического материаловедения, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 14.09. 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

## Общая характеристика работы

В контексте ратифицированного Россией Парижского соглашения, а также в соответствии с Энергетической стратегией России до 2035 года переход экономики России к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике является приоритетной задачей государственной энергетической политики страны. В связи с этим к углю предъявляются все более высокие требования по качественным характеристикам и экологическим параметрам его использования.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью разработки и внедрения принципиально новых энерготехнологических процессов использования углей, обеспечивающих высокий уровень экологической безопасности и экономической эффективности. Современные реалии требуют инновационных методов подготовки энергетических углей перед сжиганием, а также разработки новых видов продукции для расширения сферы применения угля.

Энергетика. Непрерывно развивающиеся технологии производства электроэнергии требуют применения твердого топлива с высокими теплотехническими характеристиками. Это позволяет повысить КПД электростанции с одновременным снижением удельных выбросов вредных веществ. Применяемые в России традиционные технологии обогащения исчерпали свой потенциал и не могут обеспечить высоких теплотехнических показателей продукции с приемлемой экономической эффективностью.

Глубокая переработка нефти. Государственной программой РФ «Развитие энергетики» предусматривается повышение глубины переработки нефтяного сырья. Это неизбежно влечет за собой увеличение объема отходов процесса нефтепереработки, в том числе гудрона.

К настоящему моменту в российской компании ТАИФ внедрена технология гидрокрекинга гудрона, позволяющая радикально повысить степень переработки в полезные продукты. Неотъемлемым компонентом технологии является углеродный сорбент для связывания вредных примесей. К нему предъявляются относительно невысокие требования, однако до настоящего времени такой сорбент завозится из-за границы.

Многие предприятия страны также испытывают дефицит углеродных сорбентов для очистки оборотных сточных вод и газовых выбросов.

Металлургия. Используемый в настоящее время в черной металлургии кокс, получаемый в коксовых батареях из смеси каменных углей различных марок, уже не является безальтернативным углеродистым восстановителем. Разрабатываемые ведущими металлургическими компаниями мира инновационные процессы выплавки чугуна и стали предусматривают использование высокорекреакционного углеродистого сырья с высоким содержанием углерода при минимуме нежелательных примесей.

Городская экология. К настоящему времени во многих городах России обострилась экологическая ситуация в связи высоким содержанием вредных

веществ в атмосферном воздухе. Влияние на атмосферный воздух автотранспорта и твердотопливных печей частного жилого сектора сопоставимо с крупными промышленными предприятиями. Особенно остро такая проблема стоит в крупных городах Сибири и Забайкалья. Целью федерального проекта «Чистый воздух» является кардинальное снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, что может быть сделано в кратчайшие сроки путем перевода отопительных печей частных домовладений с угля на бездымное топливо.

В связи с новыми требованиями к угольной продукции Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года предусмотрены приоритетная разработка и внедрение инновационных технологий, в том числе создание территориальных кластеров по производству из угля термококса, бездымного топлива, брикетов и аналогичных продуктов.

Таким образом, для обеспечения возможности функционирования энергетической отрасли России на принципах экологической чистоты и ресурсосбережения необходимы совершенствование существующих, разработка и внедрение инновационных низкоэмиссионных процессов энерготехнологической переработки угля с целью производства высококалорийного топлива, высокорекреационных углеродистых восстановителей для металлургии, углеродных сорбентов и бездымного бытового топлива с параллельным производством тепловой энергии. Такие технологии непременно должны обеспечивать энергетическую и экономическую эффективность, высокую производительность и экологическую безопасность.

**Степень разработанности темы.** 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 и др. созданы научные основы различных процессов комбинированного получения из угля твердых и газообразных энергоносителей. При этом избыточное давление широко применяется в процессах переработки твердых топлив для получения только газообразных и жидких продуктов, таких как синтез-газ, СЖТ, метанол, аммиак и др.

В связи с этим отдельного изучения требует процесс термической переработки кускового угля при повышенном давлении, позволяющий производить кусковой углеродный продукт и газовое топливо из энергетических углей.

Разработанные д-рами техн. наук Исламовым С. Р. и Степановым С. Г. и внедренные к настоящему времени в России энерготехнологические процессы переработки угля серии «Термококс» безусловно обладают вышеперечисленными достоинствами. Однако вопросы влияния гранулометрического состава и влажности исходного угля на параметры процесса «Термококс-КС» и качественные, в том числе сорбционные, свойства получаемого твердого продукта изучены недостаточно. Технологический процесс «Термококс-С» позволяет использовать крупнокусковой уголь, но переработка каменных энергетических углей с использованием этой технологии пока остается невостребованной

ввиду сравнительно низкой удельной производительности, что также требует дополнительных исследований. Таким образом, потенциал этих технологий раскрыт не полностью и требуются дальнейшие исследования с целью их совершенствования.

В настоящей работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых значительно повышает экономическую эффективность существующих технологий с одновременным радикальным снижением углеродного следа производимой продукции. А также разработаны новые энерготехнологические процессы использования углей с высоким выходом летучих веществ, которые позволяют осуществлять экологически чистое комбинированное производство тепловой энергии, высококалорийного низкотемпературного топлива для современной энергетики и металлургии, а также сорбентов различного назначения, в первую очередь, для природоохранных технологий.

**Объектом исследования** являются процессы термической переработки углей с высоким выходом летучих веществ в тепловую энергию и твердые углеродсодержащие продукты.

**Предмет исследования** – характеристики теплотехнологических процессов глубокой переработки угля с комбинированным производством из угля твердых, газовых продуктов и тепловой энергии.

**Цель исследования** состоит в теоретическом обосновании и экспериментальной разработке энерготехнологических процессов переработки угля в углеродсодержащие продукты с высокой добавленной стоимостью и тепловую энергию.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ известных способов термической переработки твердых топлив и определить требования к созданию современных экономически эффективных и экологически безопасных процессов и аппаратов.

2. Оценить эффективность известного процесса автотермической переработки угля в кипящем слое с комбинированным производством энергоносителей, провести экспериментальные исследования и на основе полученных результатов усовершенствовать технологию.

3. Определить параметры процесса автотермической комбинированной переработки угля в кипящем слое, влияющие на сорбционные свойства получаемой углеродной продукции, и разработать новые процессы комбинированной переработки угля в кипящем слое с получением сорбентов.

4. Обосновать и разработать новый способ переработки угля под давлением, обеспечивающий получение кусковых углеродистых продуктов из энергетических углей с параллельным производством тепловой энергии.

5. Разработать автотермический технологический процесс для переработки угля в стационарном слое, обеспечивающий энергоэффективное и экологически безопасное комбинированное производство углеродистых продуктов и тепловой энергии.

6. На основе результатов выполненных экспериментальных исследований разработать практические рекомендации по реализации энерготехнологических процессов в промышленном масштабе.

**Научная новизна настоящей работы состоит в следующем:**

1. Разработаны научные основы, обеспечивающие интенсификацию и повышение экономической эффективности энерготехнологического процесса автотермической переработки угля в кипящем слое с комбинированным производством энергоносителей:

1.1. Установлены закономерности влияния влажности бурого угля на показатели процесса.

1.2. Выявлено влияние гранулометрического состава угля и распределения скоростей первичного воздуха в реакторе кипящего слоя на сорбционные свойства получаемых при энерготехнологической переработке углеродсодержащих продуктов и производство тепловой энергии.

2. На основе результатов экспериментальных исследований разработаны и запатентованы новые энерготехнологические процессы комбинированного производства тепловой энергии и сорбентов различного назначения.

3. Установлена зависимость качественных показателей углеродсодержащих продуктов от давления в диапазоне 0,0-4,0 МПа при термической переработке энергетических углей. На основе полученных результатов разработан новый технологический процесс комбинированного получения тепловой энергии и высококалорийного карбонизата при повышенном давлении.

4. Выполнены углубленные исследования процесса частичной газификации слоя угля с эффектом обратной тепловой волны в диапазоне температур 900-1100 °С, а также процесса пиролиза угля в прямой тепловой волне при частичном сжигании генераторного газа.

5. На основе полученных результатов разработан новый энерготехнологический процесс комбинированного получения тепловой энергии и карбонизата в двухзонном реакторе с разнонаправленным дутьем.

**Теоретическая и практическая значимость и использование результатов работы:**

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

2. Режимные параметры энерготехнологических процессов термической переработки (расходы угля, воздуха, греющего агента, температура переработки, производительность реактора по твёрдому продукту) и характеристики получаемого металлургического восстановителя и высококалорийного топлива приняты для использования при проектировании промышленных теплотехнологических комплексов по переработке углей марок 2Б и Д проектно-конструкторскими организациями (ООО «Сибниинуглеобогащение», НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» и др.).

3. На основе результатов исследований разработаны технологические регламенты комбинированного производства тепловой энергии и буроугольного кокса, которые внедрены на промышленном предприятии АО «Разрез Березовский» (получен акт о внедрении результатов диссертационной работы).

4. Разработанные способ и устройство энерготехнологической переработки угля в плотном слое с разнонаправленным дутьем положены в основу проекта завода карбонизации угля марки Д Черногорского месторождения (получен акт о внедрении результатов диссертационной работы).

5. На основе разработанных режимных параметров на промышленном предприятии АО «Разрез Березовский» осуществляется комбинированное производство углеродного сорбента и тепловой энергии (получен акт о внедрении результатов диссертационной работы).

**Методология и методы исследования.** В работе использованы комплексные исследования, включающие научный анализ практики термической и термохимической переработки угля, экспериментальные методы исследования на специально созданных лабораторных, стендовых и опытно-промышленных установках, а также промышленное внедрение результатов исследований.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований энерготехнологического процесса комбинированного получения тепловой энергии и углеродсодержащих продуктов в реакторе с кипящим слоем.

2. Автотермическая технология комбинированного производства тепловой энергии и термококса в реакторе с кипящим слоем в модифицированных котельных агрегатах, отличающаяся повышенной производительностью по твердому продукту, в также результаты ее промышленного освоения.

3. Результаты экспериментальных исследований энерготехнологического процесса комбинированного получения тепловой энергии и сорбентов в реакторе с кипящим слоем и разработанная на их основе технология комбинированного производства тепловой энергии и высококачественных сорбентов различного назначения в реакторе с кипящим слоем в модифицированных котельных агрегатах и результаты ее внедрения в производство.

4. Результаты экспериментальных исследований энерготехнологического процесса получения тепловой энергии и металлургического восстановителя в стационарном слое при повышенном давлении.

5. Технология получения тепловой энергии и кускового металлургического восстановителя из бурых и каменных энергетических углей в плотном слое при повышенном давлении.

6. Автотермическая технология получения тепловой энергии и металлургического восстановителя в стационарном слое с разнонаправленным дутьем, отличающаяся повышенной производительностью.

**Степень достоверности** полученных результатов обеспечена применением апробированных методик исследований, применением должным образом поверенных и калиброванных средств измерений, высокой корреляцией

расчетных и экспериментальных данных, промышленным применением разработанных способов и устройств, удовлетворительной сходимостью полученных расчетных данных с результатами испытаний в промышленных установках.

**Апробация результатов диссертационных исследований.** Основные материалы диссертационной работы обсуждены и доложены на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (Красноярск, 2006 г.), XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2006 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2010 г.), XIII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: СИБРЕСУРС 2010» (Кемерово, 2010 г.). III Международной конференции «Теория и практика современной науки» (Пенза, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Научно-практические исследования: прикладные науки» (Омск, 2020 г.), X Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020 г.), X Международной научно-практической конференции «Современные технологии» (Петрозаводск, 2021 г.), XXXVIII международной научно-практической конференции «Актуальность» (Москва, 2021), XLV Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2021), VIII международной научной конференции «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности» (Волгоград, 2021), Круглый стол со всероссийским и международным участием «Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем» (Москва, 2021), Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Уфа, 2021), XXVI Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» (Пенза, 2021), XIV Всероссийской научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок» (Пенза, 2021), Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 47 печатных работ, из них 11 в изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, 6 работ в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, кроме того 9 патентов на изобретения.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач данного исследования, обосновании, разработке положений, определяющих научную новизну работы, разработке методик проведения экспериментальных исследований,



представленных в данной работе, разработке методики расчета процесса энерготехнологической переработки угля, анализе полученных теоретических и экспериментальных данных, участии в создании технологических процессов, способов и устройств, испытании промышленных установок. В совместных публикациях автору принадлежит более 80% результатов исследований.

Данные, полученные в результате исследований, были использованы при проектировании комплексов по термической переработке угля с целью комбинированного производства тепловой энергии, углеродсодержащих продуктов металлургического назначения, высококалорийного топлива, сорбентов.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы и 10 приложений. Работа содержит 424 страницы машинописного текста, в том числе 296 страниц основного текста диссертации и 128 страниц приложений, 141 рисунок и 58 таблиц. Список литературы включает 156 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость результатов, а также приведено краткое содержание работы по главам.

В **первом разделе** показано, что современная угольная энергетика и металлургия требуют радикального повышения теплотехнических характеристик используемого топлива. Для решения этой задачи разработана концепция комплексной переработки угля с целью получения широкого спектра углеродсодержащей продукции повышенного качества, газового топлива и тепловой энергии.

Выполнен обзор существующих технологических процессов термической переработки угля, а также сравнительный анализ их преимуществ и недостатков.

1. В начале 2000-х годов была разработана и реализована в промышленном масштабе энерготехнологическая схема переработки бурого угля в кипящем слое «ТЕРМОКОКС-КС». На промышленном предприятии (АО «Разрез Березовский», Красноярский край) из бурого угля производится мелкозернистый среднетемпературный кокс, а тепловая энергия используется для отопления производственных и бытовых зданий. Далее буроугольный кокс отгружается потребителям в исходном виде, а часть его брикетировается в бездымное бытовое топливо и металлургический брикет. Рассмотренная технология имеет большой потенциал развития, как в части интенсификации самого процесса термической переработки, так и в части расширения ассортимента выпускаемой продукции.

2. Австралийская компания Lucella, занимающаяся переработкой пластиковых отходов по технологии под торговой маркой Cat-HTR, адаптиро-

вала свой процесс под переработку бурого угля в углеродный порошок и «синтетическую нефть». В новом процессе уголь подсушивается, измельчается до крупности менее 100 мкм, смешивается с водой и нагревается до температур 300-320 °С при давлении 20-22 МПа. Затем разделяют жидкую и твердую фазы. Углеродсодержащий порошок имеет низкопористую структуру, площадь поверхности пор составляет всего 2 м<sup>2</sup>/г. Таким образом, за счет повышенного давления можно радикально снизить пористость получаемого углеродного продукта.

3. В начале 90-х годов в Красноярске была разработана автотермическая технология частичной газификации угля в неподвижном слое (технология «ТЕРМОКОКС-С»). Технология радикально отличается от классических процессов пиролиза и коксования тем, что при переработке угля не образуются побочные продукты в виде конденсированных вредных веществ (смолы, фусы, фенольные воды и т.п.). Она предельно проста по аппаратному исполнению, надежна в эксплуатации. Действующий в г. Красноярске с 1996 г. завод состоит из цеха газификации, который производит из бурого угля углеродный сорбент и генераторный газ, а также газовой котельной.

Помимо бурого угля эта технология позволяет перерабатывать и каменный энергетический уголь для получения кускового карбонизата и генераторного газа. Получаемый продукт обладает высокой теплотой сгорания, высокой реакционной способностью. Низкий остаточный выход летучих веществ позволяет использовать его и в качестве бездымного топлива. Однако, как и любая другая технология, она имеет свою ограниченную сферу применения, в первую очередь из-за низкой удельной производительности и цикличности процесса.

4. Одним из высокопроизводительных процессов получения полукокса из каменного угля является процесс полукоксования в печах с внутренним обогревом рециркулирующими газами, осуществляемый рядом китайских предприятий, а также заводами-лицензиатами данной технологии в различных странах мира. Рециркуляция газа производится для сжигания части пиролизного газа в слое угля. В процессе фильтрации через слой угля греющий агент насыщается горючими компонентами, и удельная теплота сгорания газа на выходе из аппарата вновь возрастает. Около половины получаемого на выходе из аппарата газа направляется на рециркуляцию, а оставшаяся часть используется для генерации тепловой и электрической энергии. Недостатком данной технологии является необходимость очистки получаемого в процессе горючего газа от влаги и каменноугольной смолы для возможности возврата компрессорами части очищенного газа в слой угля. Следует отметить, что блок очистки и рециркуляции горючего газа герметичными взрывобезопасными компрессорами занимает большую часть всего строительного объема завода, а также составляет значительную часть его стоимости.

По результатам обзора сформулированы задачи исследования для диссертационной работы.

**Второй раздел** посвящен совершенствованию процесса энерготехнологической переработки угля «ТЕРМОКОКС-КС». В ранее выполненных работах для его осуществления было рекомендовано применение угля класса крупности 0-15 мм. В результате многолетней промышленной эксплуатации модифицированных котлоагрегатов АО «Разрез Березовский» выявлено, что значительная доля мелкого угля при поступлении в кипящий слой выносится из него восходящим газовым потоком и сгорает в топочном объеме. Это повышает долю тепловой энергии в общем энергетическом балансе производимой продукции. При  $A^d$  и  $V^{daf}$  менее 10% относительный выход получаемого среднетемпературного кокса составлял около 17% от расхода поступающего угля, а производство тепловой энергии – 50 ГДж (12 Гкал) на каждую тонну произведенного кокса. Термическая переработка угля в этом режиме производилась при температуре кипящего слоя 670-700 °С.

С экономической точки зрения целесообразно увеличение доли буроугольного кокса в производимой продукции (буроугольный кокс + тепловая энергия). При этом эксплуатационные затраты возможно отнести на себестоимость дорогостоящего кокса и снизить себестоимость получаемой тепловой энергии. С целью повышения относительного выхода буроугольного кокса на экспериментальном стенде были проведены испытания по частичной газификации Березовского угля крупностью 5-15 мм, то есть с предварительным удалением мелочи менее 5 мм.

Типичные характеристики использованного угля приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технический и элементный анализ исходного угля

$W_t^r$	$A^d$	$V^{daf}$	$C^{daf}$	$O^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S_t^d$	$Q_i^r$
%								МДж/кг
33,8	4,9	47,6	71,0	23,1	4,9	0,7	0,15	15,9

В результате экспериментов выявлены зависимости относительного выхода буроугольного кокса от температуры кипящего слоя, полученные данные хорошо аппроксимируются линейными уравнениями. Установлено (рисунок 1), что относительный выход среднетемпературного кокса с требуемыми характеристиками при использовании более крупного угля составил 20 %, а выработка тепловой энергии снизилась до 42 ГДж/т (10 Гкал/т). При этом использовался прежний температурный интервал – 670-700 °С, так как при снижении температуры наблюдалось нарушение стабильности кипящего слоя.

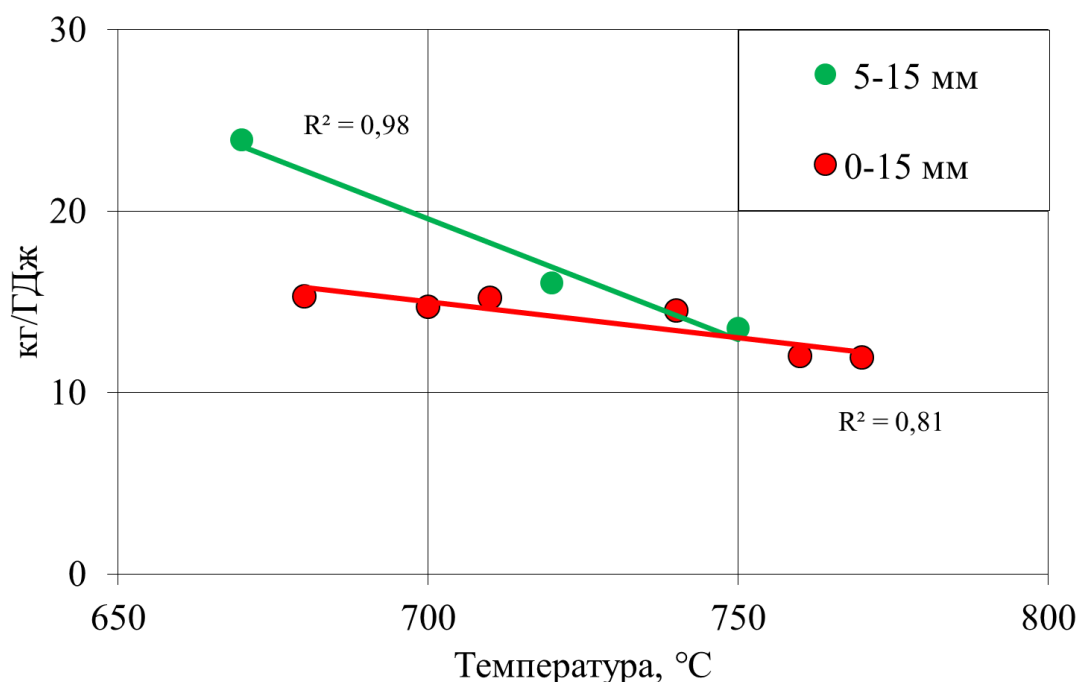


Рисунок 1 – Зависимость относительного выхода кокса G от температуры кипящего слоя

Удаление из угля мелких классов не позволяет получить в кипящем слое кокс с более крупным размером частиц. Эффект термодробления при попадании частиц топлива в зону высоких температур кипящего слоя оказывает на гранулометрический состав кокса определяющее влияние.

В результате проведенных экспериментальных исследований определена возможность изменения пропорции между производимыми энергоносителями: тепловой энергией и буроугольным коксом (таблица 2). При использовании угля класса крупности 0-15 мм доля кокса в энергетическом балансе производимой продукции составляла 29,8 %, а на угле крупностью 5-15 мм – 36,0 %.

Таблица 2 – Энергетический баланс процессов переработки угля

Показатель	Значение, %	
	0-15 мм	5-15 мм
<i>Приход</i>		
Уголь	100,0	100,0
<i>Расход</i>		
Теплота сгорания термококса	29,8	36,0
Тепловая энергия	70,2	64,0

***Полученные данные легли в основу нового технологического регламента производства среднетемпературного кокса под торговой маркой***

**МК-1 на котельной АО «Разрез Березовский». В результате промышленного внедрения результатов работ обеспечено увеличение выпуска среднетемпературного кокса.**

Из ранее выполненных работ по нагреву угольных частиц известно, что важнейшим фактором, замедляющим их прогрев, является высокое содержание влаги.

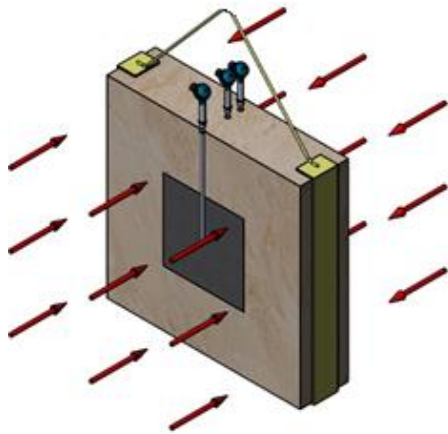


Рисунок 2 – Схема проведения эксперимента с двухсторонним нагревом пластины угля

Для подтверждения полученных данных проведена серия опытов по нагреву угольной пластины с различной исходной влажностью. В экспериментах осуществлялся двусторонний нагрев одиночных образцов рядового угля размером 50×50×30 мм до температур 600–1000 °С, в инертной среде азота. Форма с пластиной вводилась в предварительно нагретую печь в вертикальном положении на подвесе электронных весов. Схема эксперимента приведена на рисунке 2.

В образце на расстояниях 0, 7 и 15 мм от нагреваемой поверхности размещались термопары, с помощью которых велась запись термограммы прогрева частицы. Процесс нагрева продолжался до тех пор, пока температура в центре образца не достигала температуры в камере печи.

В проведенных экспериментах температура поверхности (0 мм) практически сразу достигает температуры греющей среды  $T_{печи}$  (рисунок 3). Как видно из приведенных данных, снижение влаги угля с 33 % до 10 % приводит к уменьшению времени прогрева в 1,6 раза.

Таким образом, предварительное снижение влаги перед подачей угля в кипящий слой позволит интенсифицировать процесс термообработки и увеличить производительность по твердому продукту.

Для подтверждения полученного вывода о влиянии влаги угля на огневом стенде были проведены эксперименты по частичной газификации угля крупностью 5-15 мм в кипящем слое в рекомендованном ранее температурном диапазоне (670-700 °С). При этом исходный уголь предварительно подсушивался до различной влажности.

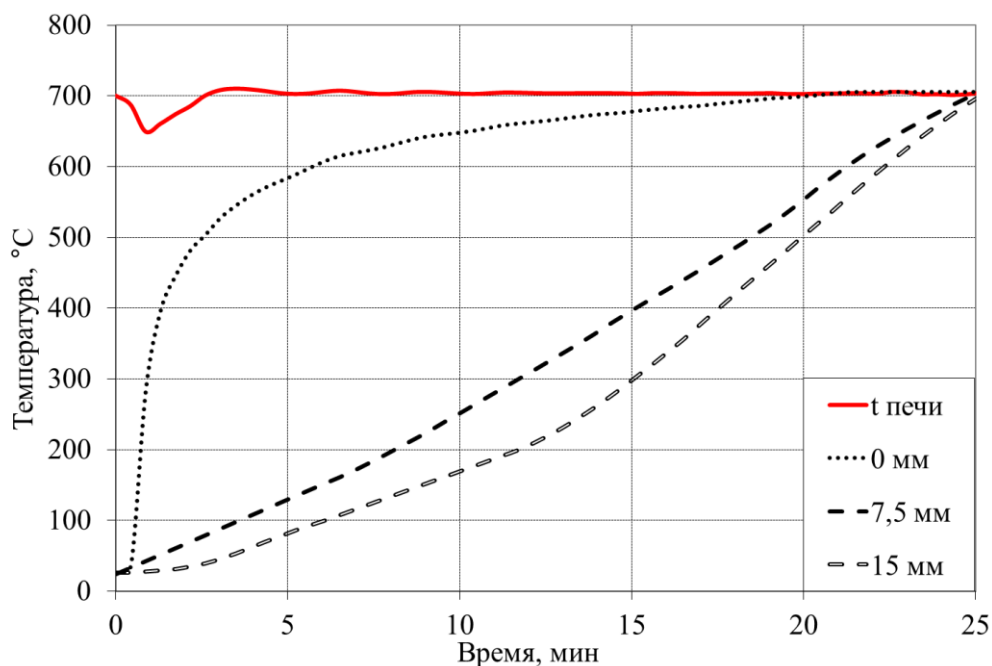
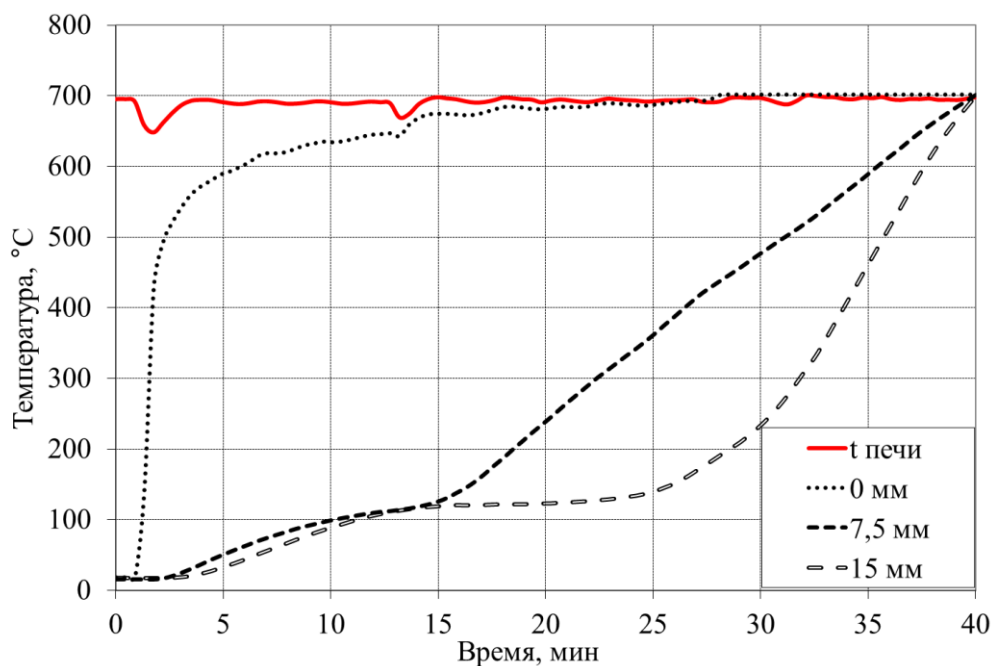


Рисунок 3 – Термограммы нагрева угля при температуре печи 700 °С  
( $W^r_{\text{угля}} = 33\%$  - вверху,  $W^r_{\text{угля}} = 10\%$  - внизу)

В результате серии экспериментальных исследований выявлено, что в расчете на исходный уголь ( $W^r=33\%$ ) относительный выход кокса в процессе с предварительной сушкой угля до  $W^r=6\%$  составил 32% при температуре 700 °С, **что более, чем в полтора раза превышает достигнутый ранее уровень производительности.**

Установлено также, что по мере снижения влажности топлива укрупняются гранулометрический состав кокса (рисунок 4), ввиду уменьшения эффекта термодробления.

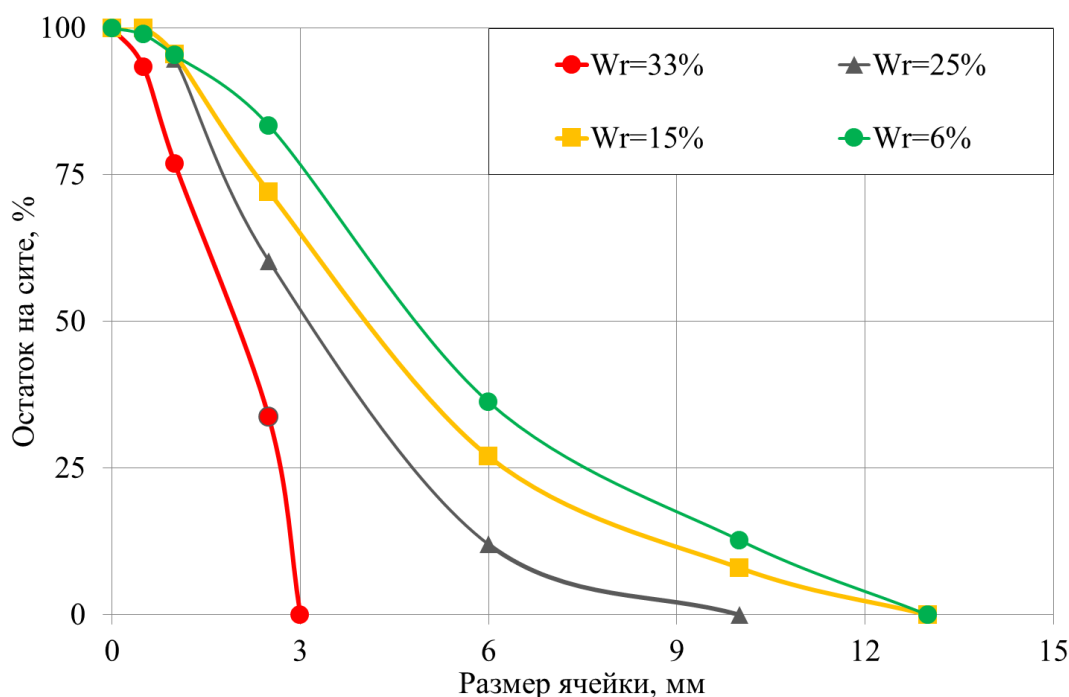


Рисунок 4 – Средний гранулометрический состав кокса из угля с различной влажностью в диапазоне температур 670-700 °С

Применение подсушенного угля позволило также обеспечить стабильное функционирование кипящего слоя вплоть до температуры 550 °С. На рисунке 5 приведены зависимости относительного выхода кокса от температуры кипящего слоя. Данные каждой серии опытов на угле определенной влажности имеют линейную зависимость от температуры слоя. В диапазоне 550-680 °С, соответствующих режиму полукоксования, получен буроугольный полукокк с выходом летучих веществ в пределах 10-22 % (рисунок 5). Такой уровень выхода летучих соответствует характеристикам углей марок Т и СС, используемых для вдувания в доменные печи предприятий черной металлургии. Относительный выход полукокка из подсушенного угля достигает 60 %, а в расчете на влажный уголь – 45 %. При этом крупность частиц получаемого полукокка еще больше возросла.

Таким образом, в данном разделе экспериментально подтверждена возможность увеличения производительности процесса по твердому продукту за счет удаления из исходного угля мелких классов. Кроме того, предварительная сушка угля позволяет достичь дополнительного полуторакратного увеличения производительности по термококсу с одновременным снижением производства тепловой энергии. Подсушивание угля позволило также реализовать стабильный процесс термической переработки угля в кипящем слое при пониженных температурах, необходимый при получении буроугольного полукокка с повышенным выходом летучих веществ.

Удельная эмиссия CO<sub>2</sub> на единицу произведенной тепловой энергии при энерготехнологической переработке угля с комбинированным производством

полукокса линейно снижается при уменьшении влажности применяемого угля и оказывается на 20 % ниже, чем при производстве тепловой энергии путем сжигания угля в стандартных котельных агрегатах (рисунок 6). Выбросы вредных (загрязняющих) веществ в этом процессе на 15-30 % ниже, чем при производстве тепловой энергии сжиганием угля.

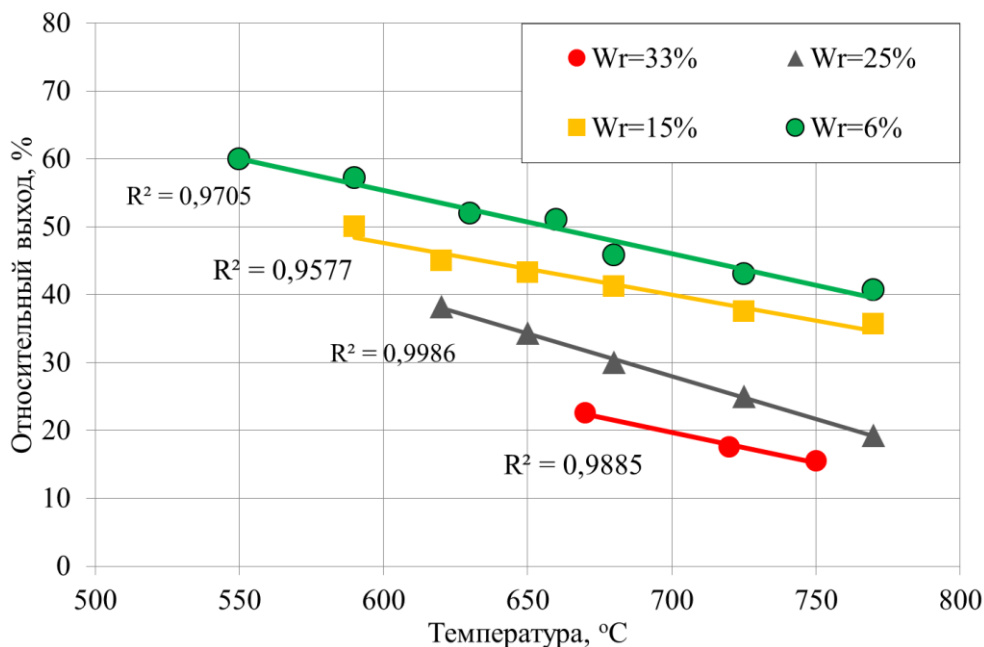


Рисунок 5 – Зависимость относительного выхода термококса от температуры кипящего слоя

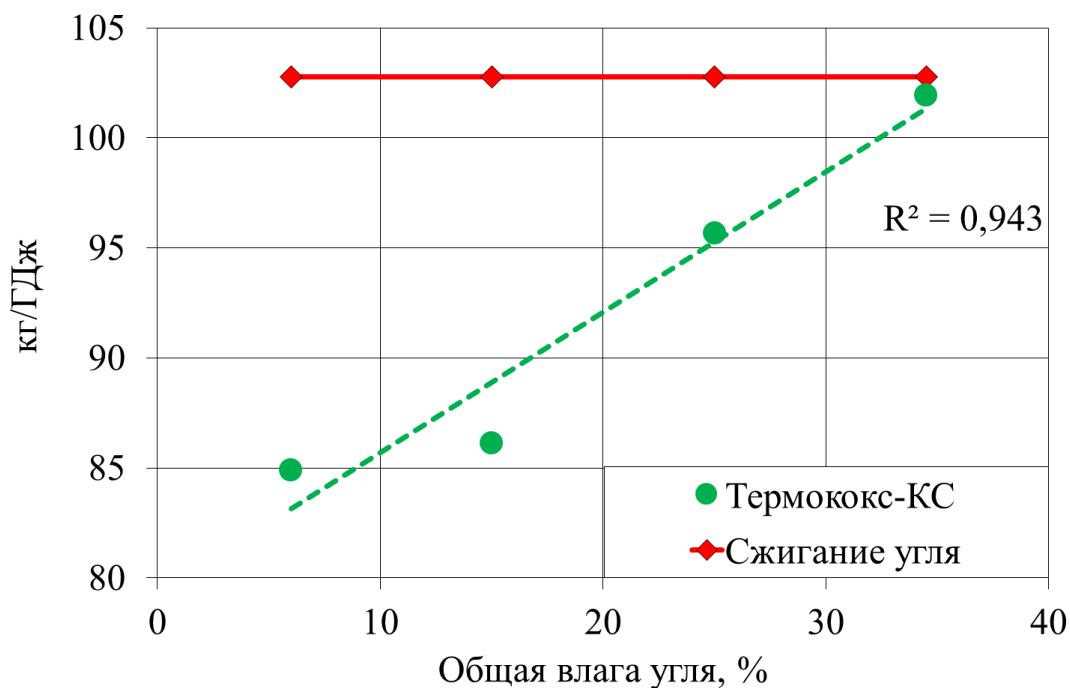


Рисунок 6 – Удельная эмиссия CO<sub>2</sub> при производстве тепловой энергии и полукокса



*Полученные результаты позволили повысить экономическую эффективность технологии «Термококк-КС» и расширить диапазон качественных показателей бурого кокса с одновременным снижением удельных выбросов вредных веществ и углекислого газа в атмосферу.*

Третий раздел посвящен разработке автотермической технологии производства углеродных сорбентов различного назначения и тепловой энергии из бурого угля.

Производство сорбента для гидрокрекинга. В современных процессах глубокой переработки нефти, внедряемых во всем мире, применяются углеродные сорбенты для связывания серы и тяжелых металлов в исходном сырье. Причем здесь не требуются высокие сорбционные свойства, характерные для высококачественных дорогих сорбентов. До настоящего времени единственным производителем таких сорбентов являлась компания RWE (Германия). Первый завод по глубокой переработке нефтяных остатков в России (г. Нижнекамск) запустили с использованием именно этого сорбента. Основным параметром сорбционной емкости применяемого сорбента является площадь удельной поверхности по методу Брунауэра, Эммета, Теллера (БЭТ) не менее 300 м<sup>2</sup>/г. Дополнительные требования предъявляются также к зольности и выходу летучих веществ – не более 10 %. Требуемая крупность сорбента – до 2 мм.

Аналитические испытания выпускаемой на АО «Разрез Березовский» мелочи коксовой МК-1 показали, что площадь по БЭТ для этой продукции составляет 230-270 м<sup>2</sup>/г. В то же время зольность и выход летучих веществ соответствуют предъявляемым требованиям. Получаемый класс крупности 0-3 мм позволяет подготовить сорбент требуемого грансостава путем дополнительного измельчения либо отсева. Поэтому была поставлена задача повышения сорбционной активности за счет увеличения его удельной внутренней поверхности.

Из рисунка 7 видно, что из угля широкого класса крупности 0-15 мм получен сорбент с площадью поверхности по БЭТ в диапазоне 340-400 м<sup>2</sup>/г. При переработке угля более узких классов 0-5 мм и 5-15 мм площадь поверхности по БЭТ резко возрастает до показателей 400-460 м<sup>2</sup>/г. С повышением температуры процесса возрастают сорбционные свойства сорбента, однако в то же время снижается относительный выход. Как показано в предыдущем разделе, в диапазоне температур 670-700 °С получаемый термококк имеет зольность и выход летучих веществ менее 10% при использовании угля любой крупности из испытанных. Поэтому для производства сорбента рекомендован уголь класса 5-15 мм. На этой крупности в диапазоне температур 670-700 °С обеспечивается максимальный относительный выход (рисунок 8) и одновременно высокая площадь поверхности по БЭТ – более 400 м<sup>2</sup>/г, что значительно превышает требования к сорбенту для гидрокрекинга.

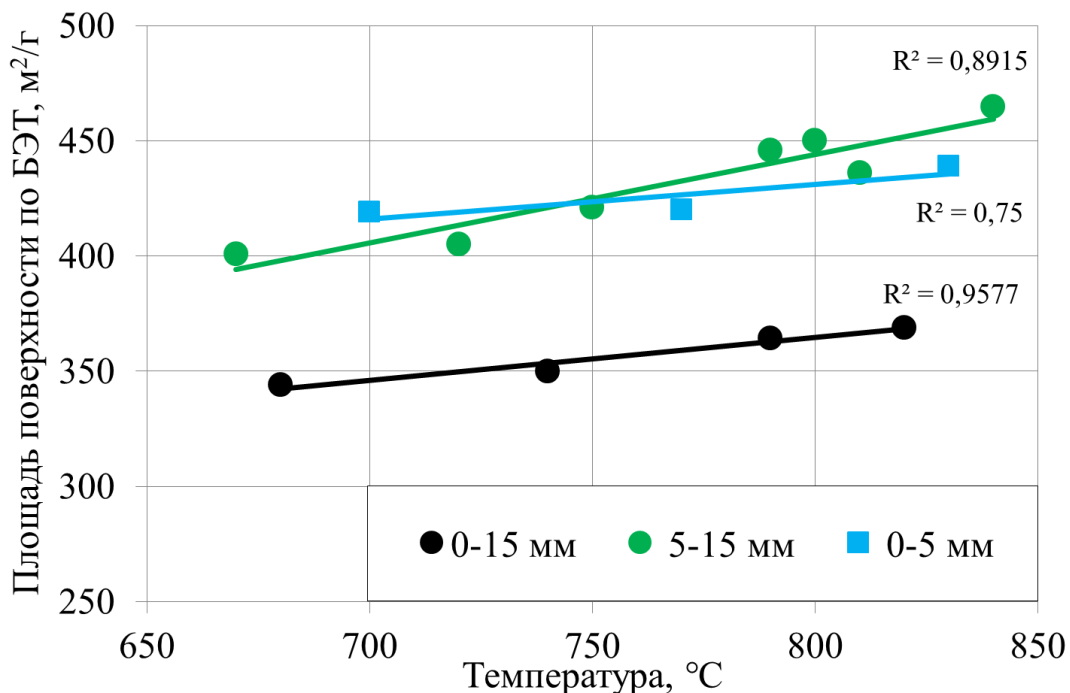


Рисунок 7 – Зависимость площади поверхности по БЭТ от температуры

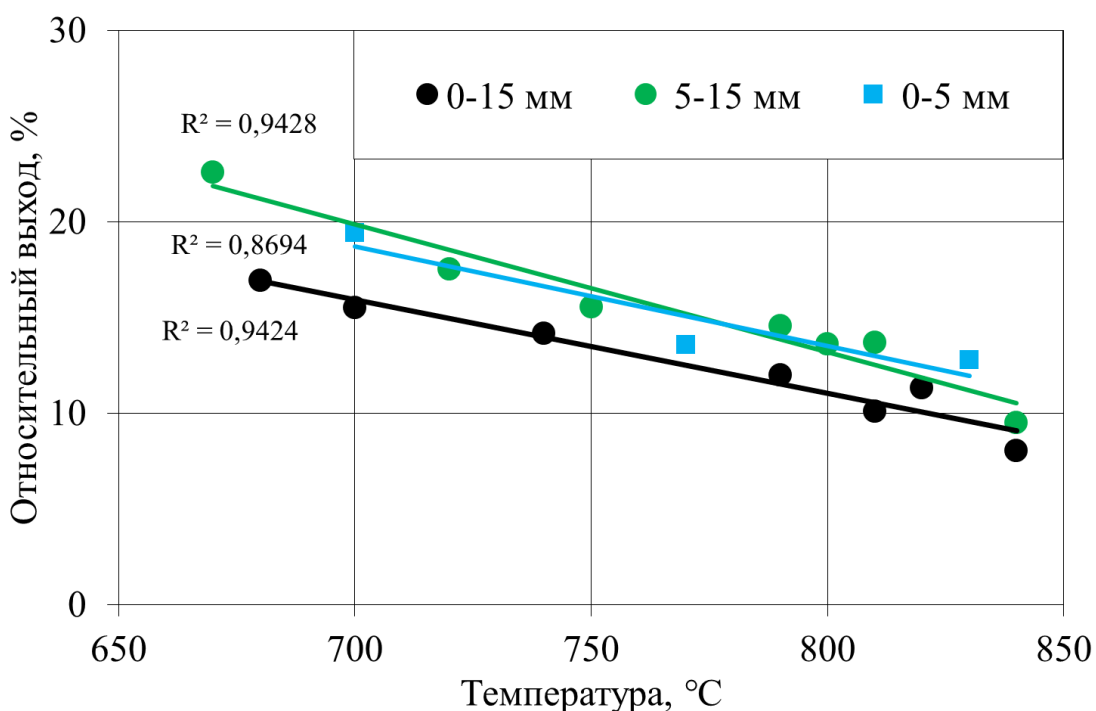


Рисунок 8 – Зависимость относительного выхода сорбента G от температуры

Производство сорбента для очистки воды и газовых выбросов. Для очистки оборотной воды технологических процессов промышленными предприятиями применяется мелкодисперсный углеродный сорбент. Такой сор-

бент используется также для очистки сточных вод городских очистных сооружений и дымовых газов мусоросжигающих заводов. Качество сорбента оценивается по показателю адсорбционной активности по йоду по ГОСТ 6217-74 и для качественных активированных углей составляет не менее 60 %.

Одним из крупнейших потребителей сорбента в России является ПАО «ГМК «Норильский никель», использующая сорбент для очистки оборотных вод. Компания закупает готовый сорбент, производимый на заводе в г. Красноярске. В технологии очистки применяется мелкодисперсный сорбент тониной помола менее 100 мкм с показателем адсорбционной активности по йоду не менее 55 %.

Адсорбционная активность по йоду сорбента МК-А, получаемого в промышленных котлах с кипящим слоем, составляет 35-38 %. Для оценки возможности получения сорбента с повышенными сорбционными свойствами на огневом стенде была проведена серия экспериментальных испытаний.

На угле крупностью 5-15 мм в диапазоне температур кипящего слоя 670-840 °С был достигнут максимум адсорбционной активности по йоду - немногим выше 40 %. С увеличением температуры этот показатель сначала возрастает, а затем снижается за счет выгорания органической части сорбента. На рисунке 9 приведены зависимости адсорбционной активности по йоду от температуры для определенных расходов первичного воздуха, приведенные данные хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью.

Глубину проработки пор можно повысить путем увеличения времени пребывания частиц угля в среде с достаточно высокой температурой. Однако при этом необходимо не допустить переход термоокислительного процесса в диффузионную область для предотвращения выгорания частиц получаемого продукта. В промышленном реакторе в зоне загрузки угля температура обычно на 300 °С ниже, чем в рабочей зоне. Это обусловлено тем, что здесь происходит интенсивное выделение парогазовой смеси из массива угольной частицы.

Для повышения температуры в этой зоне было произведено перераспределение подачи дутьевого воздуха в колпачковой решетке. В зону загрузки угля подавался увеличенный расход воздуха, а в зону выгрузки уменьшенный. Такой прием позволил снизить разницу температур слоя по длине реактора до 150 °С.

Благодаря выравниванию профиля температуры по длине реактора на экспериментальном стенде в диапазоне температур кипящего слоя 750-800 °С получен сорбент с адсорбционной активностью более 60 % (рисунок 9). Относительный выход сорбента G составил 15-16 %, зольность  $A^d$  – 13-17 %, выход летучих веществ  $V^{daf}$  – 8-9 %.

В расчете на единицу производимой тепловой энергии эмиссия углекислого газа в сравнении с вариантом получения тепловой энергии при сжигании угля не снижается, но и не возрастает. Выбросы вредных (загрязняющих) веществ (оксидов азота, оксидов серы, бенз(а)пирена, твердых частиц.) при энер-

готехнологической переработке угля в кипящем слое с комбинированным производством полукокса и тепловой энергии снижаются на 10-20 % в сравнении с вариантом классического сжигания этого же угля (таблица 3).

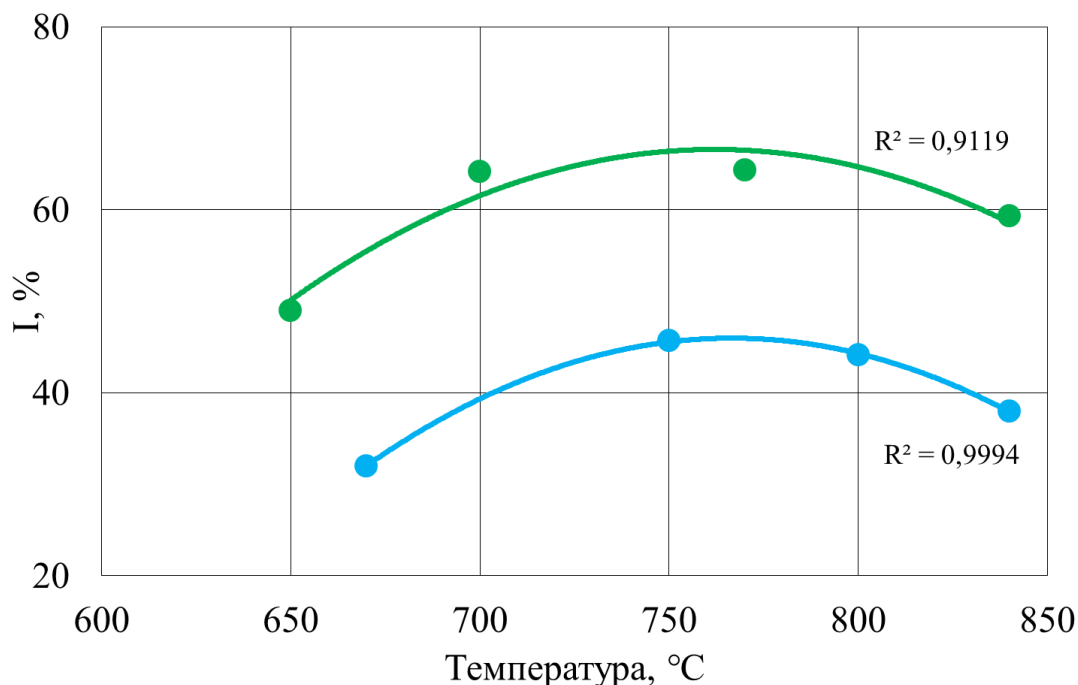


Рисунок 9 – Адсорбционная активность по йоду получаемого сорбента до и после модификации технологического режима

Таблица 3 – Выбросы вредных веществ при комбинированном производстве тепловой энергии и сорбента в модифицированном котле КВТС-20

Наименование вещества	Значение, т/год	
	Сжигание угля	Производство тепла и сорбента по технологии «Термококк-КС»
Диоксид азота, NO <sub>2</sub>	143,75	115,69
Оксид азота, NO	23,44	18,86
Оксид серы, SO <sub>2</sub>	125,6	24,7
Оксид углерода, CO	436,0	436,0
Бенз(а)пирен	0,001008	0,000906
Твёрдые частицы	406,5	575,2

Таким образом, в данном разделе разработана низкоэмиссионная технология одностадийного получения сорбента из бурого угля в кипящем слое для использования в процессе гидрокрекинга гудрона, а также в процессах

очистки оборотной технологической воды промышленных предприятий, коммунальных сточных вод, газовых выбросов.

*Полученные результаты внедрены на промышленной котельной АО «Разрез Березовский» и используются при производстве сорбента для нефтеперерабатывающей отрасли под торговым наименованием МК-А (мелочь коксовая активированная).* В условиях промышленного производства класс крупности получаемого сорбента составил 0-2 мм ввиду повышенного истирания частиц сорбента в кипящем слое, что позволяет не производить дополнительное измельчение в соответствии с требованиями потребителя.

**Четвертый раздел** посвящён разработке технологического процесса термической переработки энергетического угля под давлением. В известных процессах переработки энергетических углей получаемый продукт имеет низкую плотность, высокую пористость и, соответственно, низкую прочность, что приводит к образованию большого количества мелочи. А в случае переработки бурых углей получаемый буроугольный кокс и вовсе получается мелкодисперсным по причине низкой термической стойкости угля. Однако металлургические процессы, как правило, требуют применения кусковых углеродных материалов. Относительная дешевизна добычи энергетических углей делает их привлекательными для производства дорогостоящих кусковых металлургических углеродных восстановителей. Для решения этой задачи в работе исследован процесс получения кускового буроугольного полукокса при повышенном давлении.

Для поисковых опытов на лабораторной установке использовался уголь 2Б Бородинского разреза Красноярского края, уголь 1Б Новошахтинского разреза Приморского края и уголь марки Д разреза «Черногорский» Республики Хакасия с характеристиками, указанными в таблице 4.

Таблица 4 – Технический и элементный состав исходного угля

Марка угля	Параметр								
	$W_t^r$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$C^{daf}$ , %	$H^{daf}$ , %	$N^{daf}$ , %	$O^{daf}$ , %	$S_t^d$ , %	$Q_i^r$ , МДж/кг
1Б				64,2	6,2	1,1	28,2	0,3	13,4
2Б									
Д									

В электрометаллургических процессах применяются углеродные восстановители с выходом летучих веществ не более 15 %. Такой показатель с одной стороны недостаточно высок для нарушения режима работы газоотводящих систем печи, а с другой обеспечивает довольно интенсивный поток газов в шихте, что снижает её спекаемость. На первом этапе для угля каждой марки при атмосферном давлении определена температура нагрева, необходимая для достижения указанного уровня выхода летучих веществ. Для углей 1Б и 2Б она составила 570 °С, для угля Д – 500 °С. Дальнейшие исследования велись с нагревом угля до этой температуры в лабораторном реакторе, рассчитанном

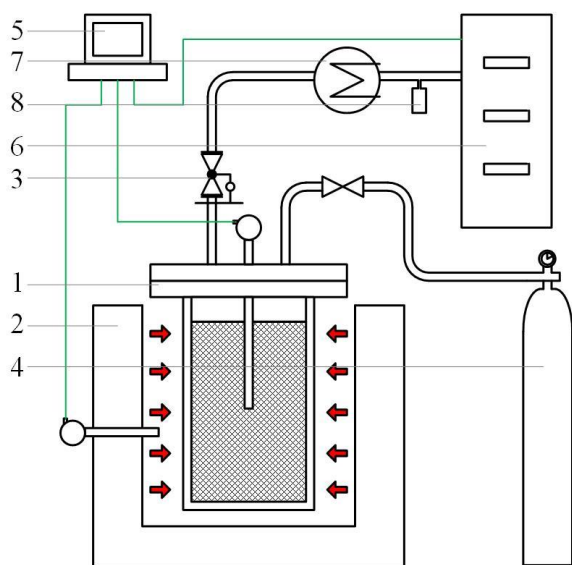


Рисунок 10 – Схема лабораторной установки

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

на работу при давлении до 5,0 МПа (рисунок 10). Повышение давления в процессе коксования препятствует выходу летучих веществ из массива угля, в результате чего происходит их закоксовывание в угольной матрице. Поэтому выход летучих веществ в получаемом полукоксе оказался незначительно ниже. Так как зольность полукокса зависит только от зольности исходного угля, а уровень выхода летучих веществ заранее определен, основными качественными показателями получаемого полукокса являются прочность на истирание и водопоглощение.

В процессе нагрева угольная матрица размягчается и в результате приложения давления происходит ее сжатие и соответствующее уплотнение структуры угля. Благодаря этому

достигается низкая пористость получаемого полукокса и, как следствие, – низкое водопоглощение и повышенная структурная прочность. Объемная усадка по завершении этапа сушки бурого угля составляет 30 %, а после завершения стадии пиролиза – 50 %. Меньшие значения наблюдаются при полукоксавании каменного угля ввиду более высокой степени метаморфизма.

Прочность измерялась путем истирания пробы полученного полукокса в барабане по ГОСТ 15490-70 и выражалась показателем  $M_{10}$  (масса пробы после испытания, оставшаяся на сите с размером ячейки 10 мм). Водопоглощение определялось способом выдержки в воде в течение 2 часов по ГОСТ 21290-75.

Как показали эксперименты в диапазоне давлений 0,0-1,0 МПа прочность полукокса резко возрастает, после чего темп ее роста замедляется и выходит на плато (рисунок 11). Выявлено различие в поведении углей разных марок. Так, прочность полукокса из угля 2Б (ПКВД-2Б) при заданной температуре достигает своего максимума при давлении 2 МПа и составляет 82 %. Этот показатель практически равен прочности исходного угля 2Б. Для угля 1Б (ПКВД-1Б) наблюдается схожая тенденция, но максимальная прочность 83 % обеспечивается при давлении 3,0 МПа. Прочность полукокса из угля марки Д (ПКВД-Д) практически достигает максимума при давлении 1,5 МПа.

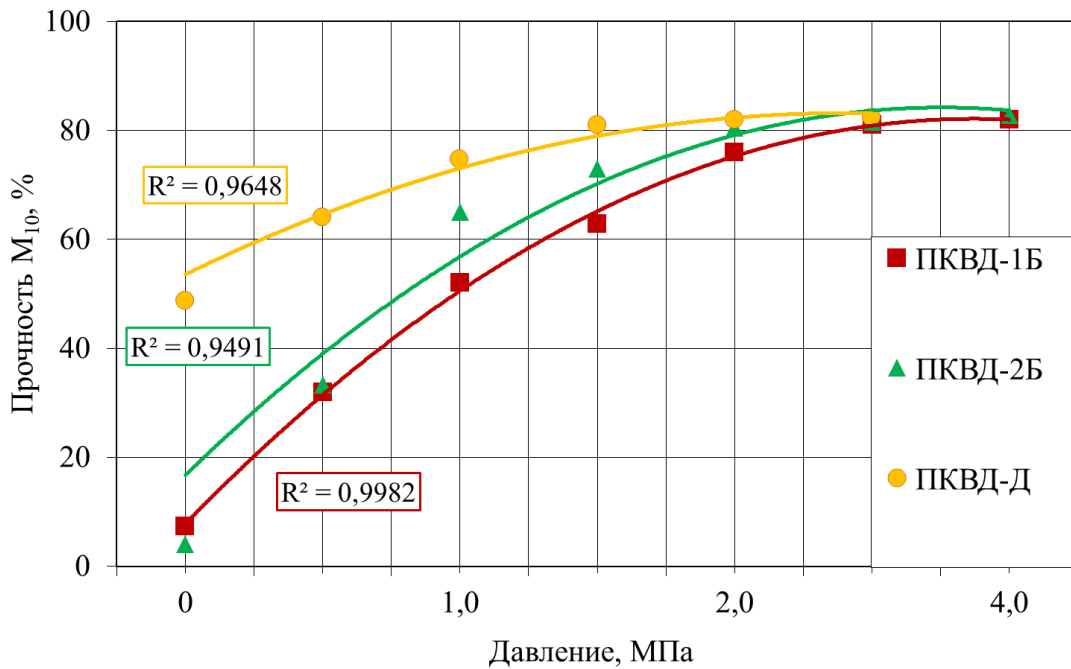


Рисунок 11 – Зависимость прочности полукокса на истирание от давления

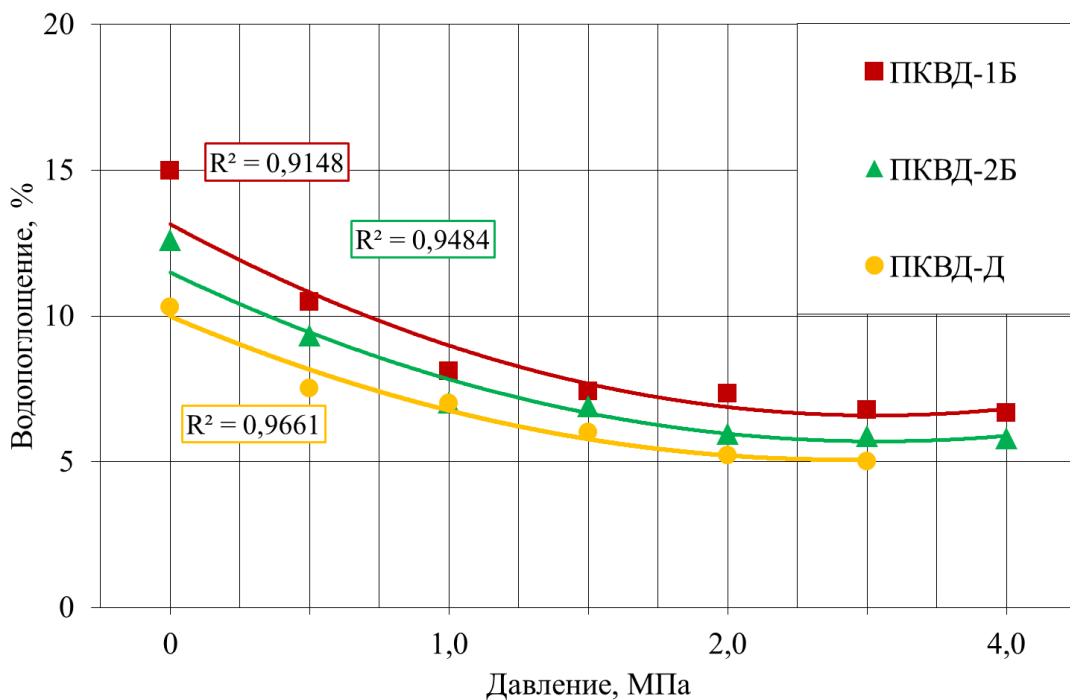


Рисунок 12 – Зависимость водопоглощения полукокса от давления

Водопоглощение полукокса также резко снижается с увеличением давления в диапазоне 0,0-1,0 МПа (рисунок 12) и практически достигает своего минимума при давлении 2,0 МПа для всех марок угля. Оптимальными значениями давления процесса полукоксования угля 1Б, 2Б и Д являются 3,0 МПа, 2,0 МПа и 1,5 МПа соответственно. Экспериментальные зависимости

водопоглощения и прочности полукокса для каждого из углей в исследованном диапазоне давлений с хорошей точностью аппроксимируются квадратичными зависимостями.

С целью получения исходных данных для разработки конструкторской документации на промышленный реактор производства полукокса была изготовлена стендовая установка (рисунок 13), которая воспроизводит практически в натуральную величину рабочий элемент реактора. Установка представляет собой трубчатый реактор с воздушной рубашкой. В рубашку вдувается горячий воздух с температурой 600-650 °С, обогревающий стенку реактора, в котором находится угольная засыпка под давлением. Давление перед началом эксперимента нагнетается из баллона с азотом. А затем поддерживается автоматическим регулятором за счет нарастающего давления эндогенной атмосферы.

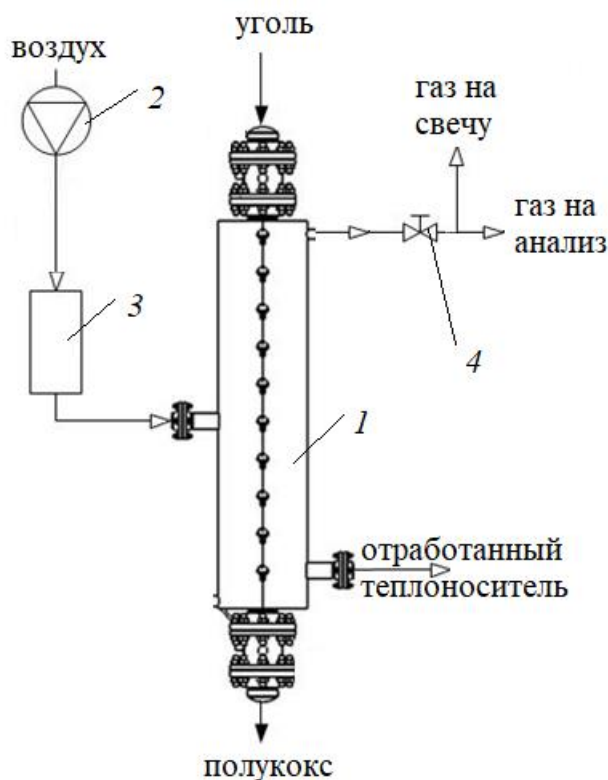


Рисунок 13 – Стендовая установка термической переработки под давлением  
1 – реактор с воздушной рубашкой, 2 – компрессор, 3 – нагреватель, 4 – регулятор давления

работы, связанные с конденсацией водяного пара в начальный момент нагрева.

Характеристики полукокса, полученных в оптимальных режимах, приведены в таблице 5.

Таким образом, в настоящем разделе выполнены экспериментальные исследования влияния управляющих параметров на количественные и качественные характеристики кускового полукокса, выполнен анализ результатов экспериментов, определены оптимальные показатели процесса полукокса энергетических углей при повышенном давлении на лабораторной установке.



Таблица 5 – Характеристики полукоксов

Параметр	Марка угля		
	1Б	2Б	Д
Температура нагрева, °С	570	570	500
Избыточное давление, МПа	3,0	2,0	1,5
Относительный выход полукокса, %	35	50	71
Технический и элементный анализ полукокса, %			
$W^r$	3,0	1,1	0,9
$A^d$	16,1	7,0	12,5
$V^{daf}$	13,5	11,9	13,8
$C^{daf}$	88,3	90,7	89,6
$H^{daf}$	2,9	5,0	3,0
$N^{daf}$	1,1	1,3	1,1
$O^{daf}$	7,2	2,8	5,8
$S^d$	0,24	0,19	0,5
Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг	26,9	31,3	28,5
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	500	500	550
Водопоглощение, %	7,0	6,0	5,1
Объем пор по воде, см <sup>3</sup> /г	0,19	0,19	0,12
Прочность M <sub>10</sub> , %	83	82	81
Удельное электросопротивление, Ом·см	40,5	41,0	40,4
Реакционная способность CRI, %	90,0	89,6	90,4

В процессе испытаний на стендовой установке подтверждены основные показатели процесса и характеристики полукокса, получены исходные данные для корректировки конструкции промышленного реактора. **Результаты этого раздела использованы при разработке конструкторской документации на промышленный реактор полукоксования угля при повышенном давлении.**

**В пятом разделе** разработан энерготехнологический процесс комбинированного получения карбонизата и тепловой энергии в плотном слое угля с разнонаправленным дутьем. Продукт предназначен для использования в качестве металлургического восстановителя и высококалорийного топлива.

В схеме аллотермического нагрева угля горячими дымовыми газами возникает необходимость сооружения отдельного генератора греющего агента. При этом теплота сгорания отработанного газа, содержащего горючие компоненты, оказывается сравнительно низкой. Как следствие, его огневое обезвреживание или утилизация невозможны без использования дополнительного топлива.

Кроме того, процесс полукоксования каменного угля в печах с внутренним обогревом за счет частичного сжигания рециркулирующих газов требует очистки получаемого в процессе горючего газа от влаги и каменноугольной смолы для возврата в слой угля взрывобезопасными компрессорами. В целом, перечисленные выше недостатки значительно

удорожают аллотермическую технологию получения карбонизата, что ограничивает сферу его использования.

На основании критического анализа известных технологий автором предложен новый технологический процесс термической переработки угля, который осуществляется в шахтном реакторе периодического действия, условно разделенном на две зоны сечением А-А. В нижней зоне реактора организуется процесс частичной газификации угля с обращенным дутьем. Генераторный газ с температурой около 600 °С поступает в сечение А-А (рисунок 14), где происходит его *частичное сжигание* за счет дополнительного воздушного дутья. При этом образуется горячая смесь дымовых газов и генераторного газа, которая далее выполняет роль греющего агента для верхней зоны реактора.

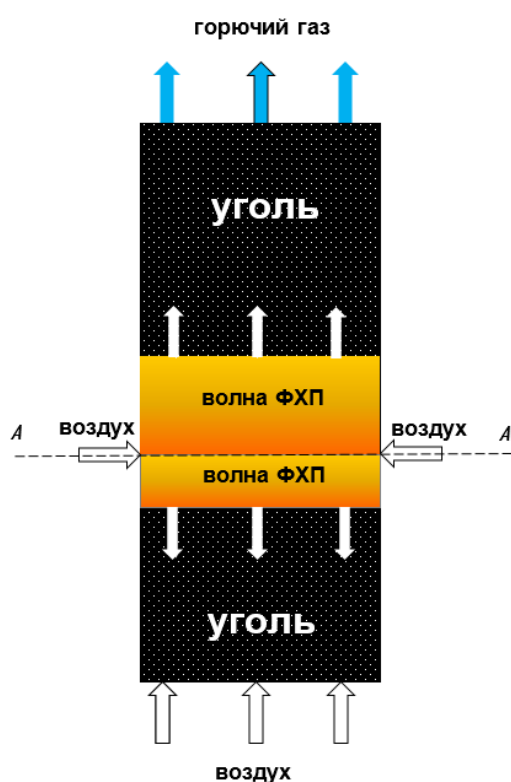


Рисунок 14 – Схема процесса термической переработки угля (волна ФХП – волна физико-химических превращений)

Для воспроизведения работы двухзонного реактора розжиг слоя угля производится в среднем сечении аппарата, и в это же сечение осуществляется контролируемая подача дополнительного воздуха. Таким образом, обеспечивается частичное сжигание генераторного газа, поступающего из нижней зоны, и подача греющего агента в верхнюю зону засыпки угля. Процесс переработки угля развивается в двух направлениях от сечения А-А.

В настоящем разделе приведены результаты исследования процесса термической переработки энергетического каменного угля в реакторе с разнонаправленным дутьем. Для исследований использовался экспериментальный стенд (рисунок 15), который представляет собой шахтный футерованный реактор циклического действия с верхней загрузкой угля. Коксовый продукт выгружается через нижний люк. Подача дутьевого воздуха осуществляется через колосниковую решетку в нижнем сечении аппарата (расходомер 2), а также в среднюю часть засыпки угля (расходомер 6). Устройство позволяет отдельно воспроизвести работу нижней зоны реактора, представленного на рисунке 14. В этом случае воздух подается только через колосниковую решетку, а из аппарата выходит генераторный газ.

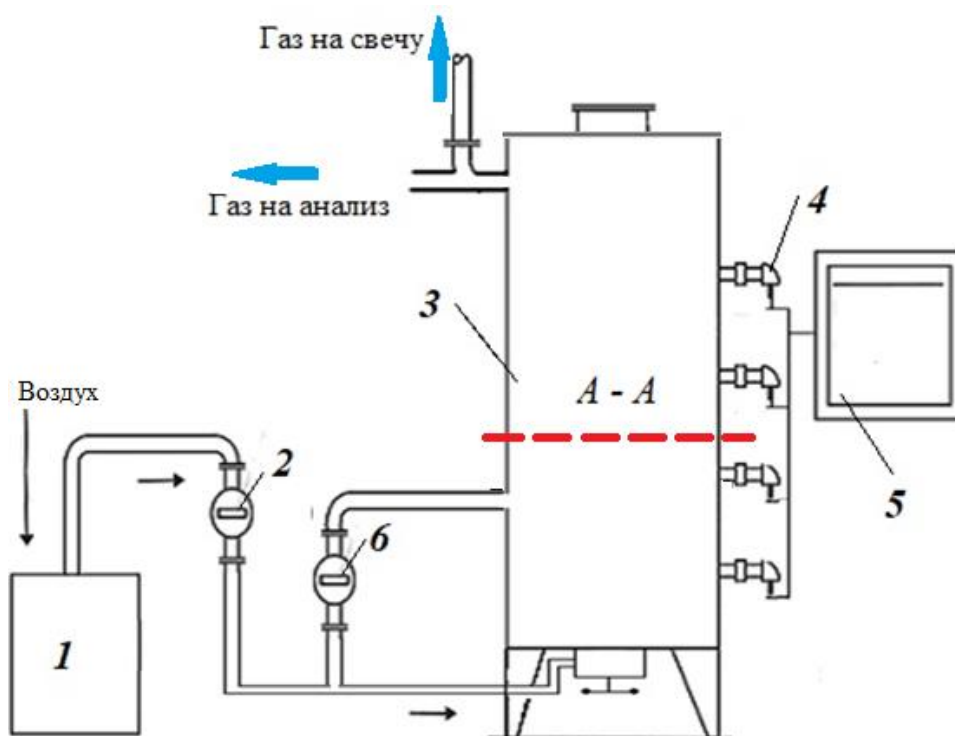


Рисунок 15 – Схема модифицированного экспериментального стенда  
 1 – компрессор, 2 – расходомер, 3 – газификатор, 4 – термопары,  
 5 – регистратор температур, 6 – дополнительный расходомер

Во всех экспериментах из выходного патрубка производился отбор газа для анализа. Для контроля температуры засыпки на оси реактора по всей высоте были равномерно расположены термопары ТХА (хромель-алюмель).

В качестве сырья использовался каменный уголь марки Д разреза «Черногорский» Республики Хакасия. На первом этапе исследований была выполнена серия экспериментов по частичной газификации кускового угля в плотном слое с обратной тепловой волной (с обращенным воздушным дутьем), которая моделирует работу нижней зоны реактора. В результате был определен расход дутьевого воздуха для обеспечения необходимой температуры обработки и соответствующего уровня остаточного выхода летучих веществ в получаемом коксе. Также определялись состав и температура горячего газа, скорость фронта физико-химических превращений, относительный выход кокса. Оптимальные характеристики процесса приведены в таблице 6.

На втором этапе исследований воспроизводилась работа двухзонного реактора. Для эффективной карбонизации верхней части засыпки необходимо обеспечить безокислительную атмосферу. Предварительным расчетом был определен расход воздушного дутья для частичного сжигания генераторного газа с целью получения требуемой температуры греющего агента. Затем эта величина уточнялась экспериментально по результатам измерения температуры газа.

Таблица 6 – Характеристики процесса частичной газификации и пиролиза

Показатели	Значение	
	Нижняя зона	Верхняя зона
Температура, °С	980-1000	980-1000
Скорость движения волны, см/ч	18,3	36,2
Технический и элементный состав кокса, %:		
$W_i^r$	0,2	0,1
$A^d$	17,6	15,0
$V^{daf}$	4,8	5,0
$C^{daf}$	95,89	94,99
$H^{daf}$	1,02	1,50
$N^{daf}$	2,10	2,10
$O^{daf}$	0,71	1,00
$S^d$	0,23	0,36
Низшая теплота сгорания кокса $Q_i^r$ , МДж/кг	27,6	28,6
Относительный выход кокса, %	50,0	60,0
Состав влажного газа, об. %		
$CO$	10,5	8,6
$H_2$	7,3	5,4
$CO_2$	11,3	10,9
$CH_4$	2,3	4,0
$N_2$	49,7	49,1
$H_2O$	18,9	22,0
Температура горючего газа на выходе из зоны, °С	550-600	70-950
Удельная теплота сгорания влажного газа, МДж/нм <sup>3</sup>	2,86	3,04

Во второй серии опытов были определены состав, температура и удельная теплота сгорания выходящего из модифицированного реактора горючего газа, скорость фронта прямой тепловой волны, относительный выход кокса и его характеристики. Показатели процесса также приведены в таблице 6. Температура газа на выходе из верхней зоны реактора в начальный момент времени составляет 70 °С за счет охлаждения на вышележащих слоях холодного угля, но по мере прогрева угольной засыпки возрастает до 950 °С.

На рисунке 16 показаны профили температур по высоте реактора по мере развития процесса в совмещенном реакторе.

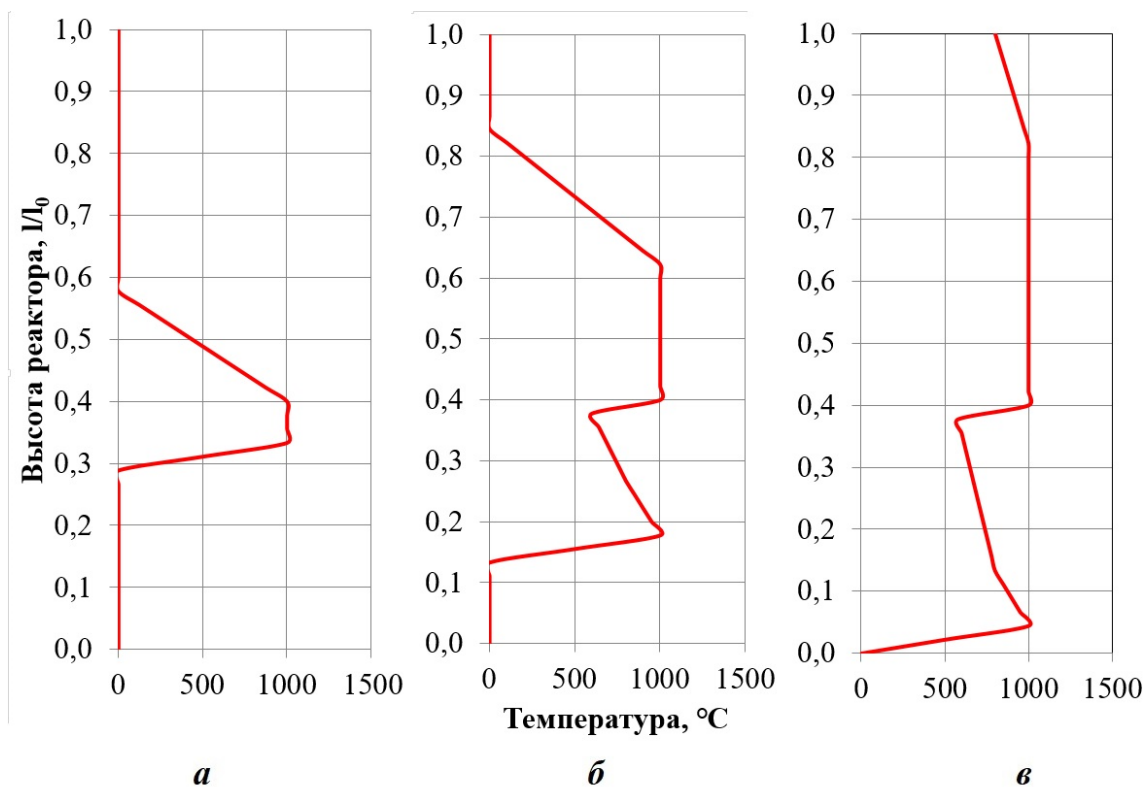


Рисунок 16 – Профили температур слоя в различных стадиях процесса  
*а) начало процесса, б) развитие процесса, в) завершение процесса*

При сжигании горючего газа, образующегося в процессе переработки угля в процессе с совмещенным дутьем удельная эмиссия углекислого газа составляет 71,3 кг/ГДж, что на 23,5 % ниже уровня образования  $\text{CO}_2$  при сжигании угля.

На основе выполненных исследований был разработан технологический процесс термической переработки энергетического угля в плотном слое с разнонаправленным дутьем. Экспериментально подтверждена возможность реализации процесса, определены необходимые параметры первичного и вторичного дутья для достижения в каждой из зон реактора необходимой температуры. Приведены характеристики получаемых энергоносителей: высокотемпературного каменноугольного кокса и горючего газа.

*Полученные результаты использованы при разработке конструкторской документации на промышленный реактор карбонизации угля в проекте промышленного предприятия по энерготехнологической переработке угля мощностью 420 тыс. т в год. Заказчик – АО «СУЭК-Хакасия»*

В шестом разделе представлены итоги внедрения разработанных технологических процессов, показатели эксплуатации промышленных агрегатов, определены направления использования получаемой продукции, а также перспективы расширения сфер её применения.

По итогам проведенных экспериментальных работ на действующем модифицированном котле КВТС-20 котельной Березовского разреза в 2015 году

были проведены режимно-наладочные работы с целью повышения технико-экономических параметров работы. Тепловой и материальный баланс процесса промышленного котлоагрегата приведен в таблице 8.

Изменение класса крупности используемого угля с 0-25 мм на 5-15 мм позволило обеспечить стабильную работу реактора кипящего слоя, увеличить производительность по термококсу, повысить суммарный энергетический КПД процесса. Последующая бесперебойная эксплуатация котла доказала правильность принятых технических решений.

Проведенная в 2016 году последующая модификация реактора кипящего слоя с перераспределением потоков первичного дутья позволила обеспечить стабильный выпуск на этой энерготехнологической установке сорбента

Таблица 7 – Показатели полученного сорбента

Наименование показателей	Значение	
	МК-А	НОК
Общая влага $W_f^r, \%$	н/об	7,2
Зольность $A^d, \%$	8,0	8,6
Выход летучих веществ $V^{daf}, \%$	5,2	5,7
Удельная поверхность по БЭТ, $m^2/g$	410	300
Суммарный объем пор по воде, $cm^3/g$	0,52	0,48
Гранулометрический состав		
+2 мм, %	6,6	0,0
1-2 мм, %	52,4	26,8
0,5-1 мм, %	31,25	36,6
0,3-0,5, %	7,6	10,9
0,2-0,3, %	1,4	5,8
0,094-0,2, %	0,45	4,6
0-0,094, %	0,3	15,3

МК-А для нефтепереработки, превышающего по своим характеристикам дорогостоящие зарубежные аналоги (НОК). Результаты эксплуатации приведены в таблицах 7-8.

В результате длительных испытаний выявлена также проблема выпадения на колпачковой решетке породы, присутствующей в угле в незначительном количестве. Содержание породы в количестве всего 0,005 % от массы поступающего в реактор кипящего слоя угля приводило к нарушению воздухораспределения и останову котла каждые 7-10 суток.

Для обеспечения вывода породы была разработана колпачковая решетка с распределенно-направленным дутьем, позволяющая выводить породу из реактора (патент РФ № 2687411). На основе исходных данных, полученных как в результате экспериментальных исследований, так и в ходе промышленной эксплуатации котлоагрегата котельной Березовского разреза была разработана проектная документация по созданию комплекса глубокой переработки угля на базе Березовского разреза Красноярского края. В 2018-2020 годах этот проект был реализован путем строительства двух новых энерготехнологических установок и капитального ремонта уже действовавшего ранее модифицированного котла КВТС-20. Годовая мощность комплекса составляет до 45 тыс. т термококса (полукокса, сорбента) и до 500 тыс. Гкал тепловой энергии. В составе

комплекса предусмотрена линия брикетирования получаемого термококса в металлургический брикет и кусковое бездымное топливо.

Таблица 8 – Результаты режимно-наладочных испытаний модифицированного котла

Основные показатели модифицированного котла КВТС-20	Производство МК-1		Производство сорбента
	До РНИ	После РНИ	
Класс крупности угля, мм	0-25	5-15	5-15
Расход угля, т/час	9,0	9,0	4,5
Температура в секции термоокислительной обработки, °С	690-740	650-700	650-690
Теплосодержание угля, МВт	39,7	39,7	19,8
Производство тепловой энергии:			
Тепловой КПД котла, %	83	83	83
Горячая вода, МВт	24,3	20,7	9,6
Расход угля на производство тепла, т/час	6,8	5,8	2,7
Удельный расход угля, тонн/МВт	0,28	0,28	0,28
Производство бурого угольного кокса:			
Выход кокса, т/час	1,3	1,8	1,0
Удельная теплота сгорания кокса, МДж/кг	28,9	29,5	29,6
Теплосодержание производимого кокса, МВт	10,4	14,8	8,2
Расход угля на производство кокса, т/час	4,7	4,8	2,4
Удельный расход угля, тонн на 1 тонну кокса	3,6	2,6	2,4
Всего полезной продукции (100%), МВт	34,7	35,4	17,9
в том числе:			
горячая вода, МВт	24,3	20,7	9,6
теплосодержание кокса, МВт	10,4	14,8	8,2
Зольность кокса на сухую массу, %	10,0	8,2	8,0
Энергетический КПД процесса в целом, %	87,5	89,3	90,0

В конце 2020 года специалистами компании ТАИФ-НК была подтверждена возможность применения сорбента МК-А в действующем производстве глубокой переработки гудрона. В 2021 году на комплексе начато производство и поставки ТАИФ-НК сорбента для опытно-промышленных испытаний взамен немецкого аналога.

Разработанный на основании результатов стендовых испытаний переработки угля под давлением технологический регламент производства кускового полукокса использован при разработке инвестиционного проекта комплекса

переработки угля ООО «Приморскуголь» мощностью 24 тыс. т в год по готовому продукту (70 тыс. т в год по углю). Получаемая тепловая энергия используется для подсушивания товарного угля марки 1Б для повышения его калорийности. Направление сбыта получаемого полукокса – близлежащие металлургические заводы Китая. Экономические показатели проекта приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Экономические показатели проекта производства полукокса

Показатель	Ед. изм.	Значение
Период расчета	лет	10
Период расчёта	мес.	120
Цена полукокса ВД, без НДС	руб./т	15 000
Общий объем инвестиций без НДС	тыс. руб.	574 622
Чистый дисконтированный доход (NPV)	тыс. руб.	379 188
Внутренняя норма доходности (IRR), в год	%	36
Модифицированная норма доходности (MIRR), в год	%	25
Индекс доходности инвестиций (PI)		2,1
Ставка дисконтирования, в год	%	13,3
Срок окупаемости инвестиций:		
– с начала инвестирования	лет	4,1
– с начала эксплуатации	лет	2,1
Дисконтированный срок окупаемости:		
– с начала инвестирования	лет	5,2
– с начала эксплуатации	лет	3,2

На основании результатов разработки процесса автотермической переработки угля в разнонаправленным дутьем разработан инвестиционный проект создания комплекса глубокой переработки угля в Республике Хакасия и утвержден Компанией СУЭК. В ходе реализации инвестпроекта на основе стендовых испытаний разработана рабочая конструкторская документация реактора карбонизации угля. Результаты исследований внедрены при проектировании комплекса. Основное направление сбыта получаемого карбонизата – металлургические предприятия Кузбасса. Получаемый карбонизат также возможно использовать в качестве бездымного топлива в городах Хакасии (Черногорск, Абакан) и близлежащих городах Красноярского края (Минусинск), выделяющихся своей экологически неблагоприятной обстановкой. Краткие экономические показатели проекта пускового модуля комплекса приведены в таблице 10.

В настоящее время на различных этапах предпроектной проработки, проектирования и строительства находятся следующие объекты на основе разработанных процессов:

- завод глубокой переработки при повышенном давлении угля Новошахтинского разреза в Приморском крае;



- энерготехнологический комплекс на базе типовых котлов БКЗ-75 и ЭЧМ-60 для параллельного производства тепловой энергии, сорбентов и бездымного бытового топлива, г. Красноярск, Красноярский край.
- энерготехнологический комплекс производства брикетированного бездымного бытового топлива и тепловой энергии мощностью до 100 тыс. т в год по брикетам, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия.
- комплекс производства сорбентов и тепловой энергии на базе типовой котельной, г. Новосибирск, Новосибирская область.

Таблица 10 – Экономические показатели проекта строительства завода

Показатель	Ед. изм.	Значение
Период расчета	лет	10
CAPEX (Общий объем инвестиций)	тыс. руб.	309 095
Годовой объем потребляемого сырья (уголь)	тыс. т/год	68,3
Годовой объем производства товарной продукции	тыс. т/год	37,6
NPV (Чистый дисконтированный доход)	тыс. руб.	663 533
IRR (Внутренняя норма доходности)	%	67,3
PI (Индекс доходности инвестиций)		3,5
Ставка дисконтирования	%	13,3
Срок окупаемости инвестиций		
– с начала инвестирования	лет	2,5
– с начала эксплуатации	лет	1,5
Дисконтированный срок окупаемости		
– с начала инвестирования	лет	2,9
– с начала эксплуатации	лет	1,9

### Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ известных способов термической переработки твердых топлив и определены требования к созданию современных экономически эффективных и экологически безопасных процессов и аппаратов.

2. Проведена оценка эффективности процесса автотермической переработки угля в кипящем слое с комбинированным производством энергоносителей, предложены и обоснованы направления развития технологии. Выполнена серия исследований с целью повышения производительности технологии «Термококк-КС». Удаление из исходного угля мелких классов и подсушивание сырья позволяют увеличить производительность процесса более, чем в 1,5 раза. Показано, что применение сухого угля позволяет снизить температурный предел стабильной работы кипящего слоя, расширить номенклатуру выпускаемой продукции и производить буроугольный полукокк с повышенным выходом летучих веществ (патент РФ № 2518624).

3. Определены параметры процесса автотермической комбинированной переработки угля в кипящем слое, влияющие на сорбционные свойства получаемой углеродной продукции. Разработана технология комбинированного производства в автотермическом кипящем слое тепловой энергии и высококачественных углеродных сорбентов для различных отраслей промышленности.

4. Исследован технологический процесс термообработки угля при повышенном давлении, определены управляющие параметры процесса. На основании полученных данных разработана промышленная технология комбинированного производства тепловой энергии и кускового полукокса из энергетического угля (патент РФ № 2725792).

5. На основе результатов исследования частичной газификации угля в процессе с обращенным дутьем разработана технология карбонизации угля в плотном слое с разнонаправленным дутьем (патент РФ № 2673052), позволяющая организовать производство кускового кокса и тепловой энергии без применения дорогостоящего и промышленно опасного компрессорного оборудования. На базе разработанной технологии спроектировано промышленное предприятие по переработке угля на шахте «Хакасская» (г. Черногорск, Республика Хакасия).

6. На основе результатов выполненных экспериментальных исследований разработать практические рекомендации по реализации энерготехнологических процессов в промышленном масштабе.

7. Обобщены результаты промышленного применения разработанных технологий, определены технико-экономические и экологические показатели работы промышленного предприятия. Внедрение результатов работы в производство обеспечивает как снижение себестоимости производства текущей продукции, так и производство новой высокомаржинальной продукции при достижении высоких показателей экологической безопасности.

8. Производство тепловой энергии в рамках разработанных технологических процессов осуществляется с существенным снижением удельной эмиссии углекислого газа и загрязняющих веществ в атмосферу, при этом углеродсодержащая продукция производится с полным отсутствием выбросов, так как все выбросы отнесены на производство тепловой энергии.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования.** За рамками данного исследования остался вопрос влияния влажности угля на сорбционные свойства получаемых в кипящем слое углеродистых материалов. Также снижение влажности исходного угля в процессе получения полукокса при повышенном давлении может способствовать интенсификации процесса полукоксования и более эффективному использованию тепловой энергии, образующейся в результате сжигания горючего газа. Особенно перспективно это направление исследований в рамках энерготехнологического использования низкомарочных углей с высоким содержанием влаги.

Получаемый в разработанных новых технологических процессах карбонизат может быть использован в качестве углеродистого восстановителя и в пылевом и в кусковом виде, мелкозернистый буроугольный кокс применяется в качестве сорбента и дополнительно окусковывается для применения в металлургии и в бытовом отоплении. Оптимизация представленных в настоящей работе процессов и разработка новых энерготехнологических угольных технологий имеют важное научно-практическое значение и позволят обеспечить возможность функционирования энергетической отрасли России на принципах экологической чистоты и ресурсосбережения.

**Автор выражает** благодарность научным работникам Гикалову С. Н., Деменчуку С. В., Черных А. П., принимавшим непосредственное участие в создании и запуске в эксплуатацию лабораторных, пилотных и опытно-промышленных установок и выполнении на них экспериментальных и режимно-наладочных работ. Автор благодарит д-ра техн. наук Исламова С. Р. за непрерывную активную поддержку в проведении исследований и помощь в работе над диссертацией.

### **Список опубликованных работ и патентов по теме диссертации**

#### **Статьи в ведущих рецензируемых изданиях:**

1. **Логинов, Д. А.** Экспериментальное исследование карбонизации бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов – Текст: непосредственный // Кокс и Химия. – 2010. – № 5. – С. 20-23.

2. **Логинов, Д. А.** Развитие комбинированной технологии переработки угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов – Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. – 2011. – № 3. – С.12-15.

3. Степанов, С. Г., Термическое обогащение угля как инструмент повышения эффективности угольного бизнеса / С. Г. Степанов, **Д. А. Логинов**, В. Н. Кочетков – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1-2. – С. 7-14.

4. **Логинов, Д. А.** Получение сорбента из низкозольного бурого угля / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов, С. Г. Степанов, В. Н. Кочетков – Текст: непосредственный // Химия твердого топлива. – 2016. – № 2. – С. 46.

5. **Логинов, Д. А.** Новые возможности технологии комбинированной переработки угля в кипящем слое / Д. А. Логинов – Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. – 2017. – № 2. – С. 40-43.

6. Степанов, С. Г. Бездымное бытовое топливо: опыт применения в Красноярске / С. Г. Степанов, И. О. Михалев, Е. М. Евтушенко, **Д. А. Логинов**, С. В. Деменчук. – Текст: непосредственный // Уголь. – 2020. – № 12 (1137). – С. 56–62.

7. **Логинов, Д. А.** Новые возможности технологии карбонизации угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Кокс и химия. – 2020. – № 11. С. – 9–11.

8. **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.

9. **Логинов, Д. А.** Термическая переработка каменного угля с высоким выходом летучих веществ / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов – Текст: непосредственный // Кокс и химия. – 2021. – № 4. – С. 13-17.

10. **Логинов, Д. А.** Повышение эффективности процесса автотермической переработки угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – 14(4). – С. 408–415.

11. **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.

#### **Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus:**

12. **Loginov, D. A.**, Fluidized Bed Carbonization of Lignite / D. A. Loginov, S. R. Islamov – Текст: непосредственный // Coke and Chemistry – 2010. – Vol. 53 – No. 5. – pp. 179–182.

13. **Loginov, D. A.**, Sorbent Production from Low\_Ash Brown Coal / D.A. Loginov, S. R. Islamov, S. G. Stepanov, V. N. Kochetkov – Текст: непосредственный // Solid Fuel Chemistry – 2016. – Vol. 50 – No. 2. – pp. 115–119.

14. **Loginov, D. A.**, New Applications of Fluidized-Bed Carbonization / D. A. Loginov, S. V. Dementchuk, S. R. Islamov – Текст: непосредственный // Coke and Chemistry – 2020. – Vol. 63 – No. 11. – pp. 519–521.

15. Stepanov S. G., Smokeless domestic fuel: krasnoyarsk experience / S.G. Stepanov, I. O. Mikhalev, E. M. Evtushenko, **D. A. Loginov**, S. V. Dementchuk – Текст: непосредственный // Ugol – 2020 – №12, pp. 56-62.

16. **Loginov, D. A.**, Thermal Processing of High-Volatile Coal / D. A. Loginov, S. R. Islamov – Текст: непосредственный // Coke and Chemistry – 2021. – Vol. 64 – No. 4. – pp. 148–152.

17. **Loginov, D. A.**, An Experimental Study of the Effect of Pressure on the Process of Brown Coal Semicoking / D. A. Loginov, A. P. Chernykh, S. R. Islamov – Текст: непосредственный // Solid Fuel Chemistry – 2021. – Vol. 55 – No. 2. – pp. 129–132.

## Патенты:

18. Патент № 2518624 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ термического обогащения угля и устройство для осуществления способа : № 20121323920 : заявл. 27.07.2012 : опубл. 10.06.2014 / Исламов С. Р., Михалев И. О., Степанов С. Г., **Логинов Д. А.**, Гикалов С. Н. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.

19. Патент № 2687411 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ получения среднетемпературного кокса : № 2018138321 : заявл. 31.10.2018 : опубл. 13.05.2019 / Исламов С. Р., **Логинов Д. А.** ; заявитель ООО «Сибниииуглеобогащение». – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.

20. Патент № 2673052 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ переработки угля и устройство для его осуществления : № 2017143099 : заявл. 11.12.2017 : опубл. 21.11.2018 / **Логинов Д. А.**, Исламов С. Р., Узких А.Ю., Гикалов С. Н. ; заявитель ООО «Сибниииуглеобогащение». – 12 с. : ил. – Текст: непосредственный.

21. Патент № 2673794 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ получения бездымного бытового топлива : № 2018112960 : заявл. 10.04.2018 : опубл. 30.11.2018 / Исламов С. Р., **Логинов Д. А.**, Михалев И. О., Черных А. П. ; заявитель АО «СУЭК». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

22. Патент № 2655175 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ получения металлургического брикета : № 2018109074 : заявл. 14.03.2018 : опубл. 24.05.2018 / Исламов С. Р., Михалев И. О., Черных А. П., **Логинов Д. А.** ; заявитель ООО «Сибниииуглеобогащение». – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

23. Патент № 2665409 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01). Способ получения металлургического среднетемпературного кокса в кипящем слое : № 2016131940 заявл. 02.08.2016 : опубл. 29.08.2019 / **Логинов Д. А.**, Исламов С. Р., Степанов С. Г. ; заявитель ООО «Сибниииуглеобогащение». – 7 с. : ил. – Текст: непосредственный.

24. Патент № 2725792 Российская Федерация, МПК С10В 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.

25. Патент № 2722557 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01) Способ переработки угля : № 2018113213 : заявл. 11.04.2018 : опубл.01.06.2020 / Степанов С. Г., Исламов С. Р., **Логинов Д. А.**, Деменчук С.В., Концевой А. А. ; заявитель Степанов С. Г. – 8 с. : ил. – Текст: непосредственный.

26. Патент № 2747049 Российская Федерация, МПК С10В 49/10 (2006.01) Способ получения бездымного бытового топлива : № 2020132449 заявл. 01.10.2020 : опубл. 23.04.2021 / Исламов С. Р., **Логинов Д. А.**, Михалев И. О., Черных А. П. ; заявитель ООО «Сибниииуглеобогащение». – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.

## Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках:

27. **Логинов, Д. А.** Экспериментальное исследование пиролиза бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов. – Текст : непосредственный // Современные техника и технологии : сборник докладов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 27-31 марта 2006 г. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2006 г. – Т. 2. – С. 377–379.

28. **Логинов, Д. А.** Экспериментальное исследование карбонизации бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Молодежь и наука : сборник материалов VI-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2011.

29. **Логинов, Д. А.** Исследование карбонизации бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Теплофизические основы энергетических технологий : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2010. – С.167–171.

30. **Логинов, Д. А.** Технология комбинированной переработки угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Инновационная энергетика 2010 : материалы второй научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск, 2010. – С.112–115.

31. **Логинов, Д. А.** Результаты исследования карбонизации угля в кипящем слое / Д.А Логинов, С. Р. Исламов – Текст : непосредственный // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2010. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2010. – С. 129–132.

32. **Логинов, Д. А.** Гравитационное обогащение при карбонизации угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Наука и современность : сборник материалов IV-й Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2010. – С. 384–388.

33. **Логинов, Д. А.** Комбинированное производство буроугольного кокса и тепловой энергии в модернизированном котельном агрегате / Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Энергетика и энергоэффективные технологии : сборник материалов IV-й Международной научно-практической конференции. – Липецк, 2010. – С. 167–171.

34. **Логинов, Д. А.** Результаты исследования полукоксования бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст : непосредственный // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник статей по итогам десятой международной научной конференции. – Казань. – 2020. – С.80.

35. **Логинов, Д. А.** Экспериментальное исследование полукоксования бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. –

Текст: непосредственный // Теория и практика современной науки: сборник статей 3-ей международной конференции. – 2020. – С. 41.

36. **Логинов, Д. А.** Исследование полукоксования бурого угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук. – Текст: непосредственный // Научно-практические исследования. – 2020. – №33. – С.13.

37. **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).

38. **Логинов, Д. А.** Термическая переработка низкзолного 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. «Интернаука». – 2021. – № 2(42).

39. **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.

40. **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.

41. **Логинов, Д. А.** 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.

42. **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.

43. **Логинов, Д. А.** Влияние влажности на процесс частичной газификации в кипящем слое «Термококс–КС» / С. В. Деменчук, Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XIV Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза, – 2021. – С. 34–36.

44. **Логинов, Д. А.** Экспериментальное исследование полукоксования угля в кипящем слое с параллельным получением тепловой энергии / С. В. Деменчук, Д. А. Логинов, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей XXVI Международной научно–практической конференции. – Пенза, – 2021. – С. 47–49.

45. **Логинов, Д. А.** Повышение эффективности процесса частичной газификации угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей Международной научно–практической конференции. – Уфа, – 2021. – С. 37–41.

46. **Логинов, Д. А.** Интенсификация процессе комбинированной переработки угля в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем: сборник статей научных статей по итогам круглого стола со всероссийским и международным участием. – Москва, – 2021. – С. 30–32.

47. **Логинов, Д. А.** Комбинированное производство тепловой энергии и полукокса в кипящем слое / Д. А. Логинов, С. В. Деменчук, С. Р. Исламов. – Текст: непосредственный // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей VIII международной научной конференции. – Волгоград, – 2021. – С. 75–79.