

Общество с ограниченной ответственностью
«Сибниииуглеобогащение»

На правах рукописи



ЧЕРНЫХ Артем Петрович

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

(Специальность 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Исламов Сергей Романович

Красноярск – 2022

Содержание

Введение	4
1 Анализ состояния работ	13
1.1. Технологии газификации угля	16
1.2. Технологии коксования угля	26
1.3. Технологии деструктивной гидрогенизации угля	31
1.4. Технологии комбинированной термической переработки угля	38
1.5. Выводы и постановка задач.....	43
2 Экспериментальное исследование процесса полукоксования энергетических углей под давлением.....	46
2.1. Описание установки	46
2.2. Описание методики	47
2.3. Определение зависимости характеристик получаемого полукокса от параметров процесса термообработки угля.....	48
3 Разработка технологического процесса переработки энергетических углей при повышенном давлении и промышленного реактора для его осуществления	80
3.1. Отработка технологических режимов.....	81
3.2. Расчет нагрева.....	89
3.3. Определение диаметра трубы реактора.....	97
3.4. Разработка промышленного реактора.....	101
4 Разработка практических рекомендаций по промышленной реализации технологического процесса переработки энергетических углей при повышенном давлении	107
4.1. Комплекс комбинированного производства кускового полукокса и тепловой энергии 107	
4.2. Оценка экономической эффективности проекта реализации промышленного комплекса комбинированного производства тепловой энергии в виде газового топлива и полукокса из угля марки 2Б под давлением	111
4.3. Оценка степени воздействия производства на окружающую среду.....	118
4.4. Оценка объема эмиссии углекислого газа в окружающую среду.....	121
Заключение	122
Список литературы.....	123
Приложение А Экспериментальное исследование процесса переработки бурого угля марки 2Б	

(АО «Разрез Березовский») под давлением.....	135
Приложение Б Экспериментальное исследование процесса переработки бурого угля марки 1Б (ООО «Приморскуголь») и каменного угля марки Д (ООО «СУЭК-Хакасия», разрез Черногорский).	150
Приложение В Расчет процесса нагрева бурого угля марки 2Б при избыточном давлении 2,0 МПа 152	
Приложение Г Акты внедрения	156

Введение

На сегодняшний день эксперты указывают на неизбежность роста мирового потребления угля, как минимум, вплоть до 2040-2050 гг., главным образом за счет Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Альтернативные источники энергии пока что не в состоянии обеспечить потребности развивающегося мира по приемлемым ценам. Однако при этом все более четкой становится тенденция к ужесточению требований к качеству угля [1].

Во-первых, уже достаточно давно признано отрицательное воздействие продуктов сгорания угля на окружающую среду и здоровье человека. Речь идет как о примесях вредных веществ, содержащихся в исходном угле (сера, фосфор, тяжелые и радиоактивные металлы и т.п.), так и о химических соединениях, которые образуются в процессе сжигания угля на электростанциях и на металлургических предприятиях (окислы серы и азота, бенз(а)пирен, диоксины, фураны и т.п.). Поэтому в рамках конкуренции из оборота будут выводиться в первую очередь «грязные» угли, содержащие вредные компоненты.

Во-вторых, угольная энергетика поступательно идет по эволюционному пути развития, который сформировался еще до экологического бума и опирается на фундаментальные основы термодинамики. Результатом этого процесса является переход на сверхкритические и ультра-сверхкритические параметры пара, что позволяет повысить КПД преобразования тепловой энергии в электрическую. В контексте современных вызовов новая энергетическая концепция получила название HELE (high efficiency + low emissions).

Энергетические компании Японии и Южной Кореи уже сегодня используют уголь с теплотой сгорания в среднем значительно выше 6000 ккал/кг (на рабочую массу), в то время как теплота сгорания добываемого в России угля в среднем не превышает 5500 ккал/кг [2]. Возможность достижения более высокой теплоты сгорания путем классического обогащения для многих углей ограничена по объективным причинам (трудная и очень трудная обогатимость). С другой стороны, в большинстве случаев повышение теплоты сгорания концентрата

автоматически означает снижение его выхода и, соответственно, увеличение выхода низкокалорийного остатка, для которого, по сути, нет сбыта даже на внутреннем рынке. Как следствие, существенно возрастает себестоимость экспортной продукции. В то же время при достаточно острой конкуренции на внешнем рынке вряд ли стоит ожидать значимого прироста цены на высококачественный уголь.

В 2019 г. в мире для производства 1,87 млрд т первичной стали использовалось более 1 млрд т металлургического угля. К 2030 г. ожидается увеличение этих объемов соответственно до 2,1 и 1,23 млрд т. Примерно 70 % потребляемого угля расходуется на вдувание в домы (технология Pulverized Coal Injection – PCI). Главные требования к углям класса PCI – высокая теплота сгорания и минимальная зольность при ограниченном содержании вредных примесей (как правило, используются угли марок СС и Т). Немаловажную роль играет и реакционная способность угля, поскольку он должен полностью сгореть в ограниченном объеме горна печи за очень короткое время. Сегодня подавляющее количество стали производится на базе доменной технологии, которая за несколько веков существования полностью исчерпала свой экономический потенциал. Более того, исторически сформированная конструкция доменной печи находится в противоречии с современными основами физической химии. Однако, несмотря на это, альтернативные технологии внедряются крайне медленно, главным образом из-за отсутствия надежного и экономически эффективного оборудования, к разработке которого обратились сравнительно недавно.

Тем не менее переход к процессам прямого восстановления железа (DRI) неизбежен и является только вопросом времени. Но и в этом сегменте сохраняются высокие требования к качеству угля – низкая влага и зола, минимальные вредные примеси (фосфор, сера и т.п.), высокая реакционная способность. Вне зависимости от выбора той или иной марки угля удельное потребление углерода на 1 т стали остается практически неизменным по причине химической стехиометрии, поэтому при любом варианте развития технологии «углеродной стали» рост ее производства будет сопровождаться ростом потребления угля.

Принимая во внимание географическую удаленность угледобывающих кластеров России от ключевых потребителей Азиатско-Тихоокеанского региона, а также непрерывно возрастающую конкуренцию, перед отечественными производителями угольной продукции все острее будет вырисовываться дилемма: везти за 3-5 тыс. км обогащенный уголь со средней теплотой сгорания 5500 ккал/кг или топливо класса HELE и PCI с теплотой сгорания около 7000 ккал/кг.

Классическое обогащение российского энергетического угля, за исключением ограниченного количества легкообогатимых углей, не в состоянии обеспечить экономически целесообразное производство высококалорийного топлива. Отдельной проблемой является утилизация отходов обогащения. К сожалению, для этой задачи пока что не просматривается экономически эффективных решений. Определенный потенциал для повышения теплоты сгорания угля заключается в снижении влаги, однако, к примеру, термическая сушка является довольно энергозатратной технологией, а самое главное препятствие для использования этой технологии заключается в том, что сушеный уголь энергетических марок обладает повышенной склонностью к самовозгоранию, а также резко возрастает взрывоопасность его пыли.

Таким образом, для повышения теплоты сгорания до 6500–7000 ккал/кг необходима более глубокая переработка угля, чем классическое обогащение. Более того, в контексте современных требований к техногенному воздействию на окружающую среду она должна иметь максимальный уровень экологической безопасности, позволяющий минимизировать затраты на очистку выбросов и утилизацию отходов.

Одним из наиболее перспективных способов обеспечить теплоту сгорания топлива на уровне около 7000 ккал/кг является глубокая термическая переработка с целью удаления влаги и значительной части летучих веществ. При этом выделяющиеся горючие компоненты необходимо использовать на месте производства для получения полезной тепловой энергии либо в самом процессе термической переработки. Когенерационный принцип обеспечивает высокую экономическую эффективность производства в целом.

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предусматривает внедрение инновационных технологий использования угля, повышение качества и расширение номенклатуры угольной продукции. Также одной из целей Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года является создание условий для повышения конкурентоспособности российских угольных компаний, в том числе за счет роста объема переработки и обогащения угля, интенсификации процессов переработки добываемого сырья. Предусмотрено создание территориальных комплексов (кластеров) по получению из угля термококса, бездымного топлива, брикетов и аналогичных продуктов с параллельным производством тепловой энергии [3 – 4].

Таким образом, в настоящий момент **актуальным** направлением является разработка и внедрение инновационных технологий термической переработки угля, обладающих высоким уровнем экологической безопасности. Достижение высоких экономических показателей в этой сфере возможно только за счет использования принципа энерготехнологического комбинирования. Интенсификация решения этой задачи позволит придать импульс развитию теплоэнергетики и смежных отраслей промышленности РФ.

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

Задачи исследования:

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 и 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 получения 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.

Научная новизна настоящей работы состоит в следующем:

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 «Сибнииуглеобогащение» 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.

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).

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 получения тепловой энергии и кускового полукокса из энергетических углей при повышенном давлении и практических рекомендаций по реализации данной технологии в промышленном масштабе.

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 аппаратурное 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.

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.

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 страниц основного текста диссертации и 23 страницы приложений, 75 рисунков и 22 таблицы. Список использованных источников включает 104 наименования.

Краткое описание структуры диссертационной 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.

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

Третья глава посвящена решению задач, связанных с аппаратурным оформлением разработанного технологического процесса.

Четвертая глава посвящена вопросам промышленной реализации результатов диссертационной работы.

1 Анализ состояния работ

Из существующих направлений термической переработки угля наибольшее распространение получили процессы газификации, пиролиза деструктивной гидрогенизации [5, 6].

Газификация – это термохимический процесс переработки твердого топлива с помощью газифицирующих агентов в смесь газов, в частности в горючие газы [7]. Газифицирующими агентами выступают кислород, или обогащенный им воздух, водяной пар, диоксид углерода либо смеси указанных веществ. Основными продуктами газификации являются синтез газ с последующей его переработкой в ценные химические продукты, включая моторные топлива, горючий газ, генераторный газ используемые в качестве топлива для энергоустановок. Генераторный газ – смесь оксида углерода с каким – либо газообразным реагентом, при условии получения в его составе горючих составляющих. В качестве воздействующих газов используется чистый кислород, кислород воздуха, водяной пар, а также смесь пара и воздуха или пара и кислорода. Для газификации используют угли с достаточно большим содержанием гетероатомов, в частности бурые и низкометаморфизированные марки каменных углей [8–10].

Пиролиз – способ переработки твердого топлива путем скоростного нагрева при атмосферном давлении и без доступа окислителя. Часть органической массы топлива преобразуется в конденсируемые углеводороды – смолы и газ пиролиза, а оставшая часть образует полукокс. В зависимости от температуры переработки различают: полукоксование (низкотемпературное) 480–600 °С, коксование (среднетемпературное) 600-900 °С и высокотемпературное коксование – выше 900 °С [11].

Полукоксование – процесс термической переработки твердого топлива (каменного угля, бурого угля и сланцев) без доступа воздуха до температур 500-600 °С. Для полукоксования используют преимущественно угли с высоким выходом летучих веществ, дающие большой выход первичной смолы. Выход первичной смолы и полукокса зависит от качества исходного сырья, конструкции

и режима печей. Большая часть летучих веществ, выделяющихся в процессе низкотемпературного пиролиза, за исключением паров свободной влаги, образуется в самых горячих областях пластического слоя. Продуктами полукоксования являются полукокс, первичная смола, пирогенетическая вода и первичный газ. Продукты полукоксования - называются первичными, так как они не претерпевают далеко идущих процессов термического разложения [12–13].

Среднетемпературное коксование проводится при температурах порядка 750 °С. Получаемый при этом процессе продукт – высокоактивный коксовый остаток (среднетемпературный кокс) является ценным сырьем широкого спектра использования [14–12]. Основным направлением применения является металлургия.

Высокотемпературное коксование или просто коксование – процесс термической переработки топлива без доступа воздуха при температуре 1000–1100 °С. Одновременно с коксом образуется парогазовая смесь, из которой выделяют ценные химические продукты: смолы, коксовый газ, бензолные углеводороды, пиридиновые основания и др. Данный вид коксования является наиболее распространенным в настоящее время процессом термической переработки угля. Суммарное потребление коксующегося угля составляет около 1 млрд т в год.

Деструктивная гидрогенизация – термическое разложение угля под давлением 20–70 МПа с применением катализаторов на основе железа, вольфрама, молибдена и др. В отличие от коксования и полукоксованиями этим методом можно практически полностью превратить органическое вещество угля в жидкие и газообразные продукты [138]. В результате гидрогенизации происходит растворение органической массы угля и насыщение ее водородом. Процесс осуществляется в две стадии, первая из которых – перевод массы угля в жидкое состояние; вторая – гидрокрекинг (парофазная гидрогенизация) с целью получения моторного топлива.

Изначально, большая часть процессов термической переработки угля была разработана на использование при атмосферном давлении. Позже, с целью

интенсификации технологического процесса, а также улучшения характеристик конечных продуктов, для указанных процессов были разработаны способы применения под избыточным давлением.

К 80-м годам в США, Великобритании, Германии, Японии, СССР и ряде других стран при государственной поддержке сотнями фирм с мировыми именами были сооружены десятки демонстрационных и пилотных установок для газификации и ожижения угля [19–25]. Однако, в середине 80-х интерес к углепереработке пошел на убыль. Динамичное развитие нефтегазовой отрасли и масштабные работы по разведке новых месторождений нефти и газа показали, что запасов углеводородного сырья на самом деле значительно больше, чем предполагалось. Также, ни одна из разрабатываемых технологий получения жидкого топлива из угля не позволила повысить рентабельность процесса в такой степени, чтобы "синтетическая нефть" могла конкурировать с природной нефтью.

В итоге интерес к переработке угля значительно снизился. Большинство программ было свернуто, а оставшиеся – радикально урезаны. Более десятка проектов было завершены на стадии 5-летней готовности, то есть при изменении конъюнктуры рынка углеводородного сырья можно в течение 5 лет на основе демонстрационных установок производительностью 10-60 т угля в час развернуть промышленное производство [21, 24].

Если от коммерческого использования технологий прямого и непрямого ожижения угля в конце 80-х годов пока отказались, то интерес к газификации и термической переработке угля хотя и уменьшился, но не прекратился. Например, в ряде регионов, где природного газа нет или мало (Северная Америка, Китай и др.), производство газа из угля для синтеза метанола и аммиака экономически оправданно и построен ряд промышленных предприятий [26–28]. В 90-е годы бурное развитие получила внутрицикловая газификация для производства электроэнергии, то есть использование бинарного цикла, при котором горючий газ утилизируется в газовой турбине, а продукты сгорания направляются на генерацию пара для паровой турбины. В ряде развитых стран при правительственной поддержке продолжают работы по производству термооблагороженных твердых

топлив. Это связано с увеличением потребления низкосортных углей и ужесточением требований по охране окружающей среды.

К настоящему времени накоплен большой опыт (положительный и отрицательный) переработки углей. Существуют десятки технологических процессов, реализованных в различное время – от пилотных установок до крупномасштабных промышленных предприятий. В большинстве случаев целевые продукты переработки угля могут замещаться альтернативными видами продукции. Поэтому объемы переработки угля определяются не технологической необходимостью, а сравнительной эффективностью производства и использования целевых продуктов.

1.1. Технологии газификации угля

На сегодняшний день основными промышленно освоенными технологиями газификации являются процессы «Lurgi» (стационарный слой), «Winkler» (кипящий слой угольных частиц), «Koppers Totzek» (пылеугольный поток), «Техасо» (водно-угольная суспензия) [29]. Характеристики промышленный газогенераторов на основе указанных процессов представлены в таблице 1.

«Lurgi». Классическим и в то же время одним из современных и технологичных является процесс газификации углей «Lurgi», которой и осуществляется на крупнейшем углеперерабатывающем предприятии «Sasol» в ЮАР. Процесс был разработан Lurgi еще в 1930_х гг. С тех пор техника и технология газификации по способу Lurgi были значительно усовершенствованы и получили ряд модификаций [30–31]. Одной из наиболее современных модификаций является проведение процесса в газификаторах «Sasol_Lurgi FBDB» (S_L FBDB, рисунок 1.). Более 75 % мировых запасов угля перерабатываются по этой технологии. Отличительные особенности технологии S_L FBDB следующие: процесс ведется в стационарном слое угля под давлением 3,0 МПа (диапазон 2,0–10,0 МПа), с противоточным вводом потока «пар + O₂» и удалением сухой золы.

Таблица 1 – Основные промышленно освоенные технологии газификации

Показатели	Газогенератор			
	Lurgi	Winkler	Koppers-Totzek	Texaco
Характеристика угля				
Тип	Все угли, кроме коксующихся	Лигниты и суббитуминозные угли	Все угли	
Размер частиц, мм	6-40	0,8-1	0,075 (70%)	0,1-10
Содержание влаги, % мас	До 30	До 12	До 8	До 40
Состояние угля в реакторе	Стационарный слой	Псевдоожиженный слой	Режим уноса	Водоугольная суспензия в режиме уноса
Рабочее давление, МПа	2,0-3,0	0,12-0,21	0,14	3,5-4,0
Максимальная температура в газогенераторе, °С	1200	1100	2000	1600
Вид дутья	Парокислородное			
Состояние золы	Сухая		Жидкий шлак	
Время пребывания угля в газогенераторе	1-3 ч	20-40 мин	0,5-10 с	1-10 с
Степень конверсии углерода, %	99	60-90	90-96	99
Максимальная единичная мощность газогенератора				
По углю, т/ч	75	42,2	35,2	6,0

По газу, тыс. м ³ /ч	140	33	55	12
Расход, т/т				
Кислорода	0,50	0,50	0,76	0,85
Пара	1,90	0,88	0,24	0,30
Объемное отношение пар/кислород	5,9	3,1	0,55	0,64
Состав сырого газа, % об.				
СО	20	30-50	55-66	55
Н ₂	39	35-46	21-32	33
СО ₂	30	13-25	7-12	11
СН ₄	10	1-1,8	0,1	0,1
С _n Н _m	0,7	-	-	-
Среднее отношение Н ₂ :СО в газе	2,0	1,0	0,5	0,5
Теплота сгорания газа (высшая), МДж/м ³	11,5	9-13	10,6-11,8	11,5
Термический КПД газогенератора, %	75-85	45-75	75-85	75

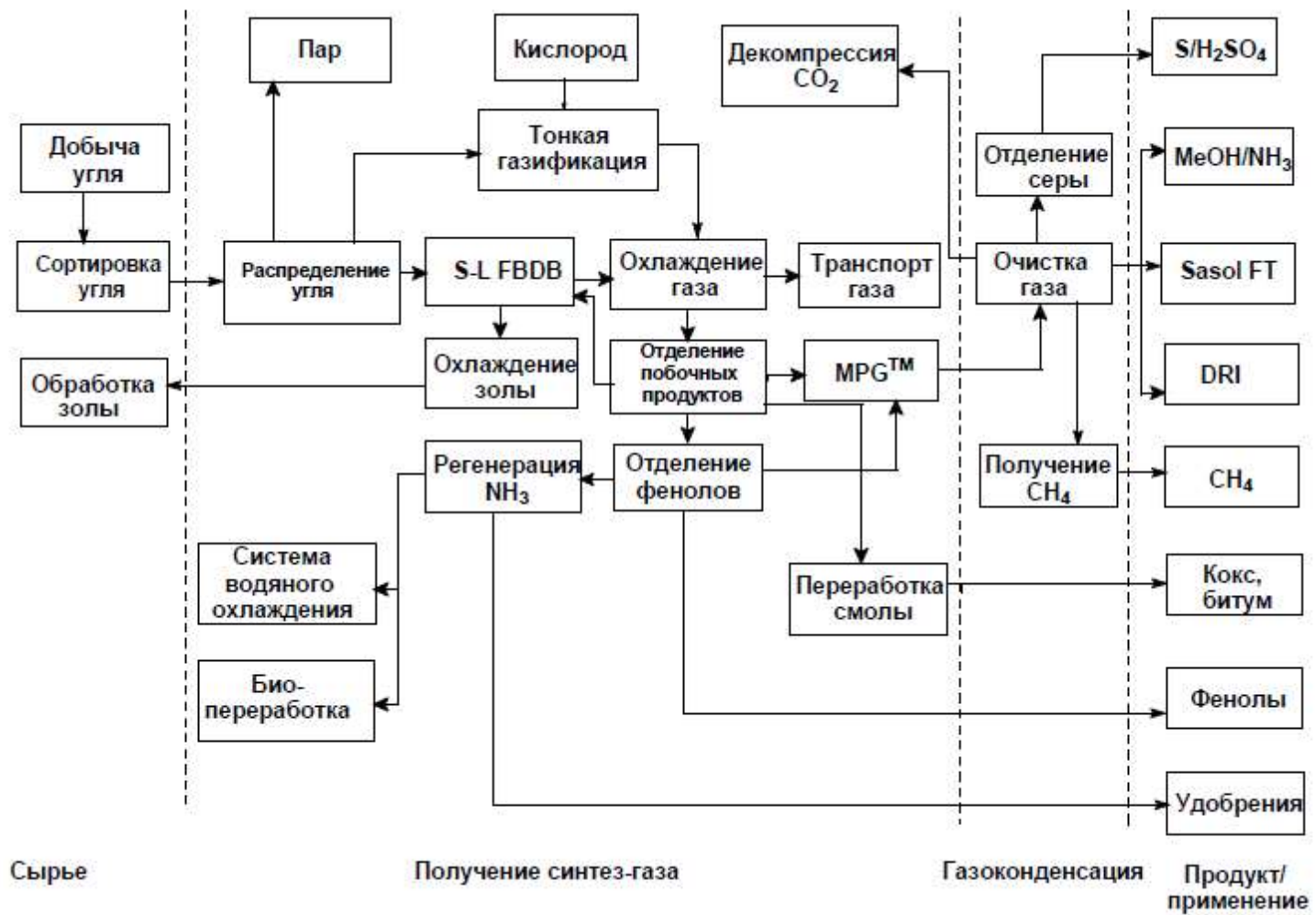


Рисунок 1 – Схема газификации угля по методу «Sasol_Lurgi FBDB»

Основные преимущества процесса S_L FBDB: стабильность и надежность; высокий КПД; низкое потребление кислорода; возможность переработки лигнита, реактивных топлив, низкосортных углей с высокой степенью зольности и влажности, удаление сухой золы. Выход газа составляет 65000–100000 нм³/ч. Состав газа: 38 % H₂, 22 % CO, 28 % CO₂, 12 % CH₄. В мире насчитывается 101 установка газификации, работающая по технологии S_L FBDB. Из них 80 установок работают в Южной Африке, 14 – в США и 7 – в Китае (таблица 2). Повышению экономической эффективности данной технологии способствует производство на предприятиях по переработке углей сопутствующих химических продуктов, таких как аммиак, фенолы, углеводороды, угольные электроды.

Таблица 2 – Предприятия, осуществляющие процесс Sasol_Lurgi FBDB

Название предприятия	Место расположения	Мощность и продукция
Sasol Synfuels	Секунда, Южная Африка	80x10 ⁶ нм ³ /сут. синтез-газа для производства СЖТ и химических продуктов
Dakota Gasification Company	Северная Дакота, США	1450×10 ⁶ нм ³ /год заменителя природного газа
Shanxi-Tianji Coal Chemical Company	КНР, провинция Лученг-Шанхай	300 тыс. т/год аммиака, 540 тыс. т/год азотной кислоты, 900 тыс. т/год нитрофосфата, 200 тыс. т/год нитрата аммония
Yima	КНР, Сити-Хенан	80000 т/год метанола

Основные недостатки процесса Лурги:

1. Необходимость использования сортированного угля — всю мелочь приходится использовать в других процессах;
2. Наряду с газификацией происходит процесс пиролиза угля, продукты которого (смолы, влага и др.) уносятся с газом, что требует более сложной системы очистки.
3. Низкая степень конверсии пара, большое количество сточных вод и высокие затраты на их очистку.

«Winkler». Метод газификации твердого топлива в кипящем слое, так называемый метод Winkler'a и его модификации, отличается от метода газификации в плотном слое тем, что в этом случае частицы топлива под действием паровоздушного или парокислородного потока совершают непрерывное движение в объеме шахты газогенератора [32–34]. Схема процесса представлена на рисунке 2.

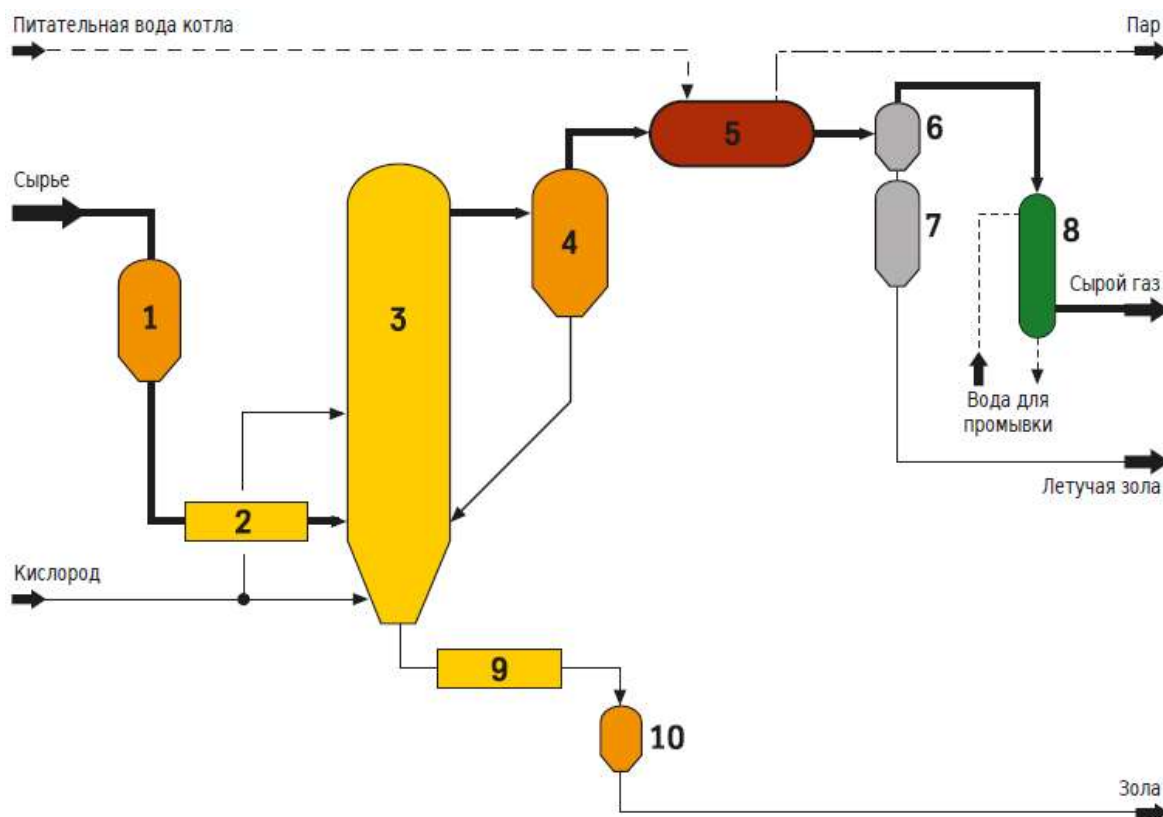


Рисунок 2 – Схема процесса газификации по «Winkler»

1 – загрузочный бункер; 2 – загрузочный шнек; 3 – газогенератор высокотемпературный по Винклеру; 4- циклонный сепаратор; 5 – котел-утилизатор; 6 – фильтр; 7 – воронка-затвор; 8 – мокрая очистка пыли; 9 – охлаждающий шнек; 10 – система воронок-затворов.

В кипящем слое достигается высокий коэффициент массообмена и теплопередачи, что обеспечивает равномерную температуру по всему газогенератору. Температура поддерживается ниже точки размягчения золы. Винтовые конвейеры или самотечные трубопроводы используются для загрузки сырья в высокотемпературный газогенератор Винклера. Из-за давления в газогенераторе, система подачи сырья, как и система выгрузки золы из куба

аппарата должны быть выполнены как воронки-затворы. Окислители – пар и кислород (или воздух) впрыскиваются в куб газогенератора (здесь они одновременно служат псевдоожижающими агентами для кипящего слоя) и подаются как в кипящий слой, так и в пространство над кипящим слоем, в так называемую зону пост-газификации для повышения качества газа и степени конверсии в результате повышения температуры. Типичные характеристики процесса газификации: давление 1,5- 30 бар, температура 700-1200 °С, степень конверсии углерода 95 %. Внешний вид установки газификации представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Установка газификации торфа на производстве аммиака в Финляндии мощностью 300 т/сутки

Преимуществами технологии являются высокая степень апробации данного метода, возможность использования относительно дешевых мелких и высокозольных углей любых марок, отсутствие побочных продуктов (смола и углеводородов).

К недостаткам следует отнести то, что часть угля, подаваемого в газогенератор, сжигается для поддержания реакции газификации; большое

содержание CO₂ в полученном горючем газе; значительный унос частиц топлива с генераторным газом.

«Koppers-Totzek». В настоящее время газогенераторы твердого топлива в пылевом потоке являются наиболее универсальными и широко распространенными в мире для выработки электрической энергии [35–37]. Различные станции, основанные на таких газогенераторах, либо уже находятся в эксплуатации, либо строятся. Схема процесса представлена на рисунке 4.

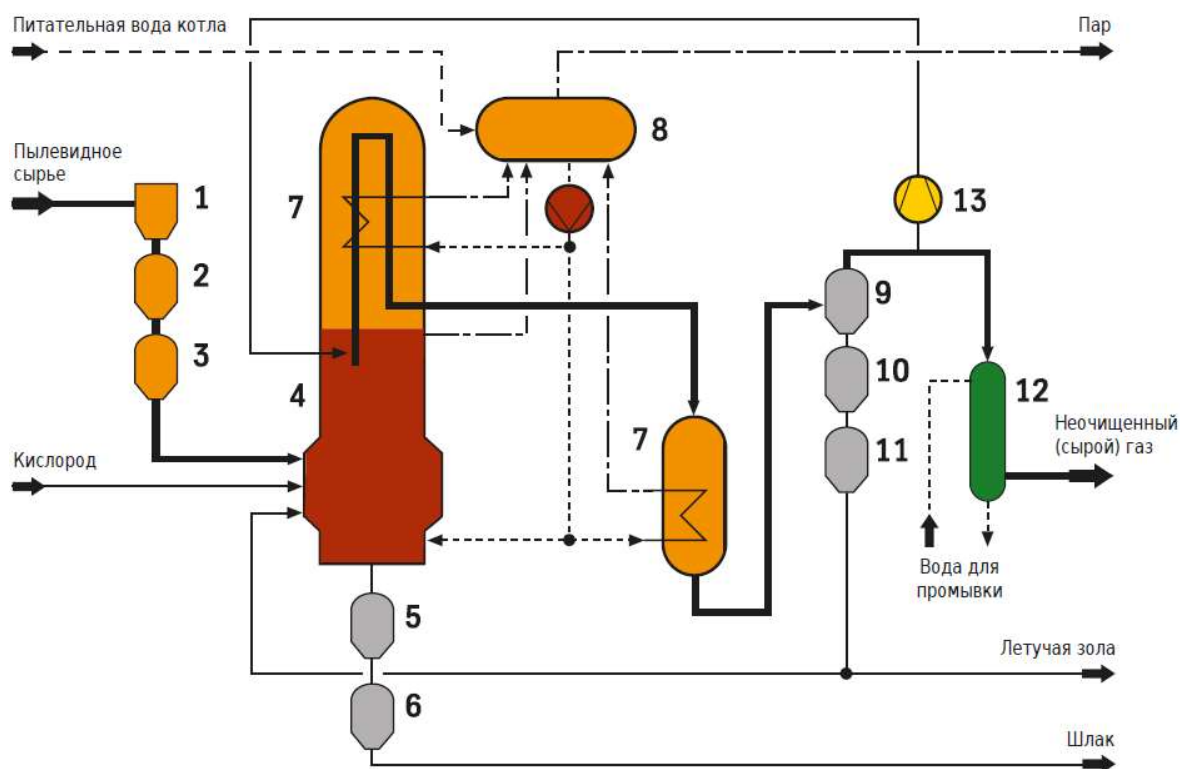


Рисунок 4 – Схема процесса газификации по «Koppers-Totzek»

1 – циклонный фильтр; 2 – воронка-затвор; 3 – загрузочный бункер; 4 – газогенератор; 5 – дробилка/коллектор шлака; 6 – воронка-затвор для шлака; 7 – котел-утилизатор; 8 – паросборник; 9 – фильтр; 10 – воронка-затвор летучей золы; 11 – загрузочный бункер для летучей золы; 12 – скруббер; 13 – компрессор закалочного газа..

Сначала загружаемое пылевидное сырье готовят в узле подготовки сырья. Примерно 80 % зольной пыли имеет размер менее 0,1 мм. Это сырье затем подвергают газификацией в газогенераторе (газификаторе) с помощью кислорода и пара в качестве газифицирующих агентов (окислителей). Температура газификации – выше температуры плавления золы, что позволяет удалять угольную золу в виде шлака.

Газогенератор охлаждаемого типа оснащен горизонтально расположенными горелками. Получаемый сырой газ содержит в основном окись углерода и водород, который охлаждают в котле-утилизаторе при генерации пара. Газ затем обеспыливают в керамическом фильтре и дальше очищают в скруббере Вентури. Шлак из газогенератора может быть использован как строительный материал, а летучая зола из керамического фильтра служит исходным материалом для цементной промышленности [38–39]. Давление процесса составляет не менее 40 бар, температура газификации не менее 2000 °С, на выходе из газификатора температура газа от 1350 °С до 1600 °С, при этом степень конверсии углерода – выше 99 %. Внешний вид демонстрационной установки представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Схема процесса газификации по «Koppers-Totzek»

В качестве основных недостатков данного способа следует отметить сложность установки, необходимость в специальном оборудовании для тонкого размола и подсушки топлива и получения кислорода, а также более высокий удельный расход кислорода по сравнению с другими парокислородными способами газификации. Типичный газогенератор «Koppers-Totzek» с двумя форсунками имеет диаметр 3–3,5 м и реакционный объем около 28 м³. Главной

проблемой, выявленной при эксплуатации этих типов газогенераторов, оказалась необходимость обеспечения непрерывной подачи измельченного твердого топлива, поскольку даже незначительные отклонения от номинального режима могут привести к образованию внутри реакционной камеры взрывоопасной концентрации газообразных продуктов.

«Техасо». Способ «Техасо» можно рассматривать как развитие и усовершенствование способа «Koppers-Totzek». Основное отличие данной технологии заключается в подаче пылевидного топлива в виде водной суспензии в струю окислителя, обогащенного кислородом [40]. Используемое топливо должно обладать важным свойством — возможностью образовывать водную суспензию. Концентрация топлива в смеси должна составлять 60–70 %. Если повысить содержание воды в водоугольной суспензии (соответственно уменьшить концентрацию топлива), то таким образом увеличится расход кислорода на газификацию, и эффективность всего процесса снизится. Процесс осуществляется при температуре 1320-1430 °С и давлении 3-4 МПа.

Технологическая схема установки большой единичной электрической мощности (250 МВт) газификации топлива в потоке по технологии «Техасо» представлена на рисунке 6 и реализована в рамках проекта ПГУ Tampa Electric на ТЭС Polk, Mulberry (Флорида, США).

К преимуществам процесса «Техасо» можно отнести: возможность использования в качестве топлива относительно дешевых мелких и высокозольных углей любых марок; отсутствие побочных продуктов (смолы, углеводороды); утилизация значительной части вторичных энергоресурсов; небольшой объем образующихся сточных вод. К недостаткам – необходимость применения систем автоматического регулирования с малым (доли секунды) временем срабатывания; значительный унос частиц топлива с генераторным газом; относительно невысокая производительность реакторов; использование в качестве газифицирующего агента кислорода.

Процесс осуществляется при атмосферном давлении. Шихта с углеподготовки загружается в печи, которые объединены в 4 батареи (по 67 печей в каждой). Батареи скомпонованы в два блока и размещаются параллельно. Батарея оборудована конвейером для подачи шихты, производительностью 1 400 т/ч, машиной загрузки-выдачи, двересъемной машиной, коксонаправляющим устройством, тушильным вагоном с локомотивом. Каждый блок батарей имеет башню мокрого тушения и рампу. Узел сортировки кокса на предприятии один. Вверху каждой батареи размещаются котлы с трубами для аварийного сбрасывания продуктов горения в атмосферу. Печи работают под разрежением, и поэтому выбросы в процессе коксования отсутствуют. Образующийся газ с температурой порядка 1 000 °С направляются в котел-утилизатор, и после отдачи тепла, очищается от сероводорода. Котлы входят в состав электростанции, рядом с которой располагается узел очистки продуктов горения.

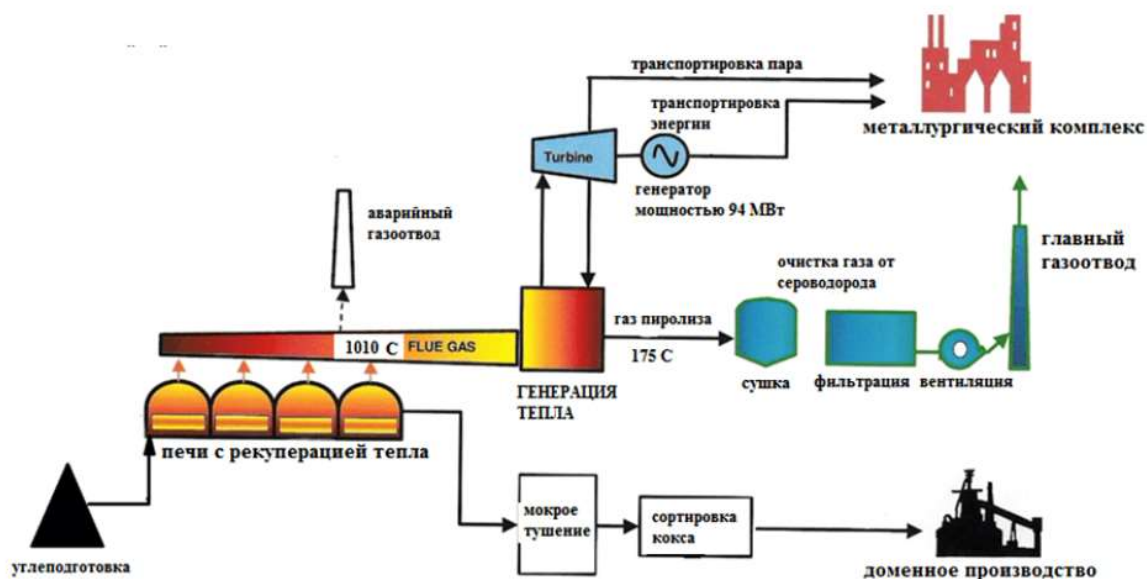


Рисунок 7 – Схема процесса получения кокса по технологии «Indiana Harbor Coke Company LTD»

По данной технологии работает одноименное предприятие производительностью 1,2 млн т кокса в год и 94 МВт электроэнергии в США.

Основной недостаток - утечка из коксовых печей и чрезмерный сброс горячих коксовых газов непосредственно в атмосферу, что приводит к избыточным выбросам SO_2 , твердых частиц и свинца из коксовых печей предприятия и байпасных вентиляционных труб в нарушение применимых разрешенных ограничений [43].

«**Shanxi Sinochem Wonder Industries Company LTD**». Китай, как известно, является наибольшим производителем кокса в мире. Для получения кокса в Китае достаточно широко используется технология коксования без улавливания химических продуктов [44]. Перед коксованием уголь трамбуют, для чего слои угля распределяют в формы для трамбования. Глубина слоя угля в форме для трамбования не должна превышать 1100 мм. Уголь в пресс-форме трамбуется до размеров примерно 1265x3300x1050 мм. Его плотность при этом составляет 1,1 г/см³.

Процесс осуществляется при атмосферном давлении. Угольный пирог подается в специальную форму (трубу), которая транспортируется до машинной стороны печи. После выдачи кокса, двери с коксовой стороны закрываются, и форма вместе с угольным пирогом подается в печь. Как только форма займет необходимое положение, коксовыталкиватель прижимает торцевую сторону пирога и форма отходит назад, а пирог остается на поде печи. После этого коксовыталкиватель закрывает двери с машинной стороны.

Производительность предприятия составляет 1,33 млн т кокса в год и 60 МВт электроэнергии.

Недостатком данной технологии является низкую экологическую безопасность производства, а также возможность организации рентабельного производства только крупномасштабного проекта.

«**SJ**». Завод полукоксования углей (провинция Шаньси) успешно применяет вертикальные печи типа SJ с внутренним обогревом. В результате термической переработки каменных углей производят полукокс достаточно высокого качества, который используется при производствах ферросилиция, ферромарганца и карбида кальция, а также при производстве фосфора [45].

Печь SJ представляет собой установку вертикального типа, состоящую из четырех камер. В качестве сырья для переработки применяется уголь крупностью 20-80 мм. Загрузка угля осуществляется сверху, периодически, синхронно связана с выгрузкой полукокса. Газ для нагрева загрузки вдувается через фурмы, установленные в стенах печи. При сгорании и частичном сжигании выделяющихся при нагреве летучих компонентов угля, образующихся внутри печи, газ равномерно нагревает загрузку угля. Камеру можно условно разделить на три зоны: в верхней происходит подсушка угля, в средней – непосредственно полукоксование; в нижней – охлаждение и выгрузка полукокса. В зоне полукоксования достигается температура 750 ± 20 °С, в зоне охлаждения - не ниже 80-100 °С. Процесс осуществляется при атмосферном давлении.

К преимуществам переработки углей в вертикальных печах типа SJ относятся: компактность установки; высокая производительность; простота в обслуживании и лёгкость управления процессом; высокое качество полукокса как углеродистого восстановителя [46].

К недостаткам можно отнести низкую экологическую безопасность производства, возможность переработки только каменных углей и только крупностью более 20 мм.

«Li-Max». В процессе термообработки по технологии LiMaxTM удается полностью удалить влагу из низкосортного угля, в результате этого получается сушеный уголь с развитой пористой структурой. Процесс осуществляется при атмосферном давлении. Летучие вещества, выделяющиеся во время пиролиза, испаряются и используются в качестве топлива для выработки тепла и электроэнергии. Одновременно происходит так называемый процесс гравитационного сжатия, подобный тому, что происходит при естественном формировании угля в земле, в результате чего пористость угля уменьшается, поры закрываются. По окончании обработки сырья в аппарате высокого давления смолы и другие соединения, находящиеся в угле, создают прочную структуру, предотвращающую уголь от повторного расширения.

После охлаждения материал становится более прочным и приобретает высокие гидрофобные характеристики. Единственными управляющими параметрами являются температура и скорость подачи угля. Технология является достаточно гибкой: из одного типа угля может производиться твердое топливо с широким диапазоном параметров.

Данная технология характеризуется низкими капитальными и эксплуатационными затратами. В Китае реализовано производство мощностью 1 млн т в год. На рисунке 8 представлена принципиальная схема технологии полукоксования низкосортных углей LiMax™ [47–48].

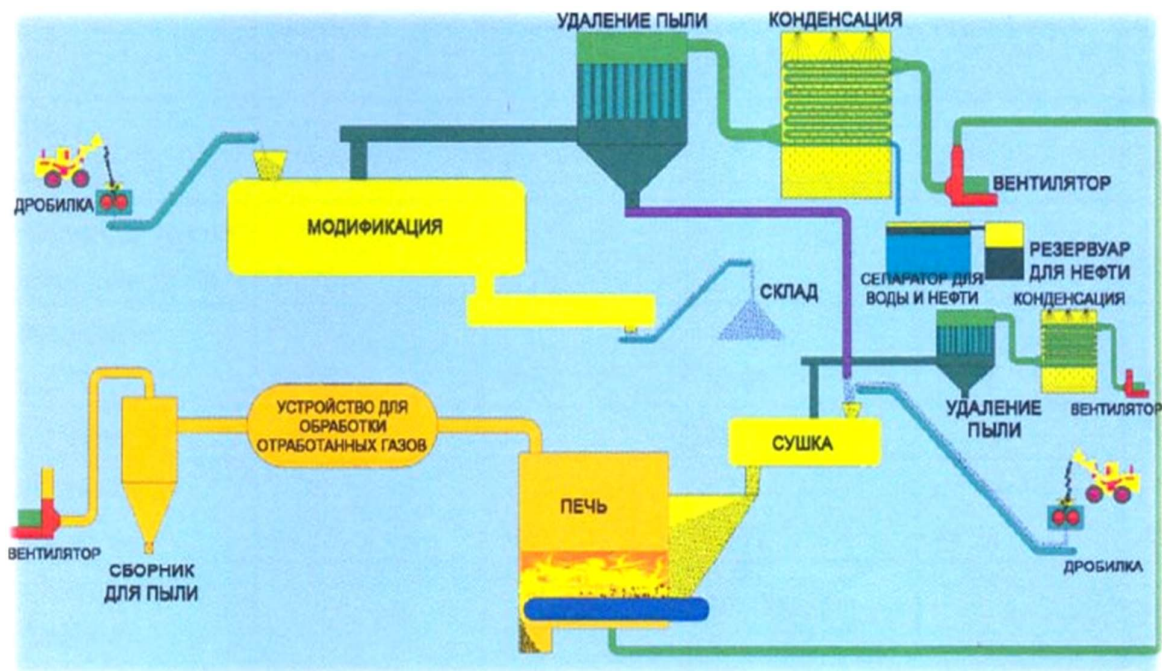


Рисунок 8 – Принципиальная схема процесса переработки углей LiMax™

Высококалорийное топливо не является единственным продуктом переработки, также попутно производится горючий газ и электроэнергия. Преимуществами технологии являются низкие капитальные и эксплуатационные затраты, производство гидрофобного и транспортабельного топлива, возможность производства продуктов карбонизации с широким спектром характеристик, попутное производство электроэнергии. Как и у большинства технологий Китая,

основным недостатком является низкая экологическая безопасность производства [49].

1.3. Технологии деструктивной гидрогенизации угля

Гидрогенизация – хорошо известная технология, позволяющая производить из угля жидкое топливо и химические продукты. Теоретические основы воздействия водорода на органические соединения под давлением были разработаны в начале XX в. академиком В. Н. Ипатьевым. Первые широкие исследования по применению гидрогенизационных процессов к переработке угля были проведены немецкими учеными в 1910–1920-х гг. В период 1920–1940-х гг. в Германии был создан ряд промышленных предприятий на базе этой технологии. В 1930–1950-е гг. опытные и промышленные установки по прямому ожижению угля методом гидрогенизации были сооружены в СССР, Англии, США и некоторых других странах [50].

В связи с разразившимся в 70–80-х гг. в мире энергетическим кризисом в США, Германии, Японии, России, Австралии, Канаде, Китае, Великобритании было разработано в общей сложности около 60 технологических схем, в том числе 30 вариантов процессов с применением метода гидрогенизации для переработки угля в продукты топливного и химического назначения [51]. Наиболее усиленно эта технология применялась в ЮАР (Компания Safsol), рост цен на нефть способствовали возобновлению интереса к технологиям ожижения в богатых углем странах [52].

Существует несколько направлений переработки углей с целью производства из продуктов переработки синтетических жидких топлив. На сегодняшний день наиболее изученные технологии получения синтетического жидкого топлива (далее – СЖТ) из угольного сырья основаны на двух процессах:

1. прямое ожижение, или гидрогенизация, – процесс превращения органической массы угля под воздействием давления водорода (до 300 бар) в жидкие и газообразные продукты в присутствии катализатора в среде

растворителя при температуре до 500 °С, с последующим гидрооблагораживанием полученных жидких продуктов;

2. косвенное ожижение, состоящее из стадии газификации угля, – для получения синтез-газа с последующим каталитическим синтезом углеводородов.

Наиболее предпочтительным для получения жидких продуктов из угля является метод прямой гидрогенизации. Процесс протекает при воздействии на уголь молекулярного водорода под давлением, при повышенной температуре с использованием жидких продуктов (пастообразователей и катализаторов). При гидрогенизации происходит деструкция угольных веществ и насыщение (гидрирование) их водородом с получением смеси жидких продуктов, фракционный и химический состав которых аналогичен природной нефти, за исключением повышенного содержания ароматических углеводородов и гетероатомных соединений. В результате процесса около 90 % угля превращается в жидкие продукты и газ, причем высококипящие фракции (выше 300–350 °С)

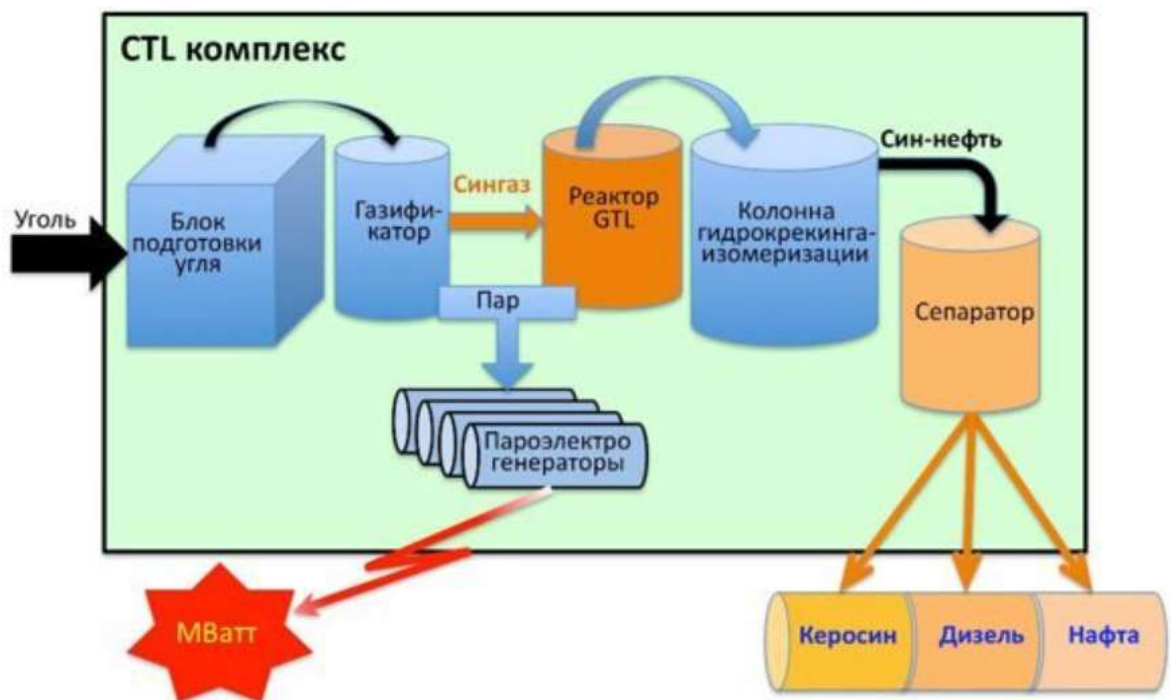


Рисунок 9 – Принципиальная схема производства СЖТ

Таблица 3 – Предприятия, производящие СЖТ из угля

Завод	Разработчик	Местоположение	Тип	Продукты	Начало работы
Sasol Synfuels II (Запад) и Sasol Synfuels III (Восток)	Sasol (Pty) Ltd.	Секунда, Южная Африка	CTL	160 000 баррелей в сутки; первичные продукты бензин и легкие олефины (алкены)	1977 (II) / 1983 (III)
Завод прямого ожижения угля Shenhua	Shenhua Group	Эрдос, Внутренняя Монголия, Китай	CTL (прямое ожижение)	20 000 баррелей в сутки; основные продукты дизельное топливо, сжиженный нефтяной газ, нефтя	2008
Завод Yitai CTL	Yitai Coal Oil Manufacturing Co., Ltd.	Ордос, Чжунджер, Китай	CTL	160 000 т / год СЖТ	2009
Завод Jincheng MTG	Jincheng Anthracite Mining Co., Ltd.	Цзиньчэн, Китай	CTL	300 000 т / год метанола из процесса MTG	2009
Sasol Synfuels	Sasol (Pty) Ltd .	Секунда, Южная Африка	CTL	3 960 000 (нм ³ / сут) производительность синтез-газа; СЖТ	2011
Завод CTL в Шаньси Луань	Shanxi Lu'an Co. Ltd.	Луань, Китай	CTL	160 000 т / год СЖТ	2014

Завод ICM по производству угля и жидкостей	ООО «Индустриальная корпорация Монголии» (ICM)	Тугруг Нуур, Монголия	CTL	Производительность 13 200 000 (нм ³ / сут) синтез-газа; бензин	2015
Завод Yitai Yili CTL	Yitai Yili Energy Co.	Yili, China	CTL	30 000 баррелей в сутки СЖТ	2015
Фаза II завода CTL Yitai Ordos	Yitai	Ordos, Zhungeer-Dalu, China	CTL	46 000 баррелей в сутки СЖТ	2016
Завод Yitai Ürümqi CTL	Yitai	Гуаньцюаньбао, Урунчи, Китай	CTL	46 000 баррелей в сутки СЖТ	2016
Проект CTL Shenhua Ningxia	Shenhua Group Corporation Ltd	Китай, Иньчуань, Нинся	CTL	4 миллиона тонн дизельного топлива и нефти в год	2016
Проект Celanese Coal / Ethanol	Celanese Corporation - Совместное предприятие PT Pertamina	Индонезия, Калимантан или Суматра	CTL	1,1 миллиона тонн угля в год для производства этанола	2016
Clean Carbon Industries	Clean Carbon Industries	Мозамбик, Тет е провинция	Преобразование угольных отходов в жидкие	65000 баррелей в сутки топлива	2020

рециркулируют в процессе, а конечным продуктом является дистиллят с температурой кипения до 300–350 °С (т.е. смесь сырого бензина, керосина, дизельного топлива), выход которого составляет 60–65 % органической массы угля [53–54].

Для ожижения применяют каменные угли низких рангов метаморфизма и бурые угли с содержанием 65–86 % массы углерода [55].

В таблице 3 приведены существующие на сегодняшний день заводы по производству СЖТ из угля.

«**Synfuels China CTL**». На рисунке 9 представлена принципиальная схема получения синтетических жидких топлив. На сегодняшний день наибольшее распространение получила Китайская технология «Synfuels China CTL».

Коммерчески успешный демонстрационный проект прямого ожижения угля (DCL) для работы как с улавливанием и хранением углерода (CCS), так и без них, был построен в 2009 году компанией Shenhua в Ордосе (Внутренняя Монголия) [56]. Указанное предприятие может производить почти 1 миллион тонн нефтепродуктов в год [57]. На рисунке 10 представлена принципиальная схема производства СЖТ.

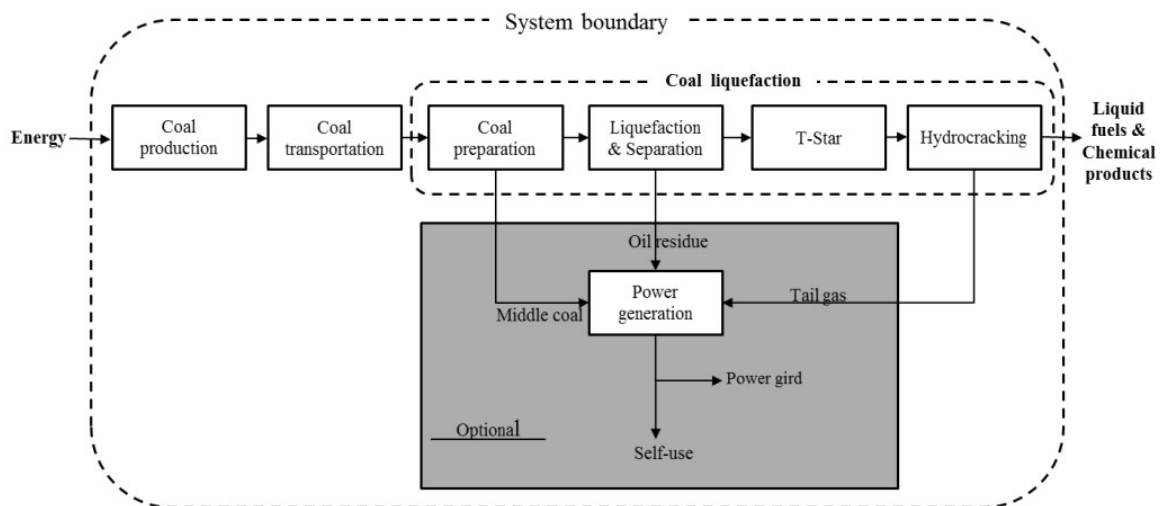


Рисунок 10 – Принципиальная схема производства СЖТ на предприятии Shenhua

Данный проект учитывает все стадии от добычи угля до получения СЖТ, включая улавливание углекислого газа после сжигания топлива, транспортировки

и захоронению в глубоких подземных соленых водоносных горизонтах [58]. Основные и побочные продукты, получаемые по данной технологии, представлены в таблице 4. Процесс ожижения производится в реакторе с кипящим слоем под давлением 20-50 бар [59].

Таблица 4 – Количество основных и побочных продуктов технологического процесса «Shenhua DCL» в расчете на 10 тыс. т.

Наименование	Единица измерения	Количество
Дизель	т	6 674
Бензин	т	1 618
Сжиженный газ	т	176
Электроэнергия	т	276
Нафта	т	966
Бензол	т	188
Ксилол	т	344
Фенол	т	34

По этой же технологии построены заводы компаниями Yitai Group и Lu'an Group (рисунки 11–12).



Рисунок 11 – Завод ожижения угля Yitai Group



Рисунок 12 – Завод ожижения угля Lu'an Group

Несмотря на все положительные моменты, данная технология обладает одним существенным недостатком – низкой экономической эффективностью. Хотя проекты и являются коммерчески успешными, согласно выполненным расчетам, любая из современных угольных, нефтяных, газовых, гидро- и атомных электростанция являются более выгодными [60–63].

Ignite «Cat-HTR». Австралийская компания Licella разработала технологию для переработки бурого угля и биомассы, основной частью которой является каталитический гидротермальный реактор (Cat-HTR). Компания имеет три отдельных подразделения: Ignite Resources Pty. Ltd. (переработка угля и лигнина), Licella Pty. Ltd. (переработка биомассы) и Gippsland Gas Pty. Ltd. (переработка природного газа).

Демонстрационный завод, построенный по данной технологии, расположен в Сомерсби в Новом Южном Уэльсе и способен перерабатывать до 20 тыс. т/год угля в СЖТ. Технологический процесс получения СЖТ включает изготовление суспензии из любой органики, обработку этой суспензии в реакторном устройстве при температуре от 200 °С до 450 °С и давлении от 100 до 350 бар, охлаждение суспензии и сброс давления. В результате получается так называемая бионефть, имеющая высокое удельное энергосодержание, пригодная для хранения, перекачивания и дальнейшей переработки в биотопливо и биохимические продукты. Внешний вид установки представлен на рисунке 12.



Рисунок 13 – Демонстрационная установка Ignite «Cat-HTR»

Недостатком данной технологии является высокое давление процесса, что приводит к большим капитальным затратам. На сегодняшний день компания практически не использует уголь и лигнин, а сосредоточила усилия на направлении переработки биомассы и пластика.

1.4. Технологии комбинированной термической переработки угля

«ТЕРМОКОКС». Концепция, объединяющая процессы серии ТЕРМОКОКС-КС и ТЕРМОКОКС-С, остается на сегодняшний день одной из самых перспективных в плане переработки бурых углей в буроугольный полукокс [64]. Суть концепции состоит в разделении углей с высоким выходом летучих веществ на два продукта – газовое топливо и коксовый остаток (полукокс) [65]. В зависимости от выбора процесса для переработки угля и рабочих параметров основным продуктом термообработки угольного сырья может являться полукокс или горючий газ [66-75].

На рисунке 14 представлена принципиальная схема энерготехнологической концепции ТЕРМОКОКС [76].



Рисунок 14 – Принципиальная схема энерготехнологической концепции
ТЕРМОКОКС

Для реализации возможностей данной концепции необходимо лишь угольное сырье и окислитель, в данном случае воздух.

«**ТЕРМОКОКС-КС**». В данном процессе происходит частичная газификация угля с применением технологии кипящего слоя. Продуктами переработки угля являются полукокс и тепловая энергия. На рисунке 15 приведена принципиальная схема процесса ТЕРМОКОКС-КС[72–73].

В режиме карбонизации уголь перерабатывается в газовое топливо и высокорекреакционный коксовый остаток. Газовое топливо и небольшое количество пылевого уноса из кипящего слоя дожигаются в надслоевом пространстве топочного объёма за счёт вторичного дутья[77].

Данный технологический процесс обладает несомненными преимуществами, качественно выделяющими его как в линейке процессов серии ТЕРМОКОКС, так и среди других процессов – это экологичность и высокая производительность. Полукокс, полученный в результате переработки обладает также высокой теплотой сгорания 27,2-29,3 МДж/кг (6500-7000 ккал/кг). Однако в данном процессе пригодно для переработки только мелкозернистое угольное сырье. Для расширения

области применения полученного полукокса требуется применение стадии брикетирования для его формирования в брикеты.

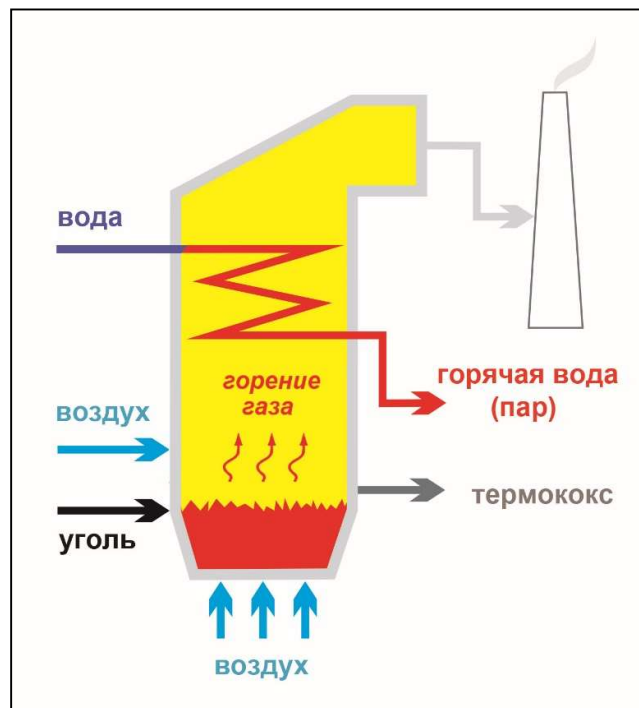


Рисунок 15 – Принципиальная схема процесса карбонизации угля в псевдоожиженном слое ТЕРМОКОКС-КС

«ТЕРМОКОКС-С». Компанией «Сибтермо» была разработана автотермическая технология среднетемпературного коксования угля в неподвижном слое (технология «ТЕРМОКОКС-С») [78–80], в основе которой лежит слоевая газификация с обращенным дутьем. Основное отличие данной технологии 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.) [81–83]. Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 16.

В рамках технологии «ТЕРМОКОКС-С» в зависимости от задаваемых условий возможно производство двух полезных продуктов: газообразного энергоносителя и среднетемпературного кокса. В случае работы газификатора в режиме, направленном на максимальное производство кокса, побочным продуктом

является газообразный энергоноситель, сжигание которого гораздо предпочтительней с точки зрения экологии, чем сжигание исходного угля. Однако возможен вариант и полной газификации угля. При работе теплотехнологической установки в режиме, направленном на преобразование угля в газообразный энергоноситель (горючий газ), производимый газ не содержит продуктов термического разложения угля: сажи, смолистых веществ, канцерогенов, фенолов и других токсичных веществ. Вследствие низкой скорости фильтрации нет выноса летучей золы из слоя, поскольку аппарат работает как зернистый фильтр. Горючий газ без очистки может быть использован для сжигания в газовых котлах, газопоршневых машинах с целью производства тепловой и/или электрической энергии. Содержание твёрдых примесей, оксидов серы и азота в дымовых газах ниже, чем при сжигании эквивалентного по теплосодержанию количества угля.

По сравнению со схемой слоевой газификации с прямым дутьём в схеме с обращённым дутьём скорость волны ФХП и, соответственно, производительность газификатора при прочих равных условиях оказывается существенно (на порядок) более низкой [84–85]. Именно это обстоятельство практически свело к нулю интерес к использованию обращённого дутья в первой половине XX века, когда технологии переработки угля развивались наиболее бурно. Среди недостатков процесса «ТЕРМОКОКС-С» следует отметить и характерные для всех методов слоевой газификации угля ограничения на размер частиц засыпки, связанные с сопротивлением слоя засыпки газовому потоку.

Первое промышленное предприятие для производства буроугольного кокса и энергетического газа на основе этого процесса было построено компанией «Сибтермо» в 1996 году в г. Красноярске. Это – завод активированных углей ЗАО «Сорбентуголь» мощностью около 40 тыс. тонн угля в год (с 2000 года – ЗАО «Карбоника-Ф») [74–75]. Получаемый на предприятии ЗАО «Карбоника-Ф» кокс отличается высокой реакционной способностью, достаточной для его применения в качестве углеродистого восстановителя в электротермических процессах при производстве ферросплавов, карбида кальция, фосфора. Также он может быть использован как бездымное бытовое топливо, сорбент, углеродистый

восстановитель и т.п. В 2008 году сдан в эксплуатацию завод по производству бытовых топливных брикетов из среднетемпературного кокса в Монголии; кроме того, на основе процесса «ТЕРМОКОКС-С» работают небольшие установки для сушки зерна в Красноярском крае.



Рисунок 16 – Схема процесса «ТЕРМОКОКС-С»

Технология частичной газификации угля в слоевых аппаратах ТЕРМОКОКС–С с получением ценных углеродных материалов из молодых углей предельно проста по аппаратному исполнению, надежна в эксплуатации. Попутный газ не содержит органических продуктов пиролиза. Технология по существу безотходна, поскольку единственным выбросом в окружающую среду являются продукты сгорания попутного газа энергетического назначения. Однако, как и любая другая технология, она имеет свою ограниченную сферу применения, где достигается максимальный эффект от ее использования. Использование слоевой технологии со стационарным слоем угля, безусловно оправдано для

варианта получения коксового ореха. Этот вариант обеспечивает минимальный выход мелочи по сравнению с любыми другими технологиями, допускающими активное перемещение твердой фазы и, соответственно, измельчение кокса, обладающего относительно невысокой прочностью. Однако при использовании бурого угля, более молодого по сравнению с длиннопламенным углем, в процессе его термической обработки происходит неизбежное измельчение исходной фракции до калибра коксовой мелочи даже в условиях аппарата с неподвижным слоем угля. В этом случае для повышения потребительской стоимости продукции требуется введение стадии брикетирования буроугольного кокса.

Технология ТЕРМОКОКС–O₂ является результатом последовательного развития технологии ТЕРМОКОКС–С и заключается в частичной газификации малозольного угля (допускается использование углей марки 2Б, 3Б и Д) в слоевых реакторах с использованием обращенного кислородного дутья для одновременного производства синтез-газа и среднетемпературного кокса [86]. Такое решение обеспечивает возможность радикального снижения себестоимости синтез-газа. В отличие от классических слоевых газификаторов типа LURGI на парокислородном дутье, в данной технологии органические продукты термического разложения угля подвергаются газификации внутри аппарата. Как следствие, продуктовый газ не содержит смолистых веществ. Поэтому при переработке синтез-газа не образуются отходы в виде фенолов, бензпирена и прочих высокотоксичных веществ. Соответственно из технологической схемы исключаются установки для отмывки газа от смолистых веществ, а также для их последующей утилизации. Однако главный экономический эффект в новой технологии достигается за счет комбинирования двух технологических процессов в едином аппаратном комплексе – производство синтез-газа и среднетемпературного кокса.

1.5. Выводы и постановка задач

На основе выполненного аналитического обзора реализованных зарубежных и отечественных разработок в сфере термической переработки угля следует, что 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 разработки технологии одновременного получения кусковой углеродной продукции и газового топлива из бурых углей. [87–88]. Основным недостатком существующих технологий получения 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 [89].

В то же время ввиду неограниченных запасов бурого угля возможности по его добыче ограничены, по большому счету, только возможностями сбыта – из-за низкой теплоты сгорания и, как следствие, низкой стоимости, транспортировка на дальние расстояния нерентабельна, что делает бурые угли перспективным сырьем для термической переработки. Использование углеродистого восстановителя в металлургии с содержанием остаточных летучих веществ в диапазоне до 15 % сопровождается снижением склонности колошникового слоя шихты к спеканию и, как следствие, повышением его газопроницаемости и снижением удельного расхода электроэнергии [90]. Его применение в составе шихты улучшает механические свойства верхнего колошникового слоя шихтовой композиции, разрыхляя его в результате выделения из восстановителя летучих веществ в диапазоне температур слипания размягчаемых частиц рудного сырья. Прочность полукокса при атмосферном давлении вследствие интенсивного возникновения трещин в угольных частицах при быстром нагреве сильно зависит от скорости нагрева. При этом под воздействием внешнего давления среды угольная матрица, размягченная за счет нагрева угля, сжимается уменьшая количество возникающих трещин и увеличивая механическую прочность даже при большой скорости нагрева [91].

Таким образом, можно сделать вывод, что посредством термической переработки энергетических углей под давлением возможно получить кусковой продукт, обладающий механической прочностью, сопоставимой с прочностью

исходного угля, повышенной низшей теплотой сгорания, сниженным водопоглощением, высокой реакционной способностью и большим удельным электросопротивлением. При этом, помимо полукокса, производится второй продукт – горючий газ, используемый для производства тепловой энергии (горячей воды или пара).

На основе вышеизложенного обзора технологий переработки угля сформулированы следующие исследовательские 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.

2 Экспериментальное исследование процесса полукоксования энергетических углей под давлением

Рассматриваемый этап выполнения научного исследования имел основной целью разработку в лабораторных условиях способа получения полукокса из энергетических углей посредством термической переработки под давлением. В рамках настоящего этапа были определены три основных задачи для выполнения исследовательской работы:

- 1) определение зависимости содержания летучих веществ от температуры нагрева;
- 2) определение зависимости характеристик получаемого полукокса от скорости нагрева угля;
- 3) определение зависимости характеристик полукокса от давления процесса.

Также исследования включали в себя определение влияния гранулометрического состава угля на свойства полученного продукта, поэтому для исследований использовались различные классы крупности.

2.1. Описание установки

Для выполнения данных задач была разработана и изготовлена лабораторная установка. Данная установка включает в себя реактор из нержавеющей стали, рассчитанный на давление до 5,0 МПа, оснащенный системой автоматического выравнивания давления, отводчиком конденсата и термопарами, с возможностью визуализации процесса нагрева на персональном компьютере. Схема установки изображена на рисунке 17.

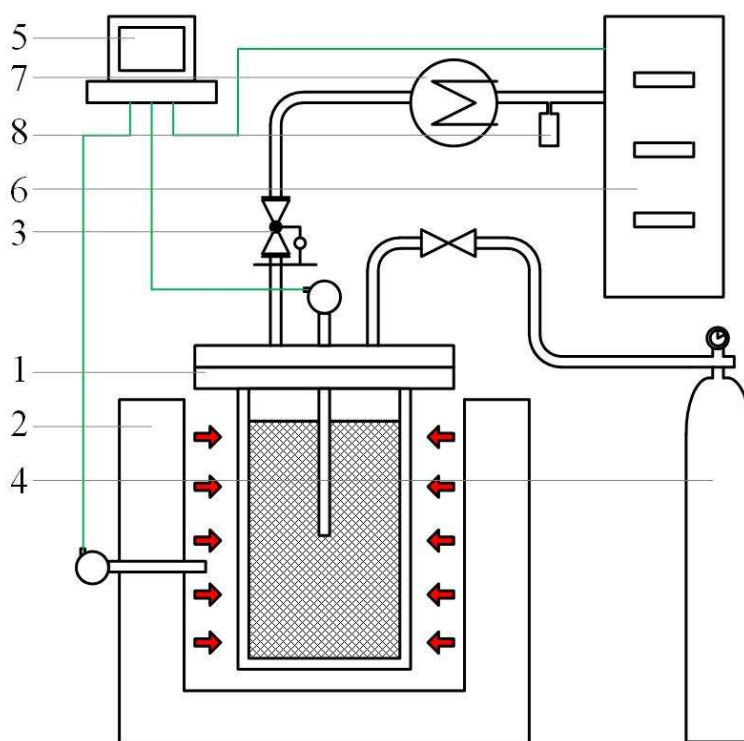


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки

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

2.2. Описание методики

Эксперименты проводили следующим образом: в реактор загружали уголь, помещали реактор в электропечь, при помощи присоединенного баллона с инертным газом повышали давление внутри реактора и затем нагревали печь до необходимой температуры, значение которой в засыпке угля определяли встроенной в реактор термопарой типа ТХА. В целях обеспечения безопасности процесса была изготовлена бронекомната, в которую поместили установку. Время нагрева угля варьировалось в диапазоне 3-9 ч, температура нагрева от 400 до 600 °С.

По окончании эксперимента реактор извлекали из печи и охлаждали при комнатной температуре, затем производили отбор проб. Аналитические испытания выполняли Экспериментальном Центре Красноярского филиала ООО «Сибниуголеобогащение». В качестве сырья использовались: 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.

2.3. Определение зависимости характеристик получаемого полуккокса от параметров процесса термообработки угля

Наиболее широкий спектр исследований был выполнен на угле марки 2Б Бородинского месторождения (таблица 5), поскольку он является характерным представителем углей Канско-Ачинского буроугольного бассейна. На первом этапе были выполнены поисковые работы при атмосферном давлении на узких классах крупности угля. Известно, что при нагреве угля под давлением часть содержащихся в нем летучих веществ закоксуывается, поэтому при тех же температурах остаточное содержание летучих веществ при использовании давления всегда ниже, чем при атмосферном [92–96]. 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.

Таблица 5 – Свойства исходного угля Бородинского месторождения

Класс крупности, мм	Влага общая, W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Выход летучих веществ, V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
25-300	31,3	5,9	48,6	17,6

Далее исследования были продолжены с расширенным классом крупности угля, который рекомендуется для использования в промышленном процессе.

2.3.1. Определение зависимости остаточного содержания выхода летучих веществ от температуры нагрева

С целью определения температуры термообработки угля, необходимой для получения продукта с выходом летучих веществ не более 15 % по ГОСТ Р 53357–2013, определенным в Главе 1.5, была проведена серия экспериментов с нагревом до различных температур при атмосферном давлении угля исходного класса крупности. Технические характеристики продукта, полученного в ходе экспериментов, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технический анализ угля после термообработки

Температура нагрева угля, °С	Общая влага W^r , %	Зольность A^d , %	Выход летучих V^{daf} , %
Исходный уголь	31,3	5,9	48,6
400	0,6	5,9	43,0
500	0,2	6,7	30,9
570	0,2	7,3	14,6
600	0,2	7,7	11,4

Таким образом, необходимое значение температуры термообработки составило 570 °С.

2.3.2. Определение зависимости характеристик получаемого полукокса от времени нагрева

Для определения влияния различных классов крупности на характеристики продукта в целом были проведены несколько серий экспериментов со временем нагрева печи до 600 °С в течение 1,5, 3 и 9 часов с узкими классами крупности 10 – 15 мм, 15 – 20 мм и 20 – 25 мм. Для компенсации потерь тепла в окружающую

среду печь нагревали до 600 °С, при этом температура в центре засыпки по окончании эксперимента равнялась 570 °С. На рисунке 18 представлены значения температуры угля внутри засыпки при различной скорости нагрева печи.

Анализ результатов показал, что в результате термообработки угля происходит усадка угольной засыпки в связи с уплотнением угольных частиц, однако уменьшение объема угля практически не зависит от давления среды в исследуемом диапазоне.

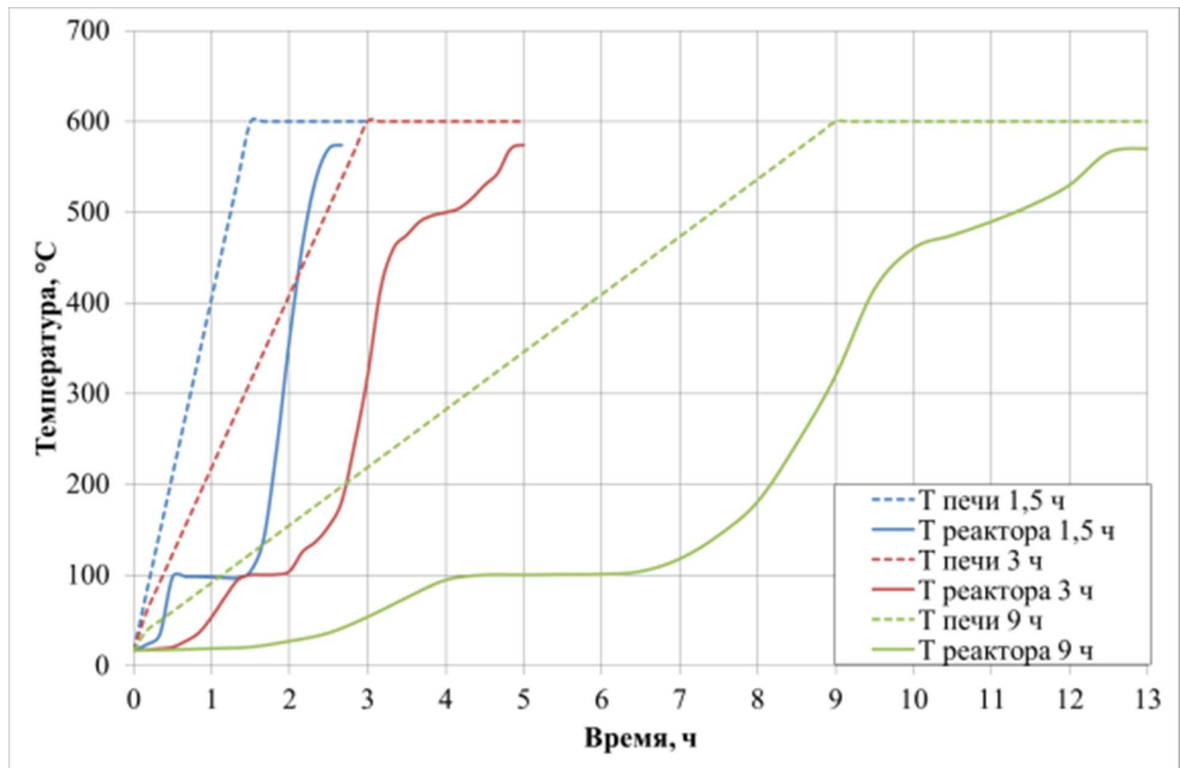


Рисунок 18 – Термограммы нагрева угля

Как показано на рисунке, длительность экспериментов составила 2,5, 5 и 12,5 часов соответственно.

Характеристики угля различных классов крупности после термообработки при атмосферном давлении представлены Приложении А.

Объем угля после термообработки уменьшился примерно на 50 % от исходного вне зависимости от класса крупности исходного угля и скорости нагрева. Значения относительного объема представлены на рисунке 19.

Насыпная плотность угля после термообработки при различных режимах также не зависит от класса крупности исходного угля и скорости нагрева и составляет около – 500 кг/м³. Значения насыпной плотности для различных классов угля представлены на рисунке 20.

На рисунках 21 - 23 изображен гранулометрический состав полученного продукта. Ситовой анализ угля показал, что с увеличением длительности нагрева гранулометрический состав конечного продукта практически не изменяется.

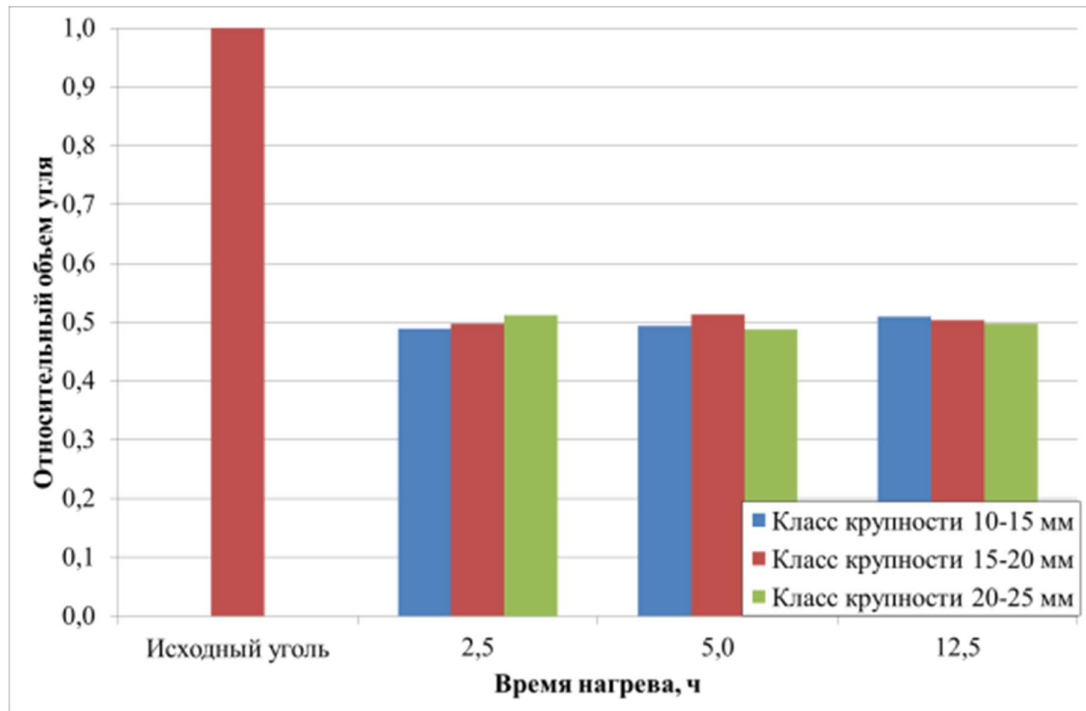


Рисунок 19 – Изменение относительного объема угля

Определение прочности на истирание полученных образцов угля проводились на основе ГОСТ 15490-70. В экспериментах с исходным классом крупности угля 20 - 25 мм и 15 - 20 мм для испытания на прочность отбирался класс крупности 13 - 20 мм полученного продукта, а для экспериментов с исходным классом крупности 10 - 15 мм использовался класс крупности 10 - 13 мм полученного продукта в количестве 300 гр. Проба помещалась в малый барабан, после 100 оборотов выгружалась и рассеивалась на ситовом грохоте. Результаты испытаний полученного продукта на прочность в сравнении с исходным углем представлены на рисунках 24 – 26 и в приложении А.

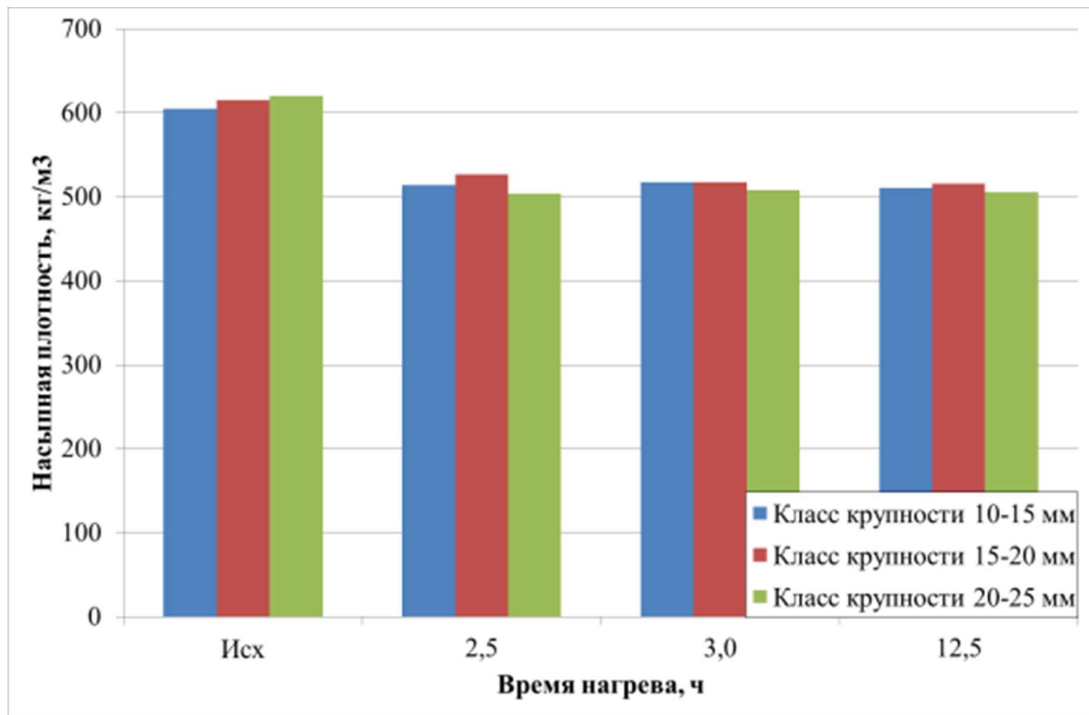


Рисунок 20 – Изменение насыпной плотности угля

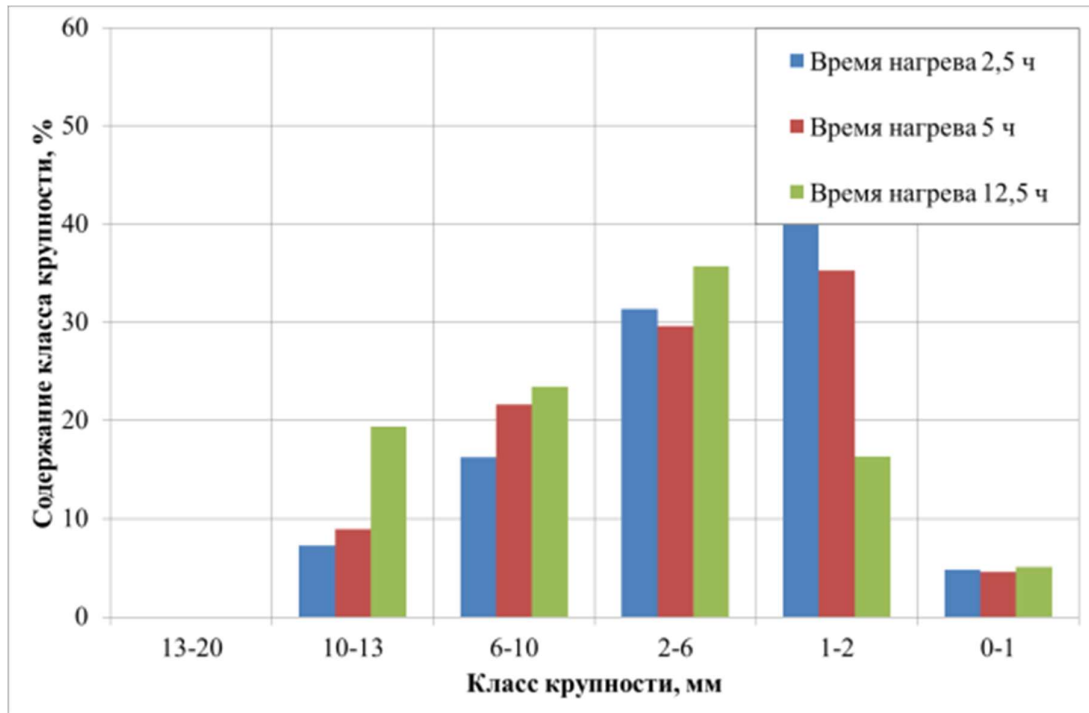


Рисунок 21 – Гранулометрический состав полученного продукта (класс крупности 10 - 15 мм)

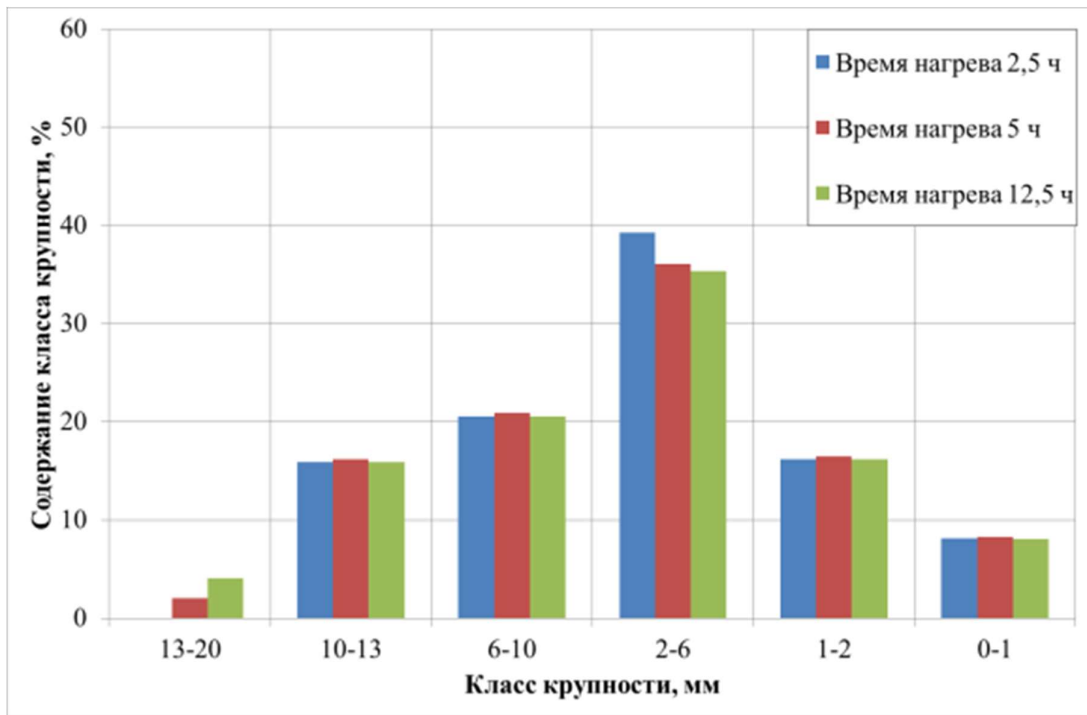


Рисунок 22 – Гранулометрический состав полученного продукта (класс крупности 15 - 20 мм)

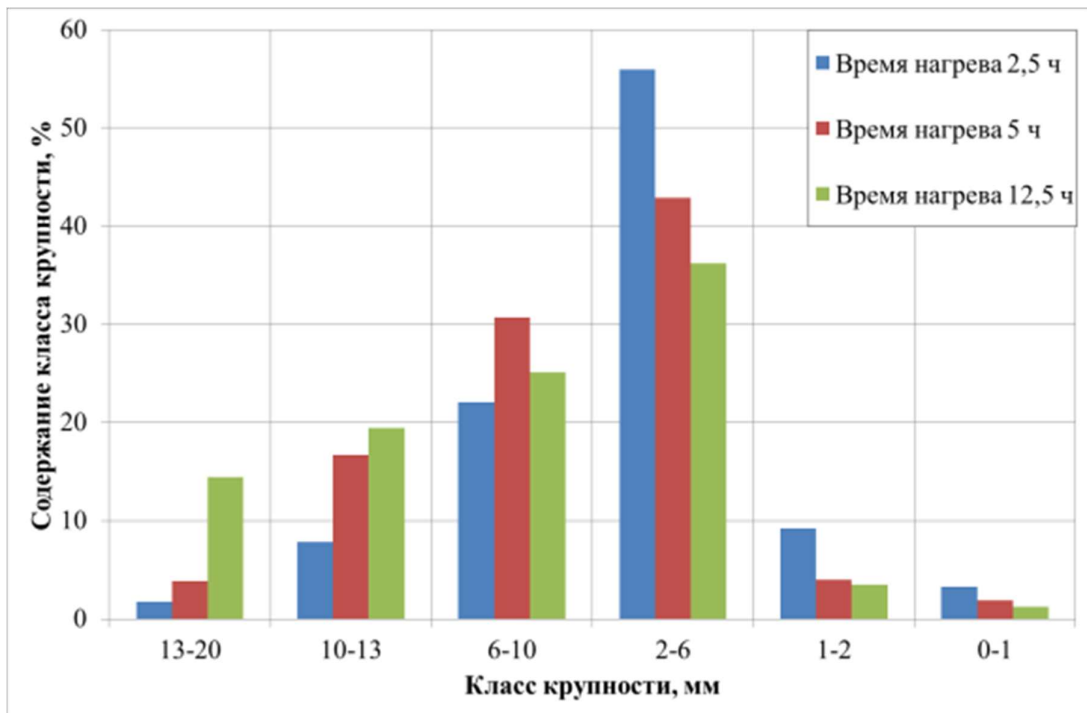


Рисунок 23 – Гранулометрический состав полученного продукта (класс крупности 20 - 25 мм)

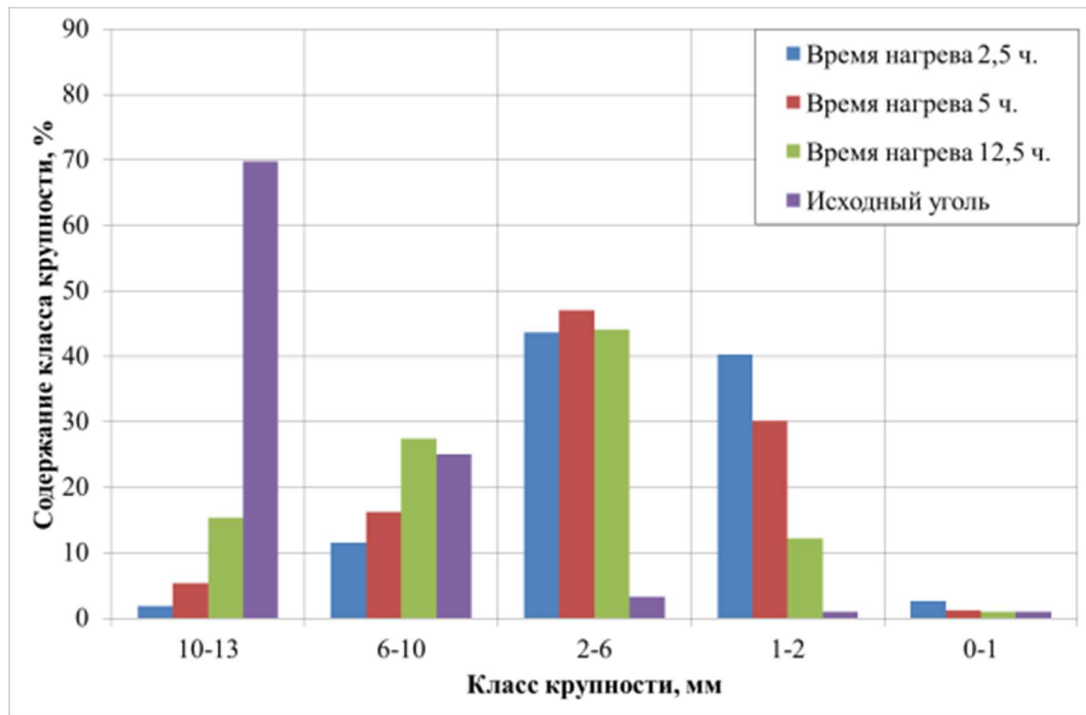


Рисунок 24 – Гранулометрический состав полученного продукта после испытания на истирание (класс крупности 10 - 15 мм)

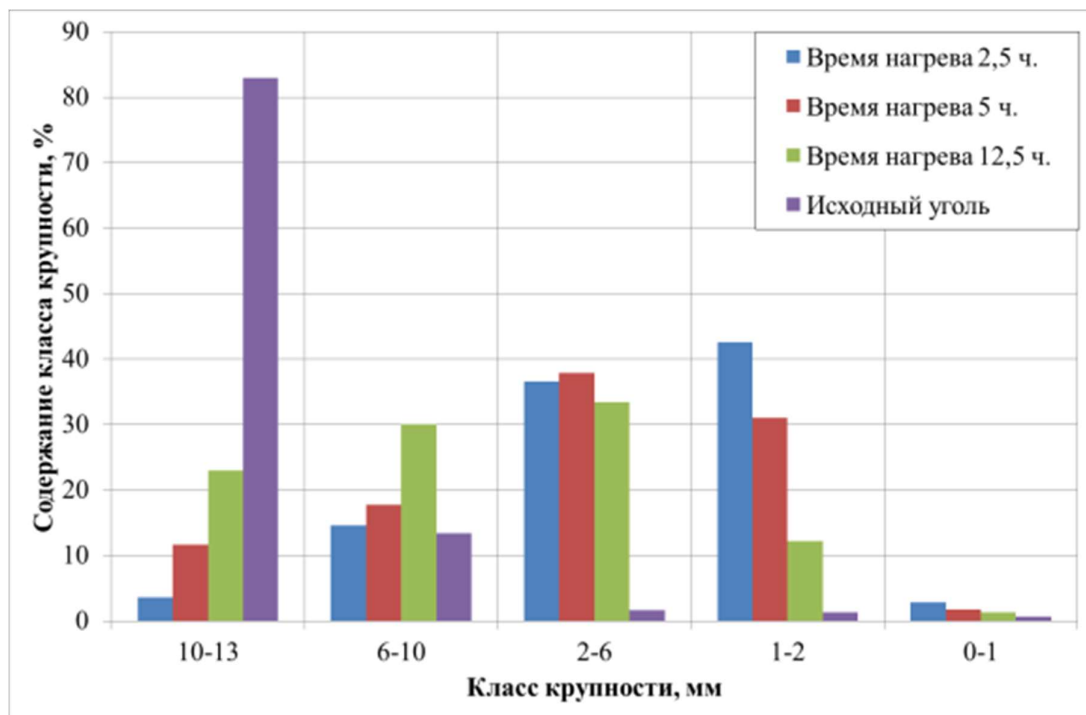


Рисунок 25 – Гранулометрический состав полученного продукта после испытания на истирание (класс крупности 15-20 мм)

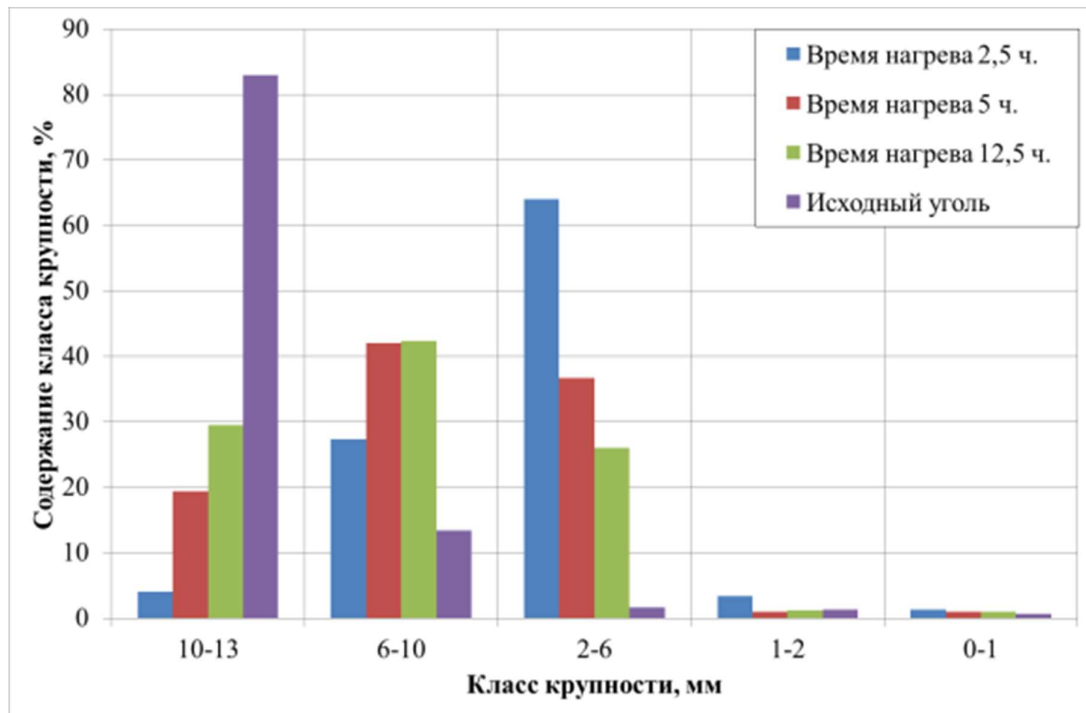


Рисунок 26 – Гранулометрический состав полученного продукта после испытания на истирание (класс крупности 20-25 мм)

Прочность M_{10} – это отношение массы остатка на сите 10 мм после рассеивания на ситах к общей массе пробы. В результате испытания на прочность было определено, что с уменьшением скорости нагрева угля прочность возрастает, однако, даже при длительности эксперимента в течение 12,5 часов составляет около 35 % этого же показателя исходного угля (рисунок 27).

Определение водопоглощения производили по ГОСТ 21290-2018. Исследования показали, что водопоглощение угля не зависит от времени нагрева (рисунок 28), следовательно, и низшая теплота сгорания после водопоглощения остается неизменной (рисунок 29).

Однако конечный продукт должен обладать достаточно высокой прочностью, сравнимой, по меньшей мере с прочностью исходного угля. При нагреве угля испарение влаги приводит к образованию микротрещин в угле и, как следствие, его разупрочнению. Для сохранения прочности за счет уплотнения структуры угля было принято решение нагревать уголь до 570 °С для удаления влаги и летучих веществ под избыточным давлением.

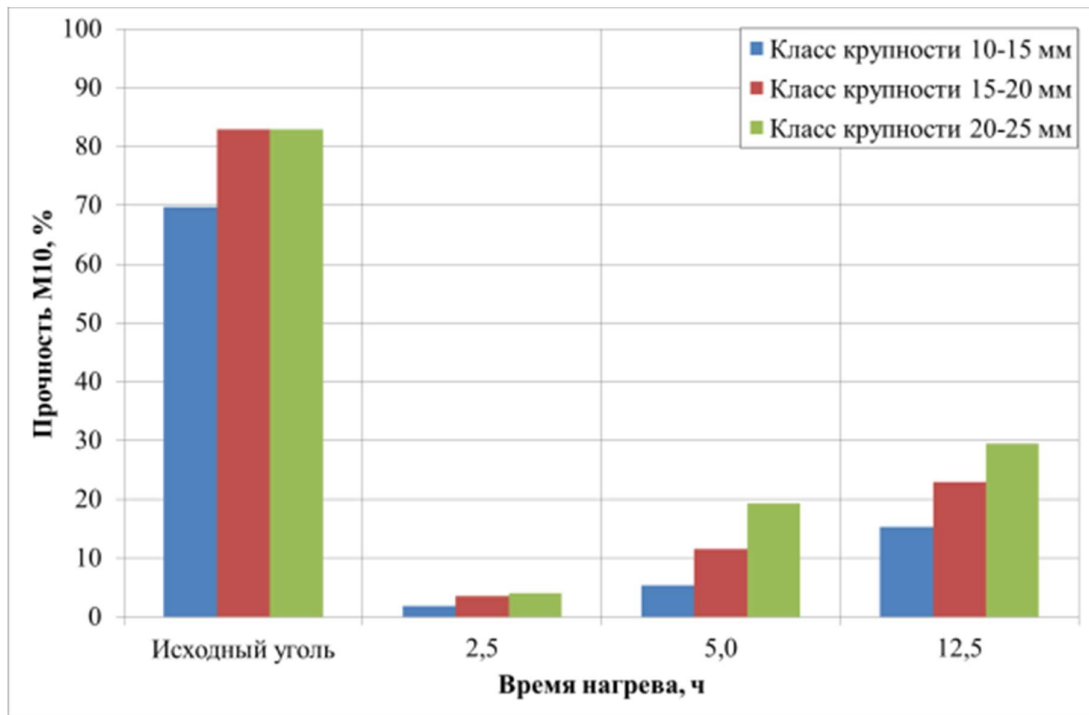


Рисунок 27 – Зависимость прочности М₁₀ от времени нагрева после испытания на истирание

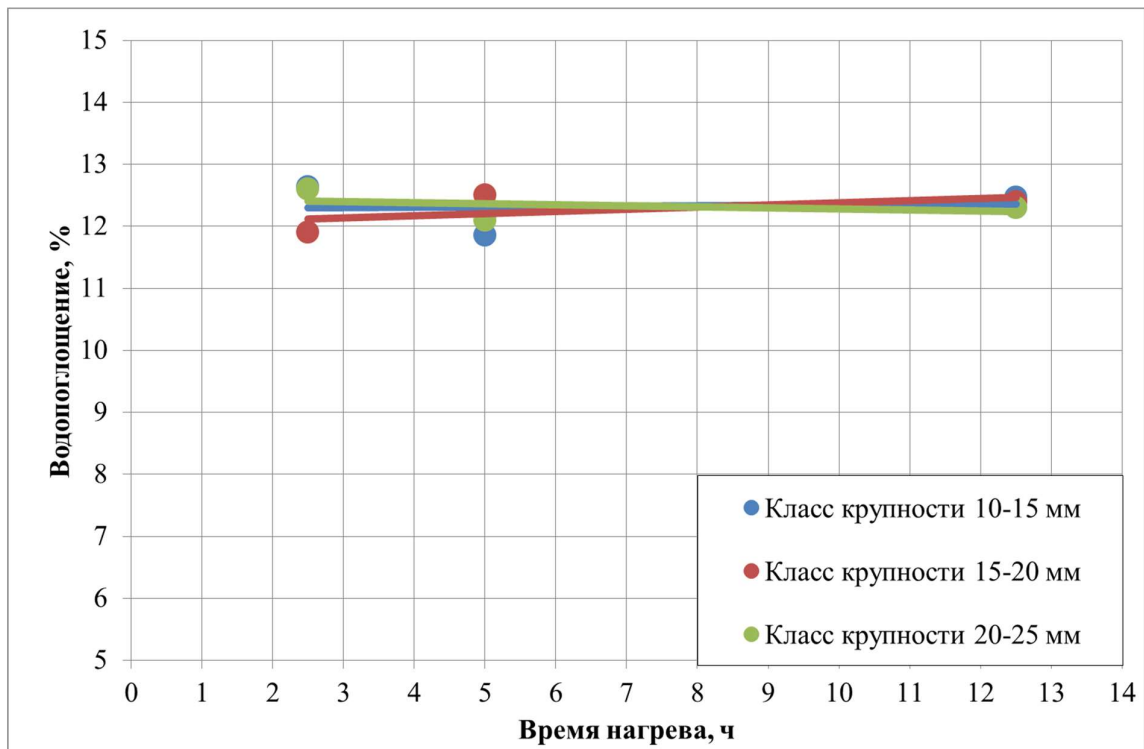


Рисунок 28 – Зависимость водопоглощения образцов от времени нагрева

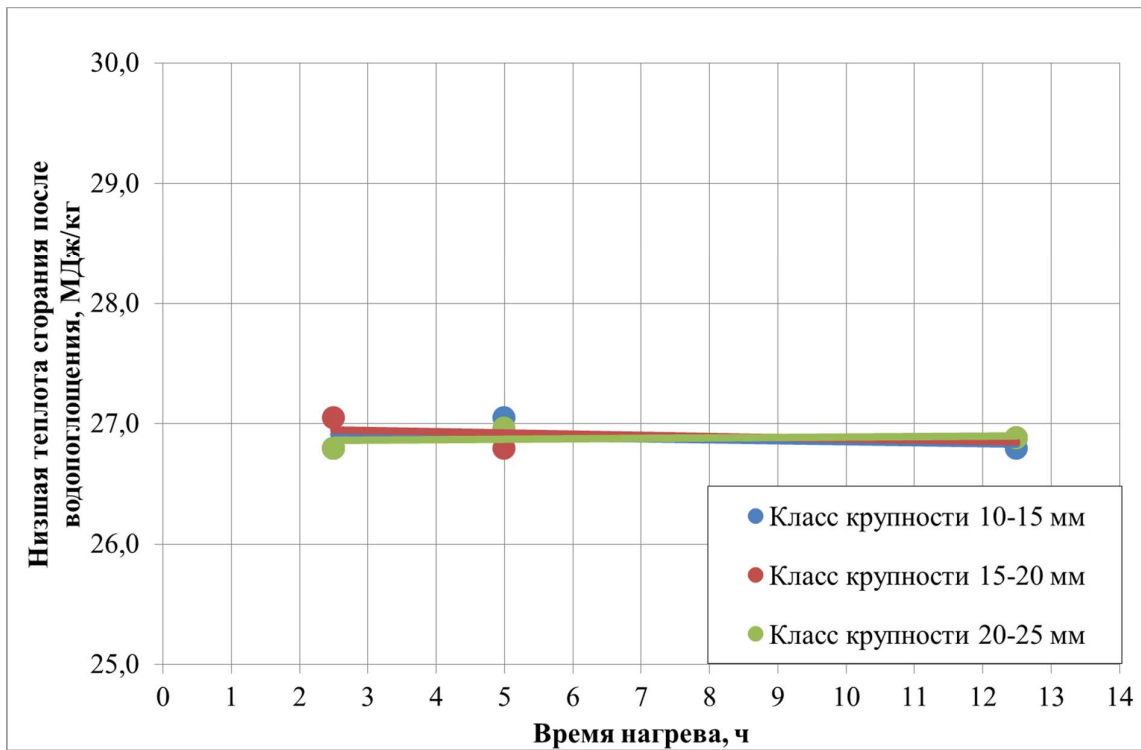


Рисунок 29 – Зависимость нижней теплоты сгорания после водопоглощения от времени нагрева

Предположительно, увеличение прочности происходит за счет уплотнения структуры. Для подтверждения были исследованы зависимости плотности, усадки, водопоглощения и пористости полученного продукта от времени нагрева и избыточного давления. Также увеличение кажущейся плотности и, как следствие, уменьшение пористости должно положительно сказаться на снижении сорбции кислорода

Дальнейшие исследования процесса термической переработки энергетических углей проводились при повышенном давлении в реакторе с целью получения более высоких показателей прочности при одновременном сокращении времени прогрева засыпки.

Впоследствии проводился технический анализ проб полученного продукта в «крайних» точках по давлению и времени нагрева для каждого класса крупности используемого угля. Полученные данные представлены в таблице 7 и обсуждаются ниже.

По результатам, полученным в данном подразделе, можно сделать выводы, что в процессе нагрева при атмосферном давлении увеличение длительности нагрева:

- не влияет на изменение относительного объема, насыпной плотности, водопоглощения, низшей теплоты сгорания;
- обеспечивает увеличение прочности полукокса, однако даже при нагреве в течении 12,5 ч показатель прочности M_{10} составляет 35 %;
- для получения полукокса с прочностью, сопоставимой с исходным углем нагрев угля необходимо производить под давлением.

2.3.3. Определение зависимости характеристик получаемого полукокса от давления при нагреве в реакторе

На следующем этапе работ была проведена серия опытов по термической переработке угля при избыточном давлении в реакторе 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 МПа. Характеристики полукокса, полученного в этих экспериментах, представлены в приложении А.

Объем засыпки после термообработки уменьшился примерно на 50 % от исходного вне зависимости от класса крупности исходного угля, длительности нагрева и давления, при котором проходил эксперимент. Значения относительного представлены на рисунке 30. Насыпная плотность угля после термообработки при различных режимах для исследуемых классов крупности также оказалась примерно одинаковой – 510 кг/м³ (рисунок 31).

На рисунке 32 приведена зависимость водопоглощения полученного продукта от избыточного давления. Как видно из графика, значение водопоглощения снижается при повышении давления и не зависит ни от времени нагрева, ни от класса крупности.

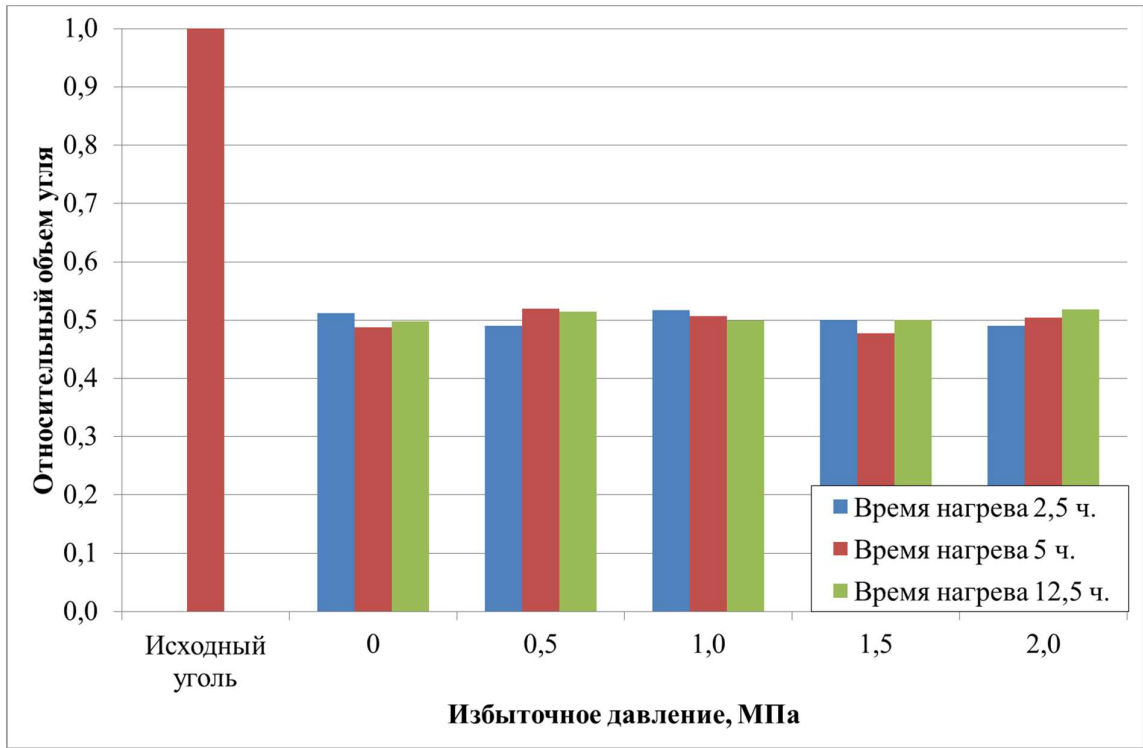


Рисунок 30 – Изменение относительного объема

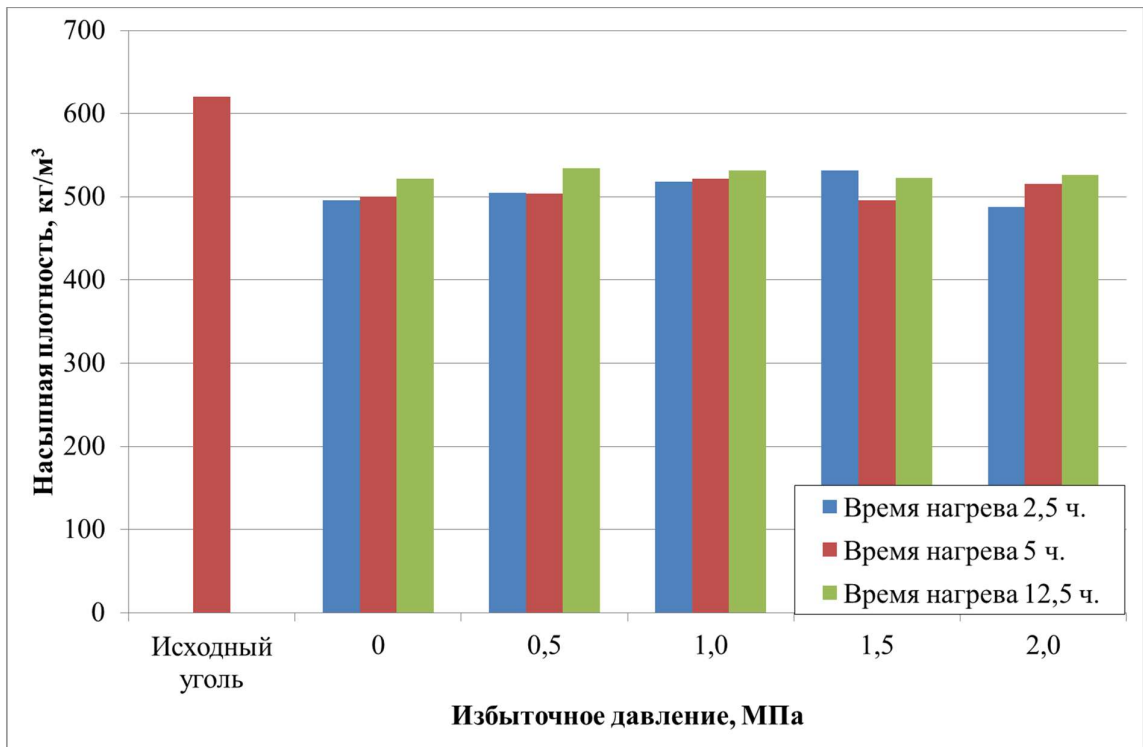


Рисунок 31 – Изменение насыпной плотности

В исследуемом диапазоне зависимости водопоглощения и низшей теплоты сгорания после водопоглощения от избыточного давления процесса с достаточно высокой степенью аппроксимации описываются линейными функциями. Полученный продукт обладает низшей теплотой сгорания не менее 26,5 МДж/кг даже после водопоглощения (рисунок 33), при этом повышение давления до 2,0 МПа приводит к возрастанию низшей теплоты сгорания после водопоглощения до 29,0 МДж/кг.

Кажущуюся плотность угля определяли по ГОСТ 2160–2015. Суммарный объем пор определяли по ГОСТ 17219–71. Измерение кажущейся плотности угля и суммарного объема пор по воде позволяют определить зависимость пористости от изменения давления в реакторе при термической переработке (рисунок 34).

Как и водопоглощение, изменение пористости с ростом давления представляет собой линейную функцию.

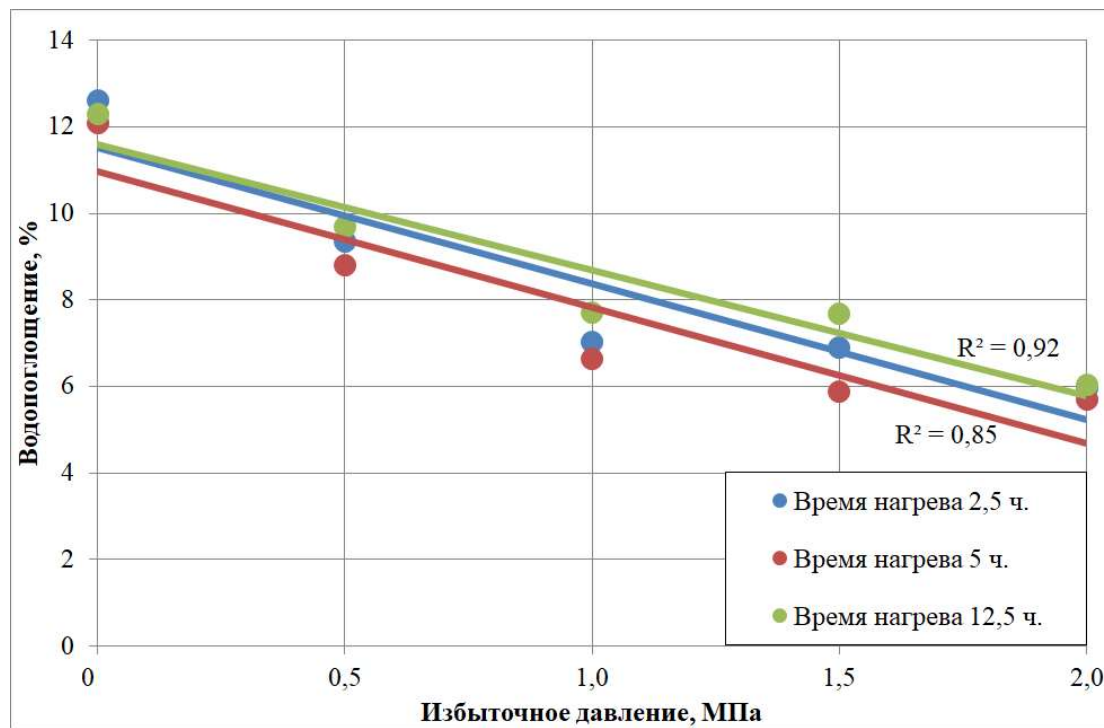


Рисунок 32 – Зависимость водопоглощения от давления

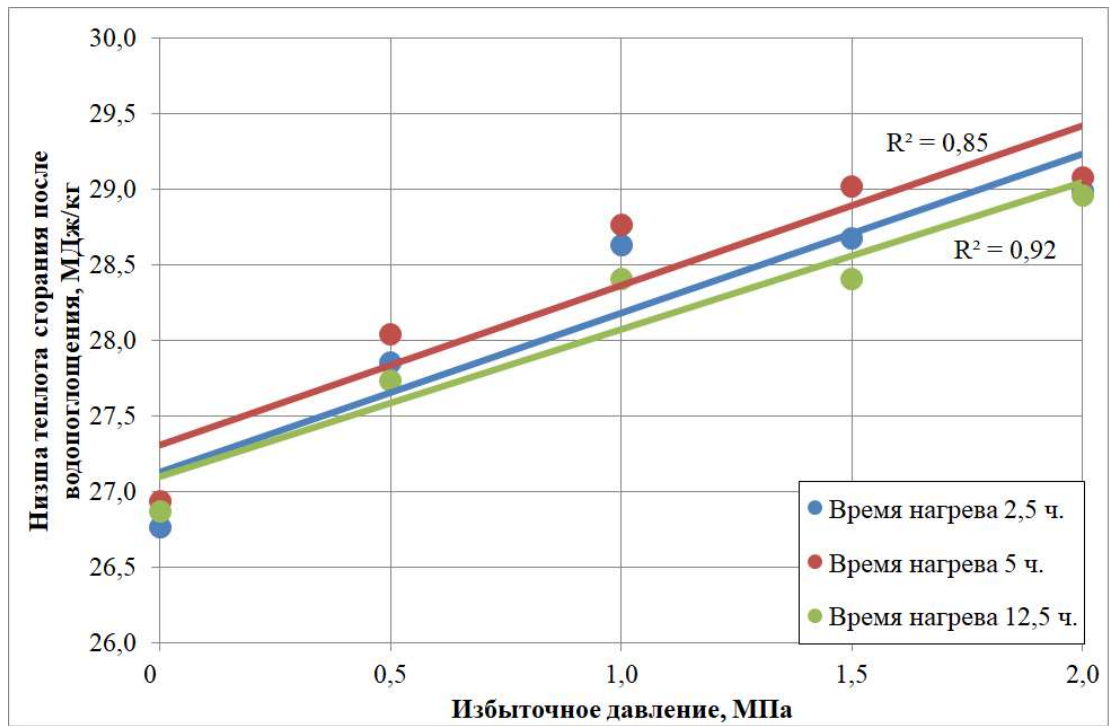


Рисунок 33 – Зависимость нижней теплоты сгорания после водопоглощения от давления

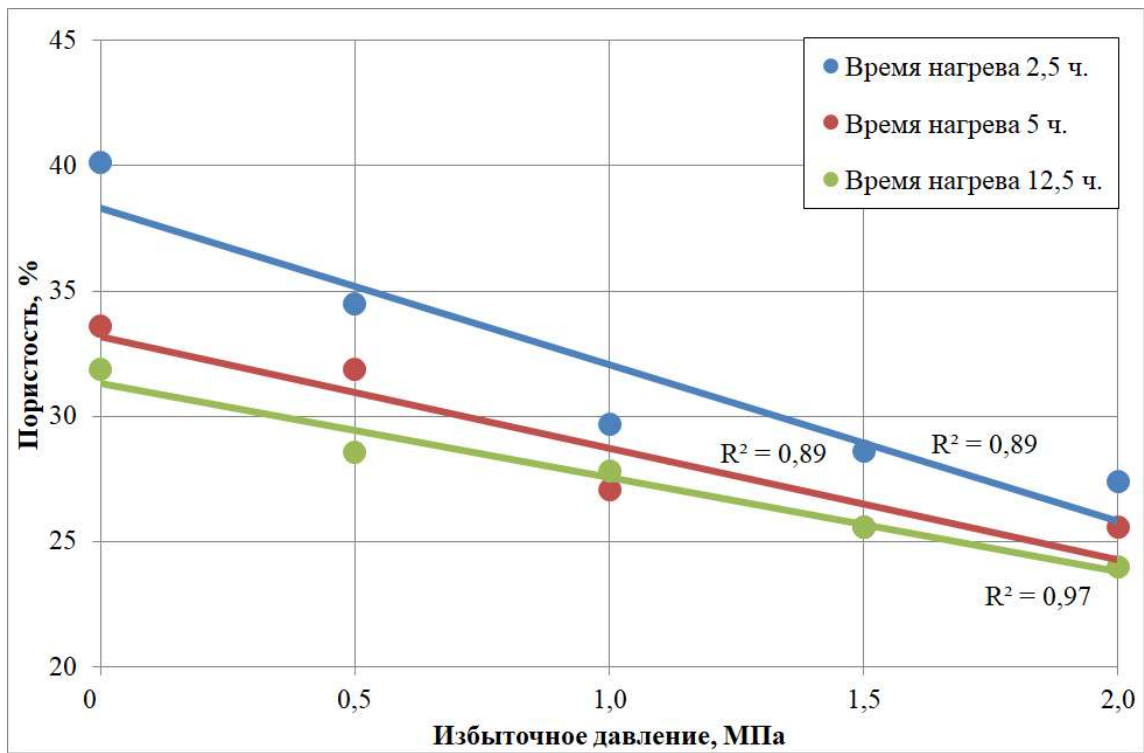


Рисунок 34 – Зависимость пористости полукокса от давления

С повышением давления процесса термообработки кажущаяся плотность частиц угля увеличивается с $1,15 \text{ г/см}^3$ до $1,3 \text{ г/см}^3$ при одновременном снижении объема пор с $0,3 \text{ см}^3/\text{г}$ до $0,2 \text{ см}^3/\text{г}$, а пористость частиц угля с ростом давления также снижается с 35 % до 25 %.

Для продукта, полученного из угля исследуемых классов крупности, зависимость относительного объема, насыпной плотности, низшей теплоты сгорания, объемной низшей теплоты сгорания и пористости практически идентична.

Для всех классов крупности с увеличением давления и уменьшением скорости нагрева увеличивается содержание крупных классов угля. Наибольшее количество крупных классов содержится в образцах, термообработанных при избыточном давлении 2,0 МПа. Зависимость суммарного выхода надрешетного продукта от давления и времени нагрева полукокса, полученного из угля исходного класса крупности 20–25 мм, изображена на рисунках 35–37. Численные значения для классов крупности 10–15, 15–20 и 20–25 мм представлены в приложении А.

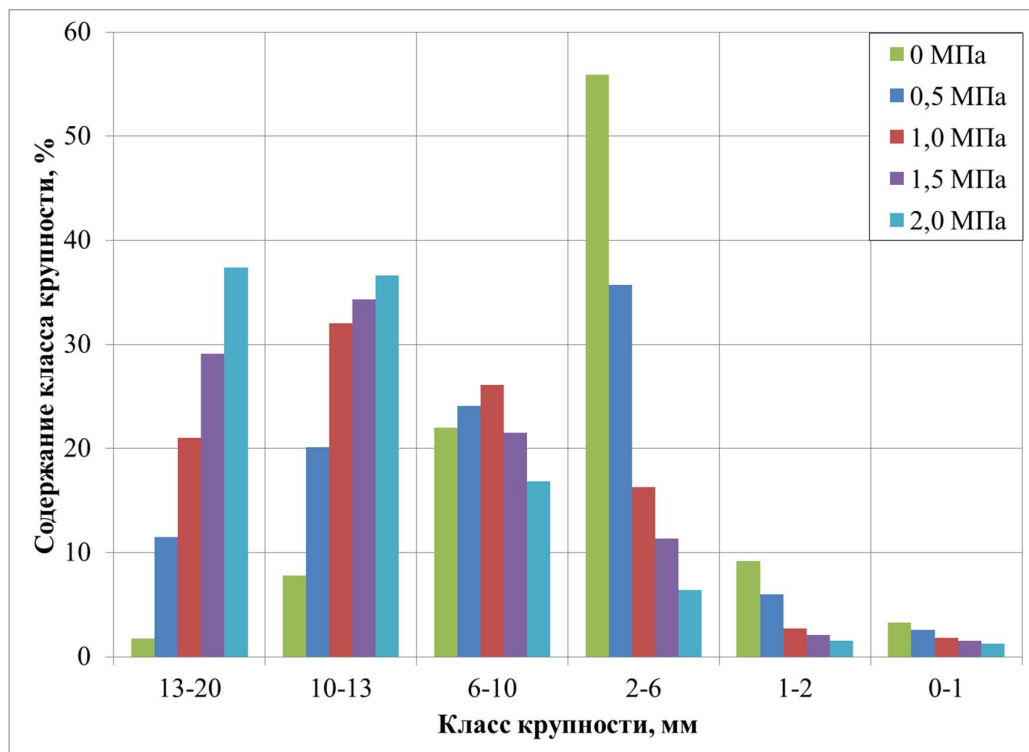


Рисунок 35 – Гранулометрический состав (класс крупности 20 - 25 мм, время нагрева 2,5 ч.)

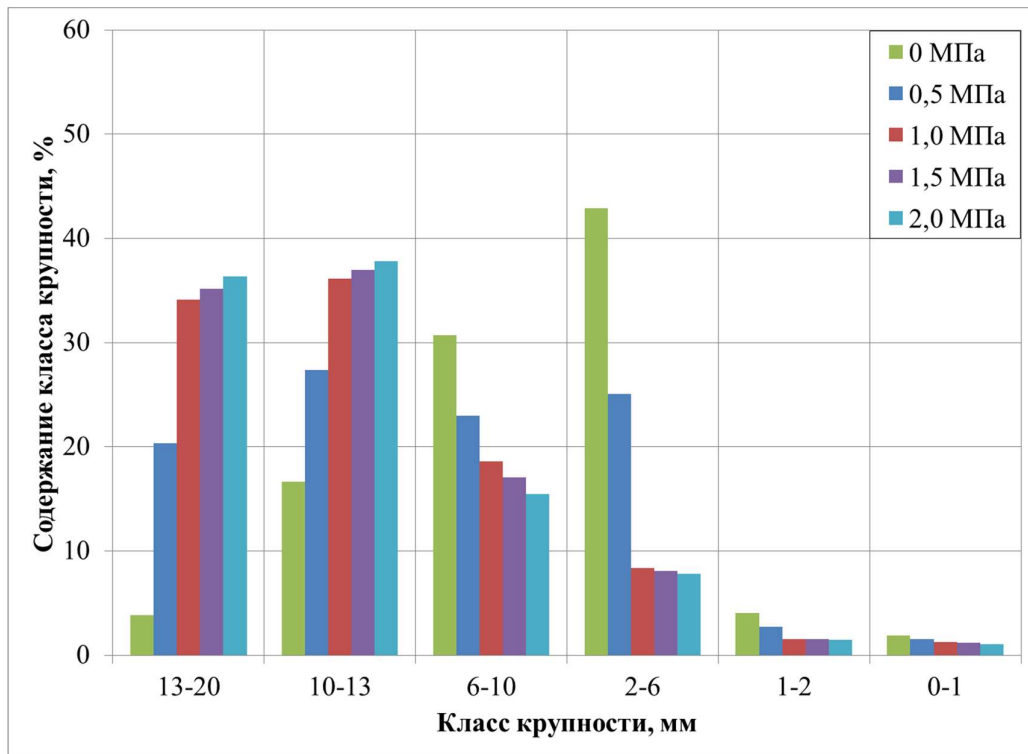


Рисунок 36 – Гранулометрический состав (класс крупности 20 - 25 мм, время нагрева 5 ч.)

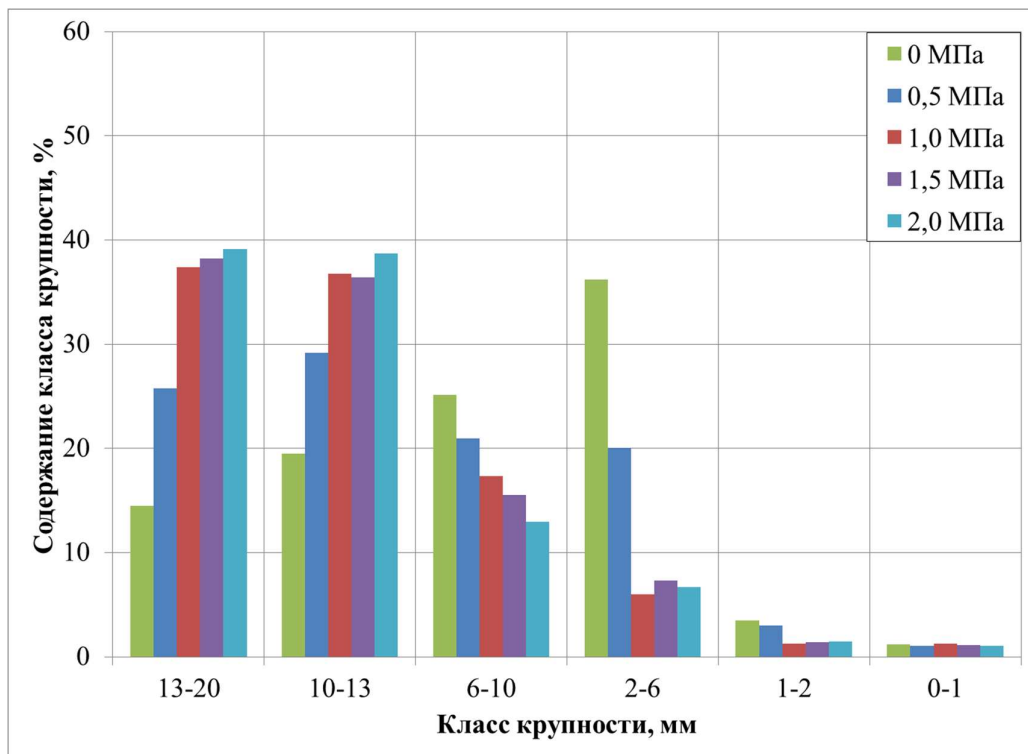


Рисунок 37 – Гранулометрический состав (класс крупности 20 - 25 мм, время нагрева 12,5 ч.)

Определение прочности на истирание производилось по приведенной в разделе 2.3.2 методике. Зависимость прочности на истирание классов крупности 20 – 25 мм от давления при различных временах нагрева печи изображена на рисунках 38 - 43. Наибольшую прочность имеет уголь, термообработанный при избыточном давлении 2,0 МПа.

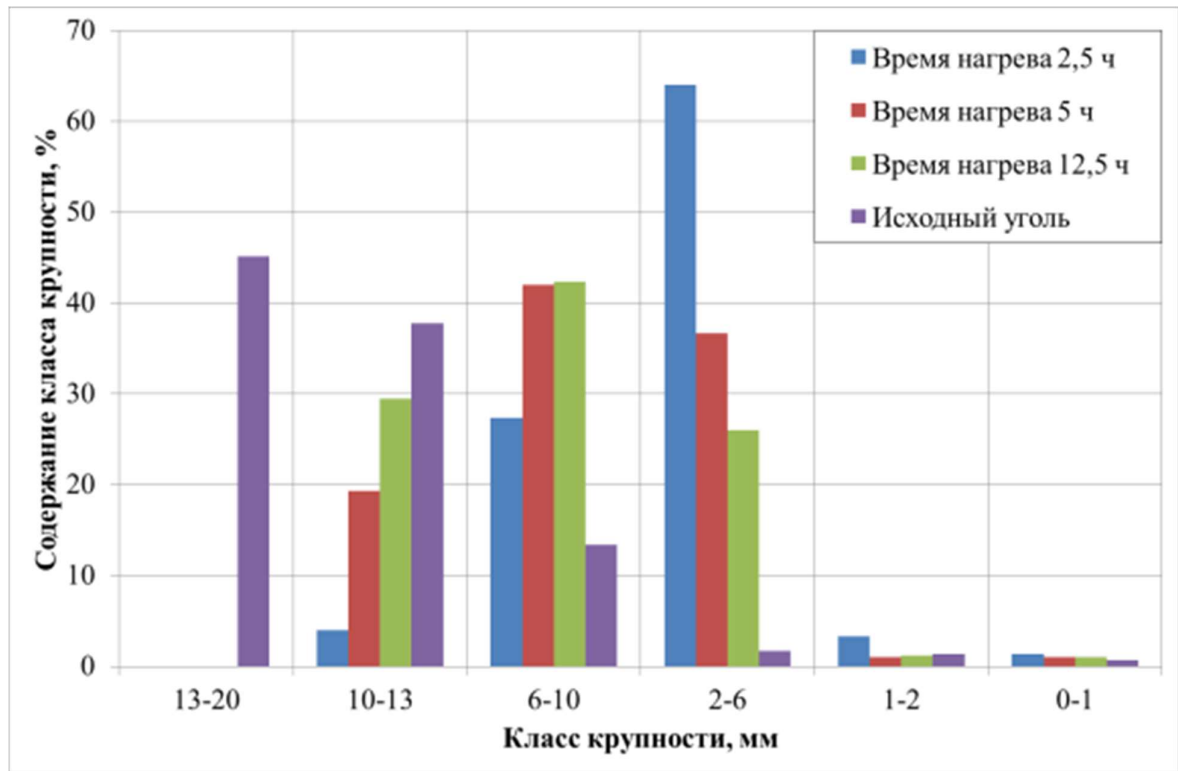


Рисунок 38 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 20 – 25 мм, избыточное давление 0 МПа)

На рисунке 43 приведена прочность M_{10} продукта, полученного из угля с исходным классом крупности 20 – 25 мм. Как показано на рисунке, при повышении давления до 2,0 МПа даже при максимально быстром нагреве прочность полученного продукта практически равна прочности исходного угля и составляет около 80 %. На рисунках 44–45 приведена прочность M_{10} продукта, полученного из угля с исходными классами крупности 10 – 15 и 15–20 мм соответственно. Для полукокса, получаемого из указанных классов даже при повышении давления до 2,0 МПа прочность полученного продукта на истирание составляет около 50 % и 60 % соответственно, что заметно ниже прочности исходного угля.

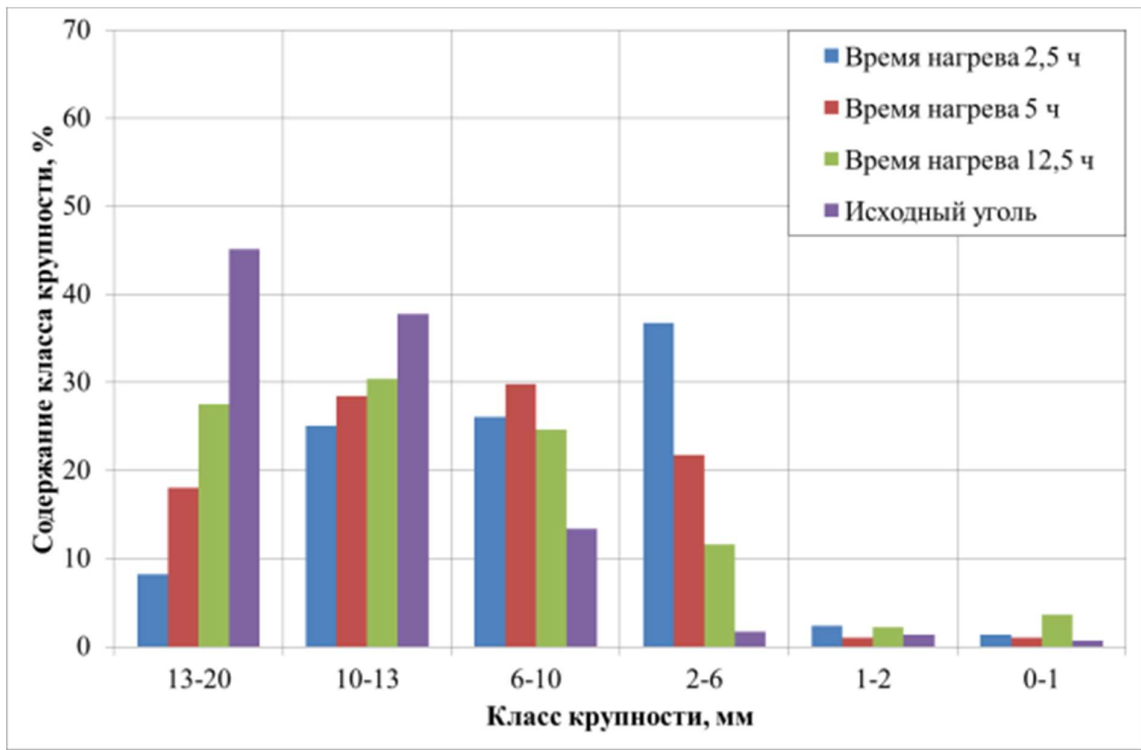


Рисунок 39 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 20 – 25 мм, избыточное давление 0,5 МПа)

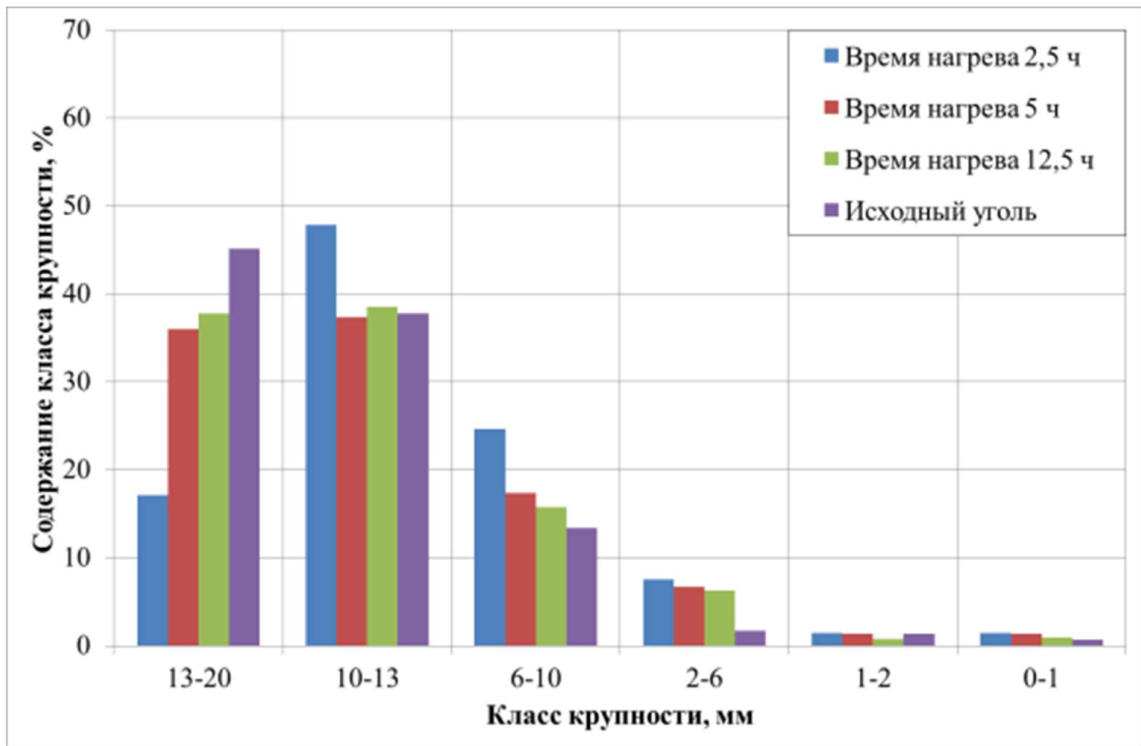


Рисунок 40 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 20 – 25 мм, избыточное давление 1,0 МПа)

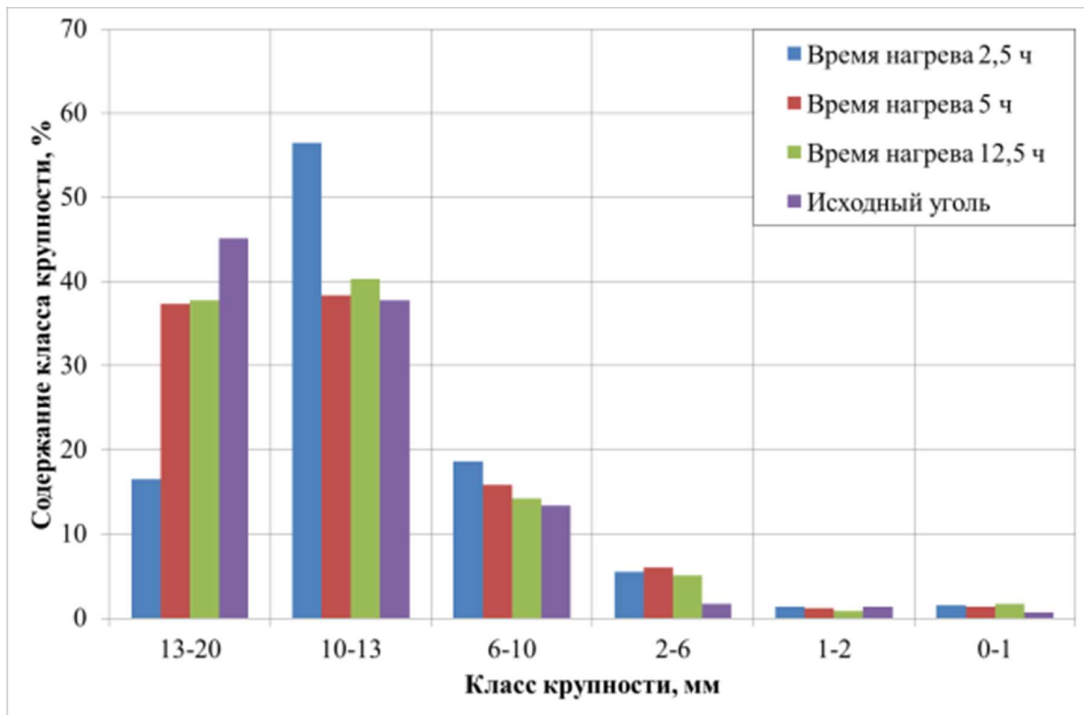


Рисунок 41 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 20 – 25 мм, избыточное давление 1,5 МПа)

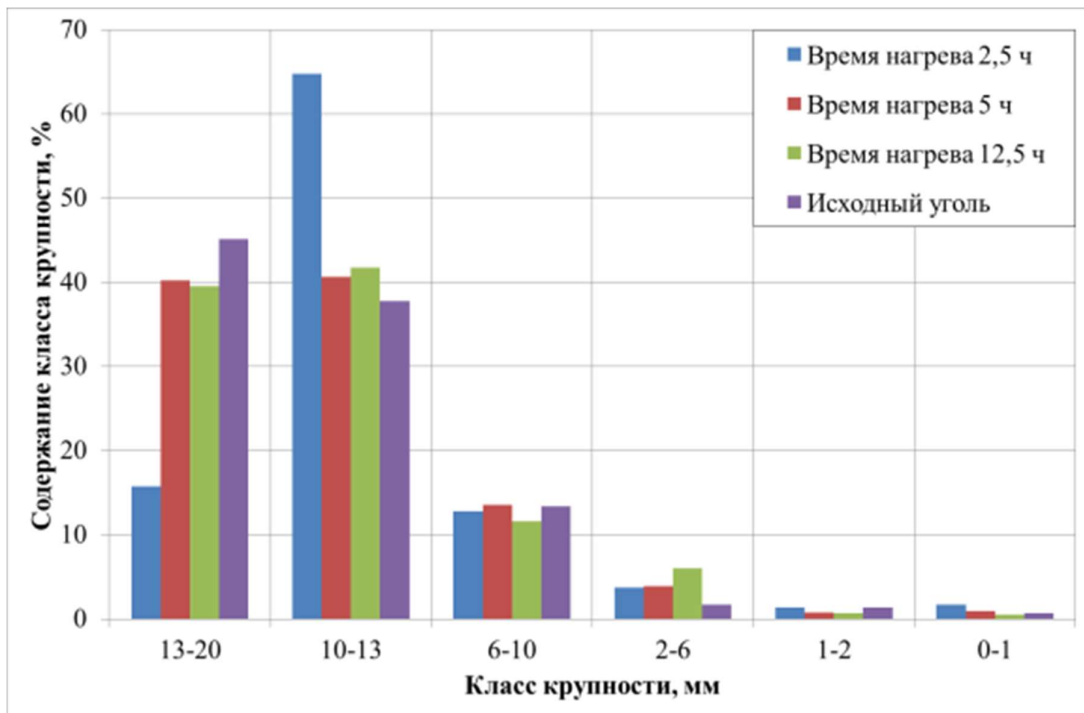


Рисунок 42 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 20 – 25 мм, избыточное давление 2,0 МПа)

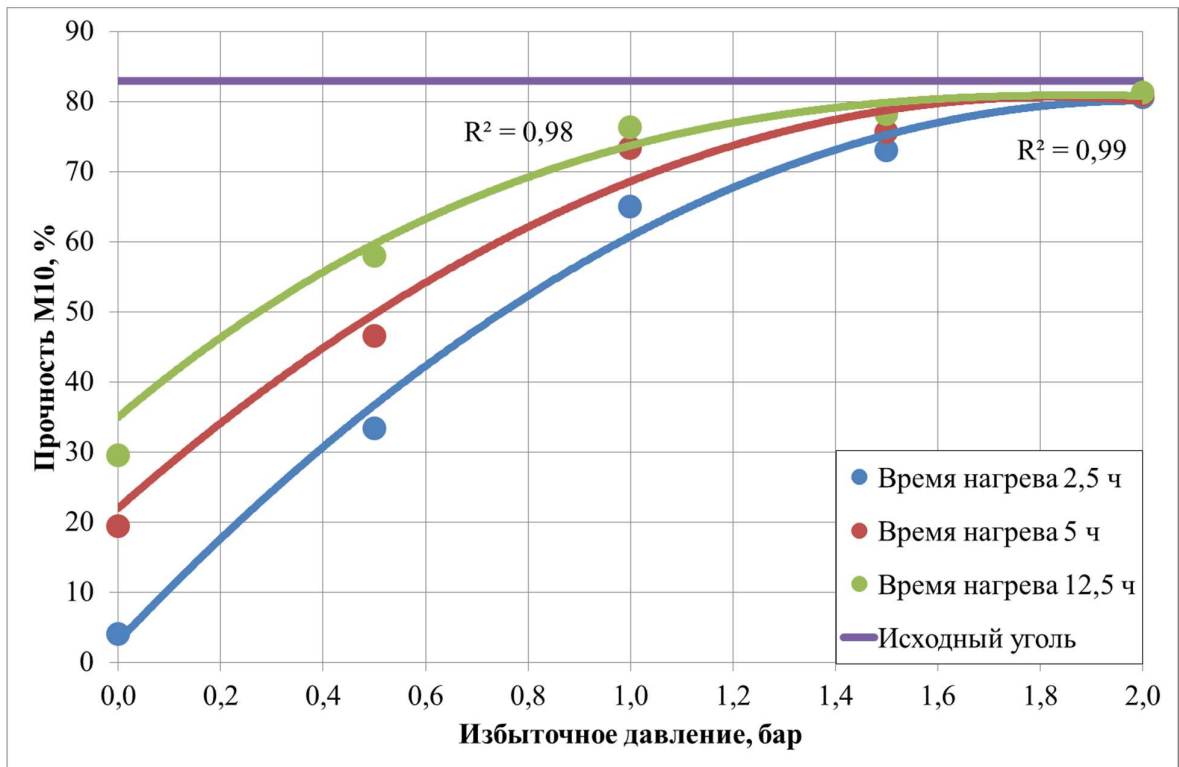


Рисунок 43 – Зависимость прочности M_{10} от давления (класс крупности 20 – 25 мм)

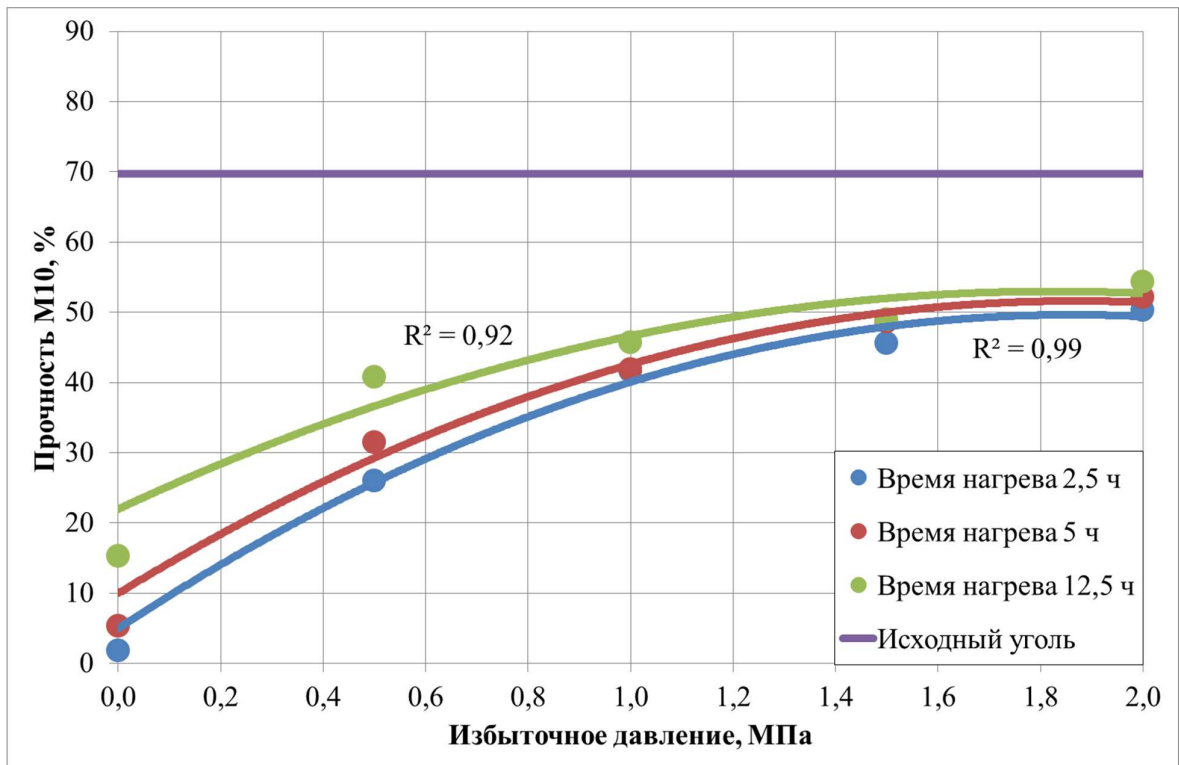


Рисунок 44 – Зависимость прочности M_{10} от давления (класс крупности 10 – 15 мм)

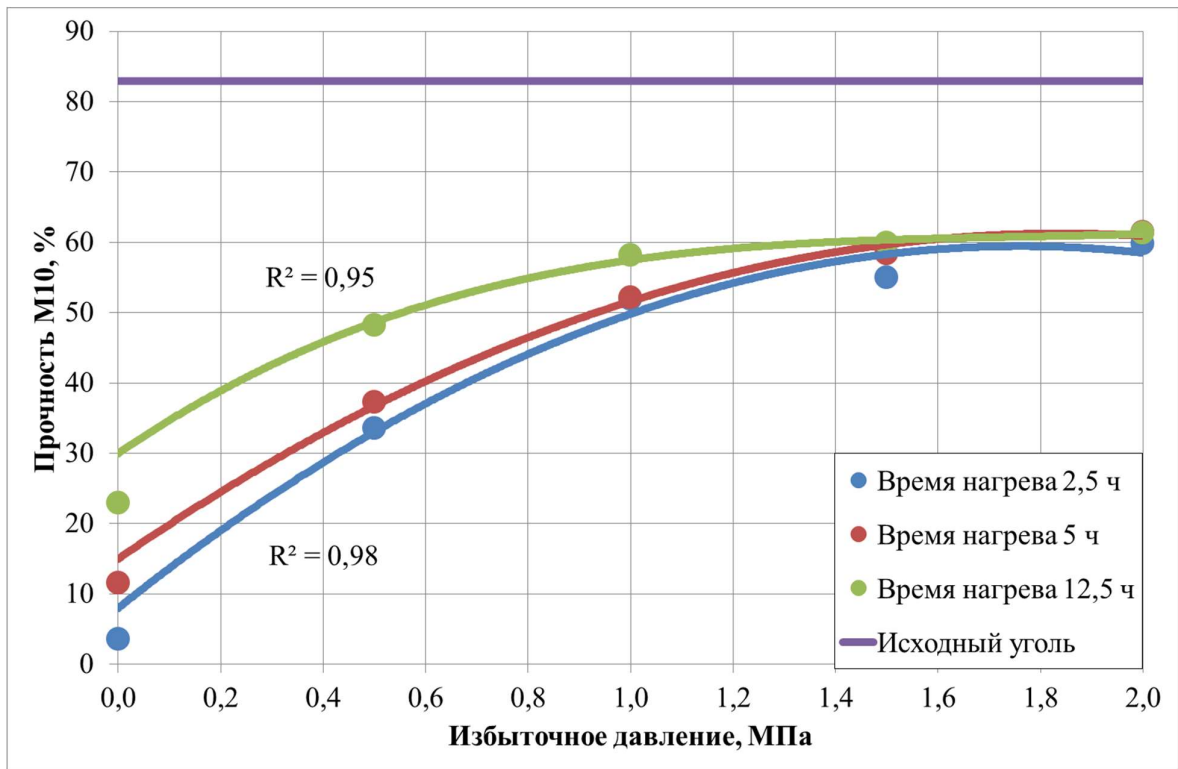


Рисунок 45 – Зависимость прочности M_{10} от давления (класс крупности 15 - 20 мм)

Однако стоит отметить, что повышение давления при термообработке значительно увеличивает прочность продукта на истирание в сравнении с опытами при атмосферном давлении (рисунок 27). Показатель прочности M_{10} втрое превышает максимальное значение того же показателя для полукокса, получаемого при атмосферном давлении. Характер изменения прочности с ростом давления при различных временах нагрева с хорошей точностью описывается квадратичными функциями.

Анализ данных показывает, что с увеличением крупности исходного угля возрастает показатель прочности M_{10} . Так при использовании класса крупности 10-15 мм его значение составило 50 %, для класса крупности 15–20 – 60 %, а для класса крупности 20–25 – 80 %, что сопоставимо с прочностью исходного угля. В связи с этим еще более перспективным представляется использование угля класса 10–50 мм т.к. согласно данным ситового анализа содержание крупных классов (25-50) в исходном угле марки 2БПКО составляет более 50 %, что положительно скажется на интегральной прочности полученного продукта.

Из приведенных в таблице 7 данных следует, показатели общей влаги, зольности и выхода летучих веществ не зависят от класса крупности используемого угля, времени его нагрева и избыточного давления и их средние значения составляют: общая влага 0,2 %, зольность 6,4 %, выход летучих 11,3 %.

Таблица 7 – Данные технического анализа полукокса, полученного в «крайних» режимах

Класс крупности, мм	Избыточное давление, МПа	Время нагрева, ч	Общая влага W^r , %	Зольность A^d , %	Выход летучих V^{daf} , %
10 – 15	0	2,5	0,3	6,5	10,9
		12,5	0,2	6,9	12,2
	2,0	2,5	0,3	6,1	11,8
		12,5	0,1	5,9	12,1
15 – 20	0	2,5	0,2	6,7	11,2
		12,5	0,1	6,2	10,5
	2,0	2,5	0,3	6,9	11,6
		12,5	0,2	6,4	10,4
20 – 25	0	2,5	0,1	6,0	10,8
		12,5	0,2	6,5	10,4
	2,0	2,5	0,3	6,8	12,3
		12,5	0,2	6,1	11,9
10 – 50	2,0	2,5	0,2	6,6	11,1

Как показано на рисунках 43, 44 и 45, при повышении избыточного давления с 0 до 0,5 МПа наблюдается резкое возрастание прочности, а при повышении избыточного давления с 1,5 до 2,0 МПа рост данного параметра существенно ниже. Можно судить, что дальнейшее повышение давления нецелесообразно, так как даст несущественную прибавку к прочности продукта при серьезном удорожании процесса. Однако следует отметить, что прочность M_{10} для мелких классов крупности практически достигает своего максимума уже при давлении 1,0 МПа,

при этом прочность для крупного класса продолжает значительно возрастать (с 65 до 80 %) при увеличении давления с 1,0 до 2,0 МПа. Исходя из этого, можно сделать вывод, что оптимальным давлением является именно 2,0 МПа. Стоит отметить, что при таком давлении время нагрева не влияет на прочность продукта, следовательно, для обеспечения наибольшей производительности нагрев производить стоит с максимальной скоростью.

Следующим этапом стало проведение эксперимента с исходным классом крупности 10–50 мм. Гранулометрический состав продукта, полученного из такого угля, и его гранулометрический состав после испытания на истирание представлены на рисунках 46 и 47 соответственно.

Как следует из рисунка 47 прочность M_{10} составляет 71,8 %, что является достаточно высоким значением для обеспечения возможности выполнения механических операций, таких как транспортировка, перегрузка и др.

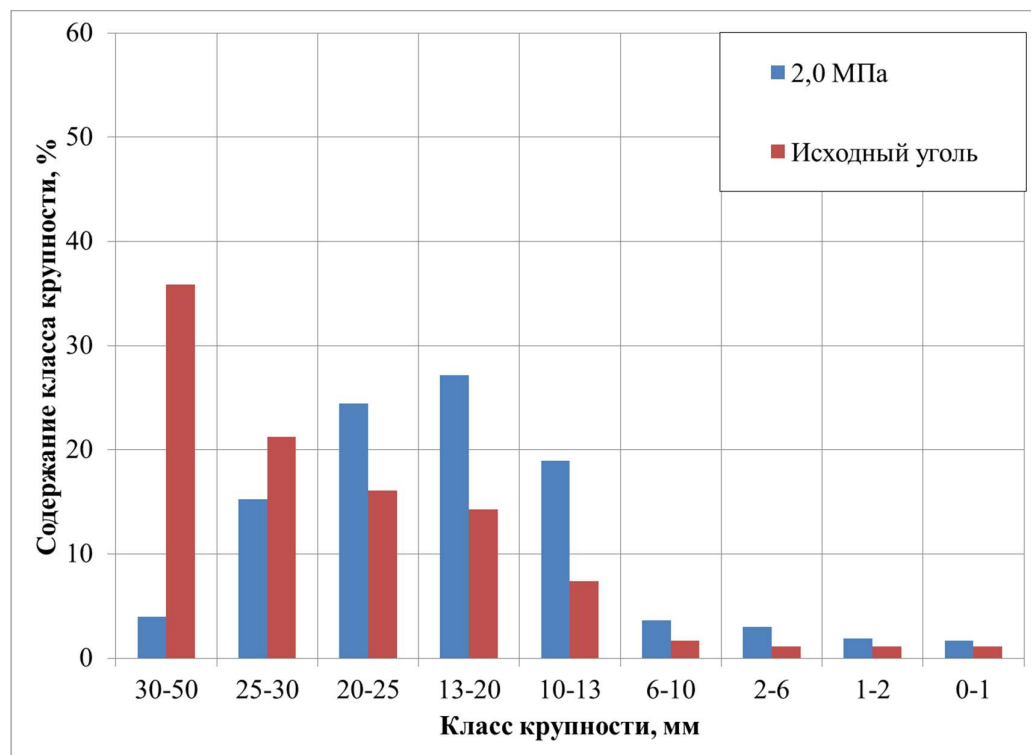


Рисунок 46 – Гранулометрический состав (класс крупности 10 – 50 мм, время нагрева 2,5 ч.)

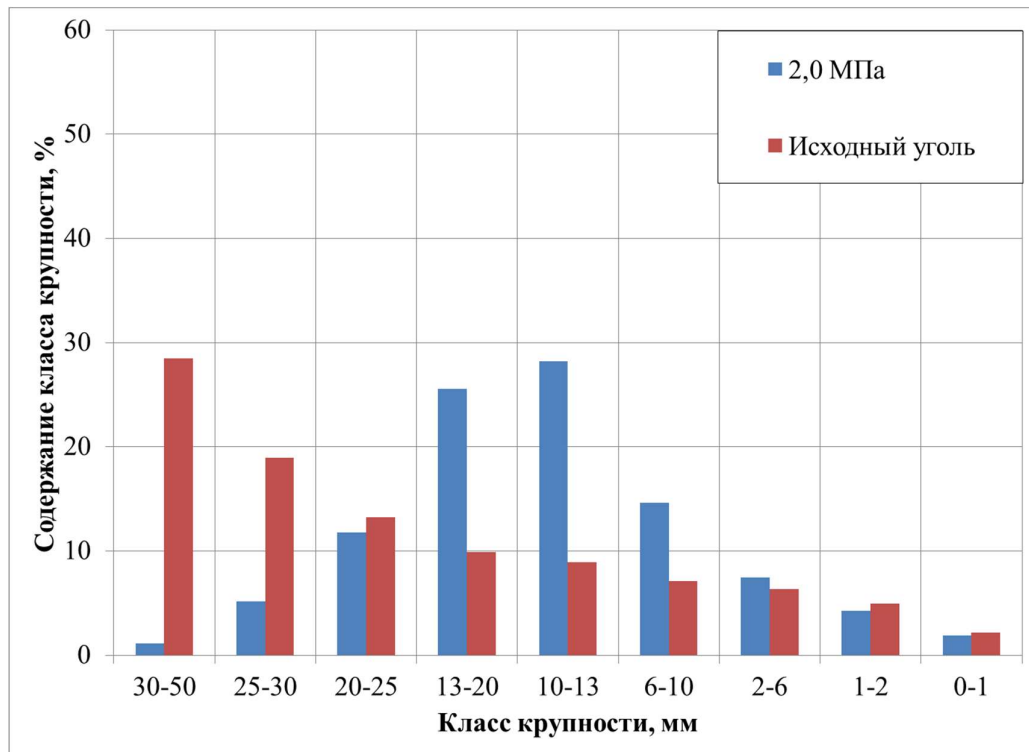


Рисунок 47 – Гранулометрический состав после испытания на истирание (класс крупности 10 – 50 мм, время нагрева 2,5 ч.)

По результатам, полученным в данном подразделе, можно сделать выводы, что в процессе нагрева угля под давлением:

- относительный объем и насыпная плотность полученного продукта в исследуемом диапазоне не зависят от длительности и давления процесса нагрева;
- водопоглощение, низшая теплота сгорания после водопоглощения и пористость полукокса не зависят от времени нагрева, а только от давления процесса;
- показатели общей влаги, зольности и выхода летучих веществ не зависят от класса крупности используемого угля, времени его нагрева и избыточного давления;
- при повышении избыточного давления с 0 до 0,5 МПа наблюдается резкое возрастание прочности, а при повышении избыточного давления с 1,5 до 2,0 МПа рост данного параметра существенно ниже, что делает дальнейшее повышение давления нецелесообразным;

– показатель прочности M_{10} полукокса, полученного из угля исходного класса крупности 10–50 мм, составляет 71,8 %, что является достаточно высоким значением для обеспечения возможности выполнения механических операций, таких как транспортировка, перегрузка и др.

2.3.4. Определение зависимости характеристик получаемого из угля марок 1Б и Д полукокса от давления при нагреве в реакторе

Далее было выполнено экспериментальное сравнение характеристик получаемого под давлением полукокса из различных марок энергетического угля. В качестве сырья использовались угли РУ «Новошахтинское» Ханкайского угольного бассейна (марка 1Б) и Черногорского месторождения Минусинского угольного бассейна (марка Д). Характеристики исходных углей представлены в таблице 9. Продукты, полученные из углей марки 1Б, 2Б и Д получили названия ПКВД-1Б, ПКВД-2Б, и ПКВД-Д соответственно (полукоксы высокого давления).

Таблица 8 – Характеристики используемого угля

Марка угля	Класс крупности, мм	Влага общая, W^r_t , %	Зольность, A^d , %	Выход летучих веществ, V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
1Б	0-200	42,3	7,9	55,4	13,4
Д	0-300	10,7	10,6	40,5	23,9

Как и для угля марки 2Б, в первую очередь была определена зависимость содержания летучих веществ в получаемом от температуры термообработки. Опыты были выполнены в диапазоне температур 400-600 °С.

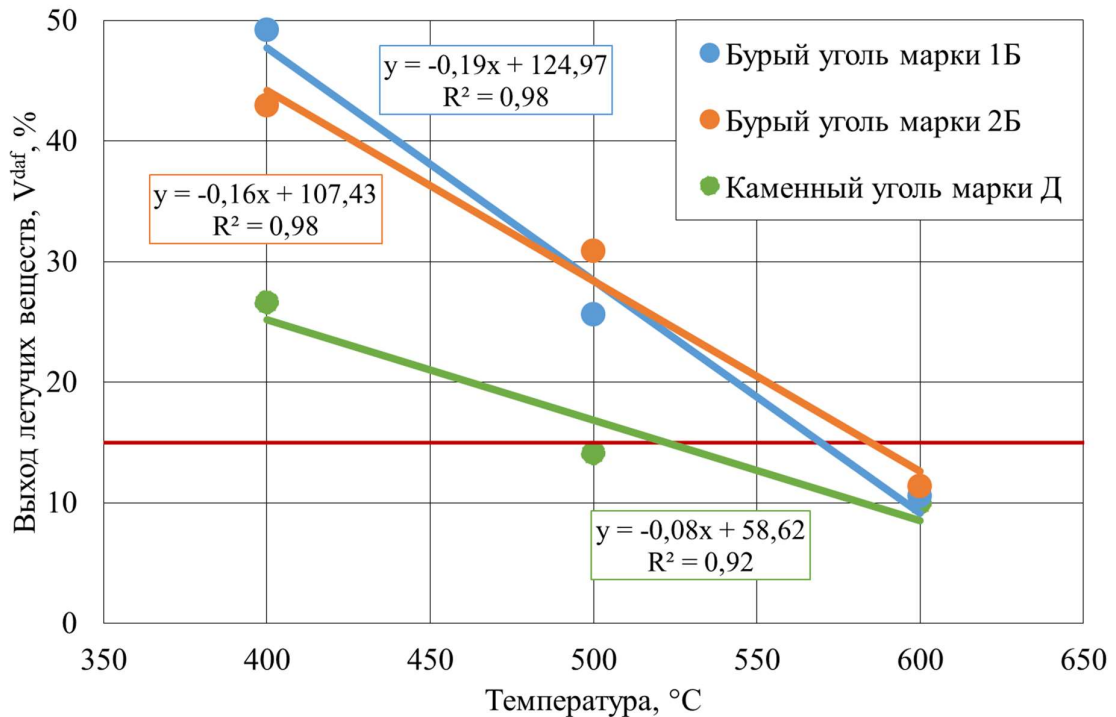


Рисунок 48 – Зависимость содержания летучих веществ в полукоксе от температуры нагрева

В исследуемом диапазоне остаточное содержание летучих веществ в полукоксе с достаточной степенью достоверности характеризуется линейными зависимостями. Результаты представлены на рисунке 48 и в приложении Б. Как следует из представленных результатов, требуемая температура термообработки для углей марки 1Б и 2Б имеет близкое значение и составляет 570 °C. Для угля марки Д этот показатель ниже и его значение составляет 500 °C.

В Главе 2.3.2 было установлено, что при повышении давления термообработки, характеристики получаемого продукта практически не зависят от времени нагрева, а только от давления процесса, поэтому дальнейшие эксперименты производились при минимальном времени нагрева (2,5 часа).

С целью определения влияния режимных параметров процесса на теплотехнические характеристики полукокса были выполнены эксперименты в диапазоне давлений 0,1-4,0 МПа. В качестве ключевых показателей были определены значения прочности, пористости и водопоглощения. Прочность полукокса определяет возможность совершения механических операций

(транспортировки, перегрузки и т.д.), а также сохранение газопроницаемости слоя шихты в металлургических процессах (целевое направление использования разработанного полукокса). 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. С целью снижения влияния неоднородности гранулометрического состава исходного угля на результаты экспериментов, дальнейшие эксперименты производились на углях класса крупности 20-25 мм.

Экспериментально определено, что, хотя механическая прочность исследуемых энергетических углей практически не отличается, наиболее высоким значением обладает уголь марки 1Б. В исследуемом диапазоне кривые прочности имеют квадратичную зависимость от избыточного давления процесса. Установлено (рисунок 49), что для получения полукокса из бурого угля марки 1Б прочность растет с увеличением до 3,0 МПа, после чего рост практически прекращается. Для полукокса из угля марки Д прост прочности прекращается уже на давлении 1,5 МПа. Таким образом, для получения прочного полукокса из угля марки 1Б 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.

На рисунке 50 представлена зависимость объема пор полукокса от давления процесса. Как показано на рисунке, при атмосферном давлении, чем моложе уголь, тем выше пористость полукокса, из него полученного. Однако, уже при давлении 1,5 МПа значение объема пор для полукокса, полученных из всех исследуемых углей, сравнивается и его значение перестает изменяться с дальнейшим ростом давления.

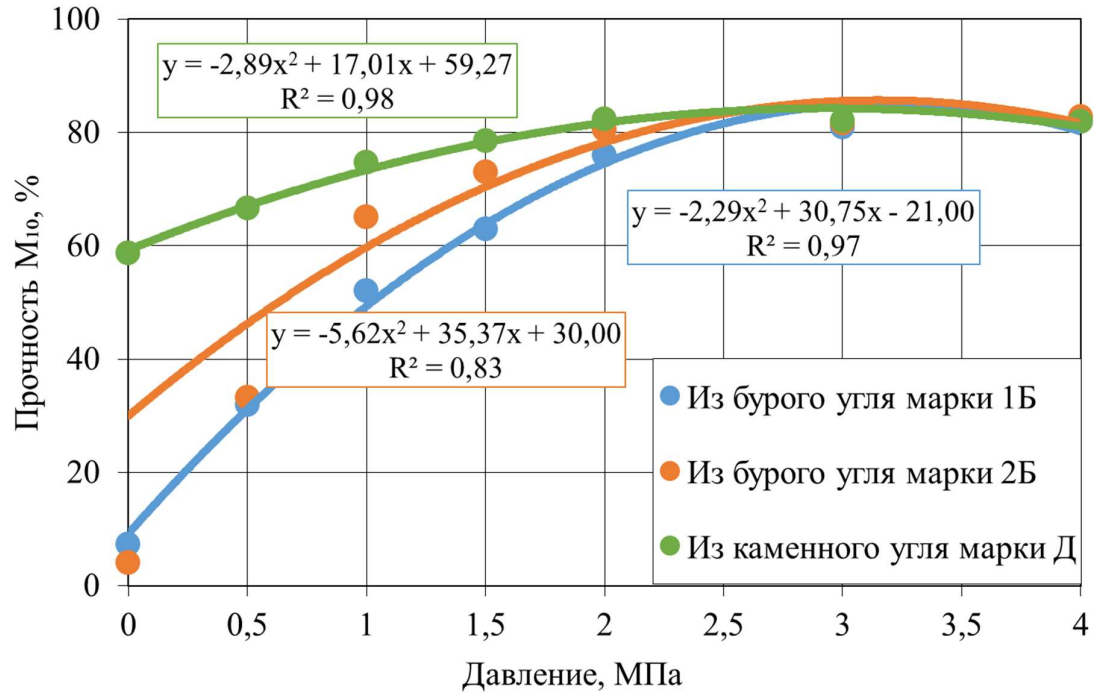


Рисунок 49 – Зависимость прочности M_{10} полукочка от давления процесса для бурых углей (1Б, 2Б) и каменного угля (Д)

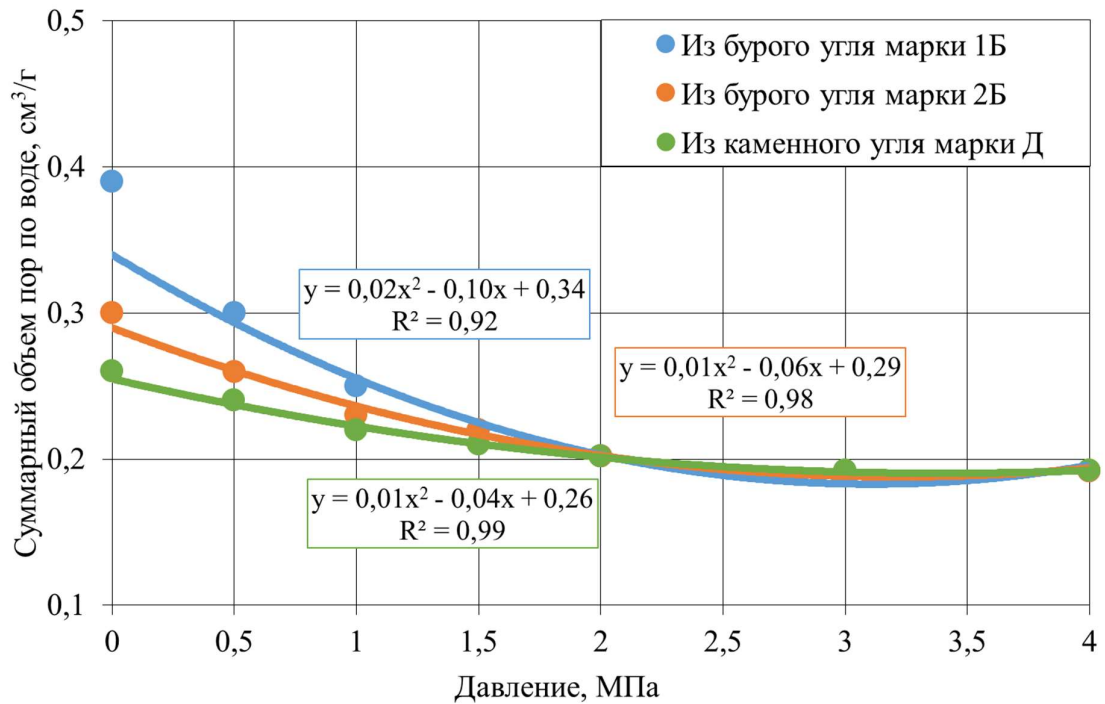


Рисунок 50 – Зависимость суммарного объема пор от давления процесса для бурых углей (1Б, 2Б) и каменного угля (Д)

Для полукокса, полученного из исследуемых марок угля, при атмосферном давлении наибольшее значение водопоглощения соответствует бурому углю марки 1Б, наименьшее – каменному углю марки Д. При увеличении давления до 1,0 МПа значение водопоглощения для полукокса, полученного из различных марок угля, становится почти одинаковым и составляет 6–7 % (рисунок 51).

При дальнейшем увеличении давления снижение водопоглощения незначительно и является нецелесообразным, так как приводит к непропорциональному увеличению металлоемкости аппаратного оформления технологического процесса получения полукокса. Зависимость водопоглощения от избыточного давления процесса в диапазоне 0–1,5 МПа можно с достаточной точностью охарактеризовать квадратичной зависимостью. Для более точного описания зависимости водопоглощения во всем исследуемом диапазоне значений давления требуется использование полиномиальных функций пятой степени.

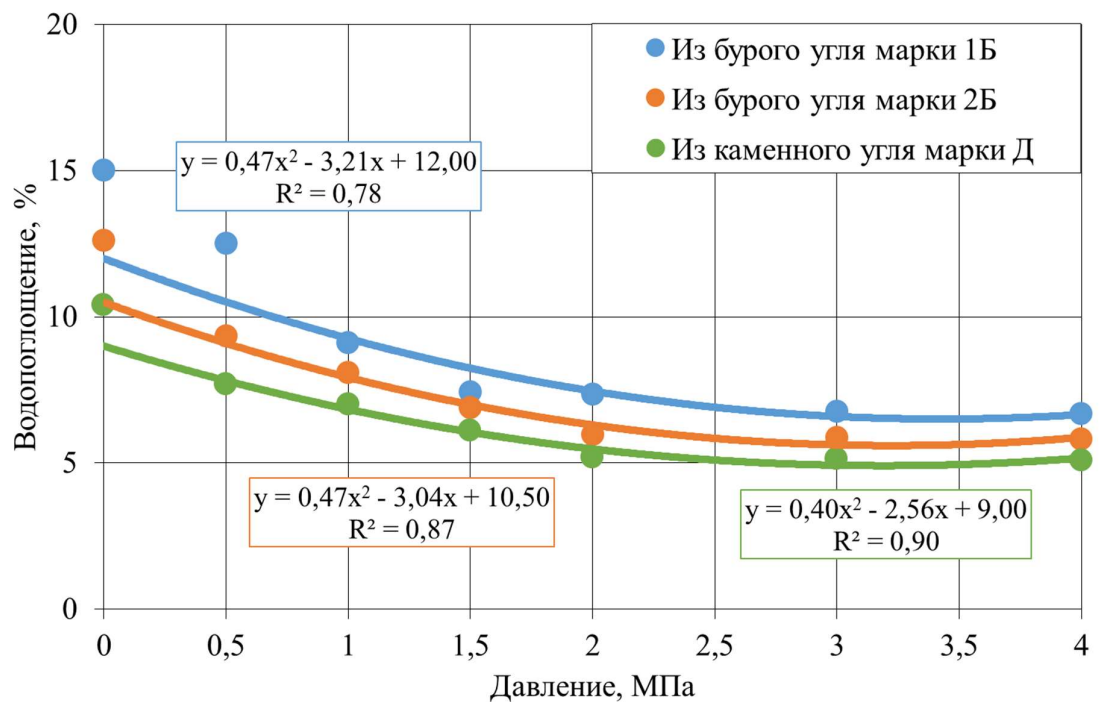


Рисунок 51 – Зависимость водопоглощения полукокса от давления

Таким образом, в качестве оптимальных режимов процесса комбинированного получения 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, 500 °С. В таблице 9 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 восстановителям, используемым в металлургии. По ряду показателей, наиболее близким известным аналогом полученного полукокса является Ленинск-Кузнецкий полукокс П2.

Таблица 9 – Характеристики оптимальных процессов получения полукокса

Параметр	Значение		
	1Б	2Б	Д
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 анализ 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

Продолжение таблицы 9

Средний элементный состав газа, %			
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_2O	69,7	71,8	62,2
Теплота сгорания газа, МДж/кг	6,1	3,85	9,6
Адиабатическая температура сгорания газа, °С	1200	1100	1230

2.3.5. Исследование поверхности частиц термококка, полученного при атмосферном и избыточном давлениях

С целью получения визуального подтверждения снижения объема пор получаемого под давлением термококка было выполнено исследование структуры полукокка, полученного из угля марки 2Б при атмосферном и избыточном давлении 2,0 МПа. Ниже представлены фотографии частиц полукокка при различном разрешении (слева – при атмосферном давлении, справа – при 2,0 МПа).

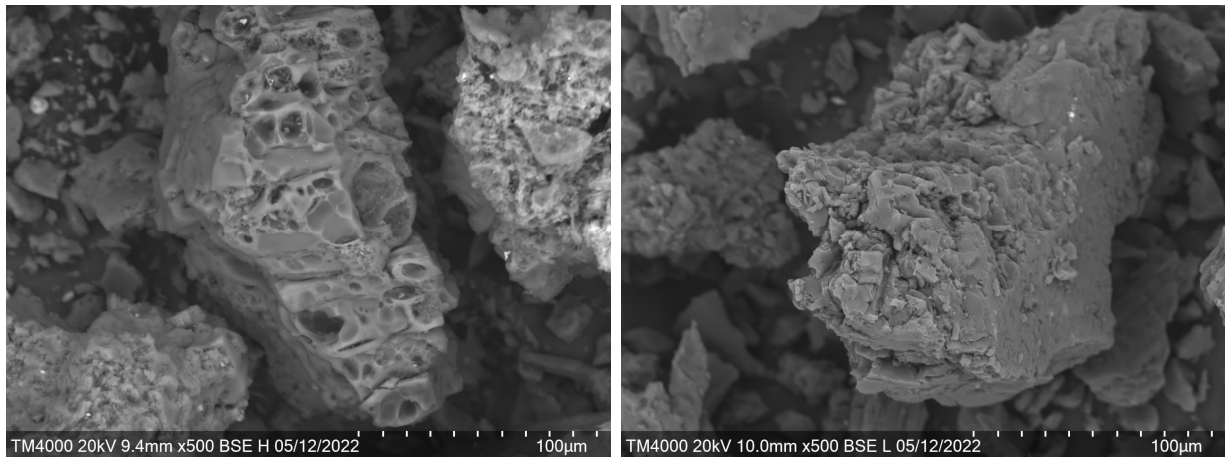


Рисунок 52 – Фотографии частиц полукокка при увеличении в 500 раз

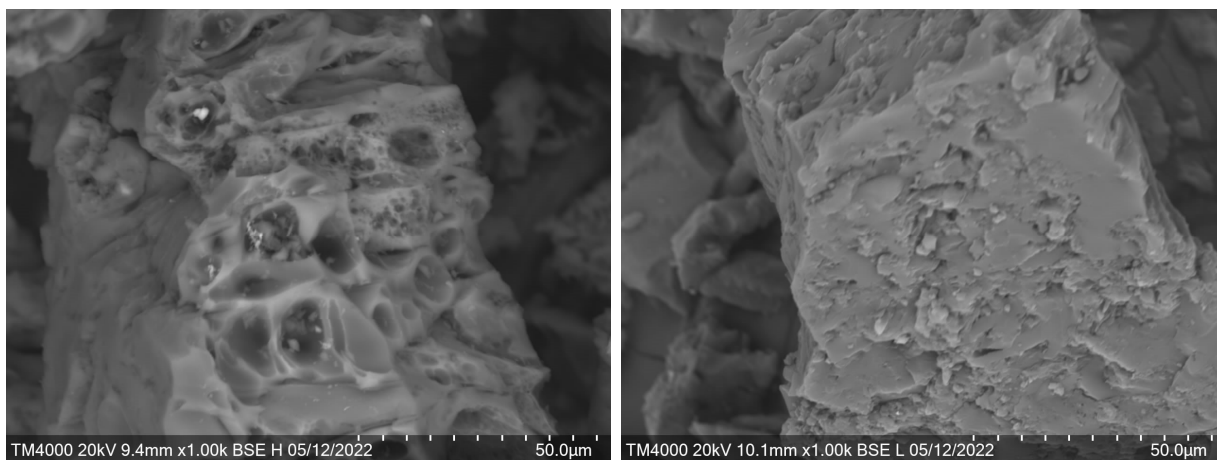


Рисунок 53 – Фотографии частиц полукокса при увеличении в 1000 раз

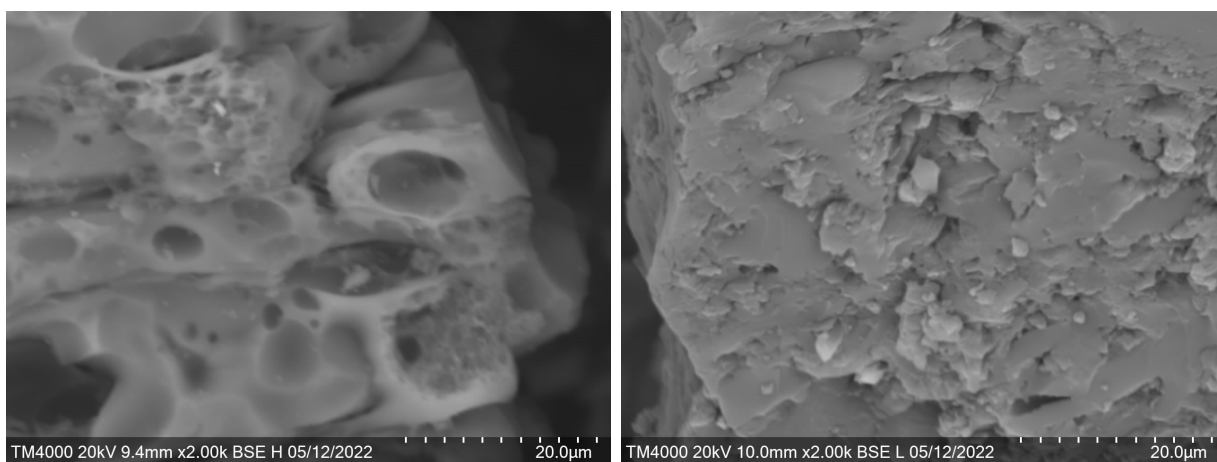


Рисунок 54 – Фотографии частиц полукокса при увеличении в 2000 раз

Представленные данные подтверждают факт, что структура частиц полукокса, полученного при повышенном давлении, существенно менее пористая, чем частиц, полученных при атмосферном давлении.

3 Разработка технологического процесса переработки энергетических углей при повышенном давлении и промышленного реактора для его осуществления

Данная глава посвящена решению задач, связанных с аппаратурным оформлением разработанного технологического процесса. Основным рабочим элементом реактора является труба, заполненная углем, которая снаружи нагревается газовым теплоносителем. Принципиальная схема технологического процесса представляет собой следующий порядок операций. В реактор загружается исходный уголь, после чего в нем создается необходимое давление при помощи внешнего компрессора. Греющий агент – дымовые газы – подаётся в теплообменный контур реакторов, при прохождении через который охлаждается на 50 °С. По мере нагрева из угля начинает испаряться влага и выходить летучие вещества, при этом давление поддерживается на заданном уровне при помощи регулятора давления, через который горючий газ направляется в воздухонагревательную установку для сжигания. По достижении в центре засыпки заданной температуры процесс нагрева завершается, давление сбрасывается и начинается процесс охлаждения полукокса в замкнутом контуре. После охлаждения полученный продукт выгружается из реактора.

Для определения зависимости длительности прогрева засыпки угля от ее диаметра был выполнен тепловой расчет. Полученные данные позволяют установить геометрические характеристики промышленного реактора для любой заданной производительности. На основе предварительных конструкторских проработок была принята конструкция реактора в виде герметичного вертикального сосуда, работающего под давлением (рисунок 55). Реактор состоит из верхнего и нижнего корпусов и трубного пучка. Для загрузки исходного продукта и выгрузки конечного продукта, в верхнем и нижнем корпусах предусмотрены сегментные шаровые клапаны, обеспечивающие герметичность реактора во время работы. Трубный пучок состоит из 31 трубы и двух трубных решеток, крепящихся к верхнему и нижнему корпусам реактора с помощью

фланцевых соединений. Трубный пучок снаружи закрыт кожухом, имеющим вход и выход для газа, нагревающего межтрубное пространство. В верхней части кожуха расположен тканевый температурный компенсатор. Снаружи реактор укрыт теплоизоляционным материалом.

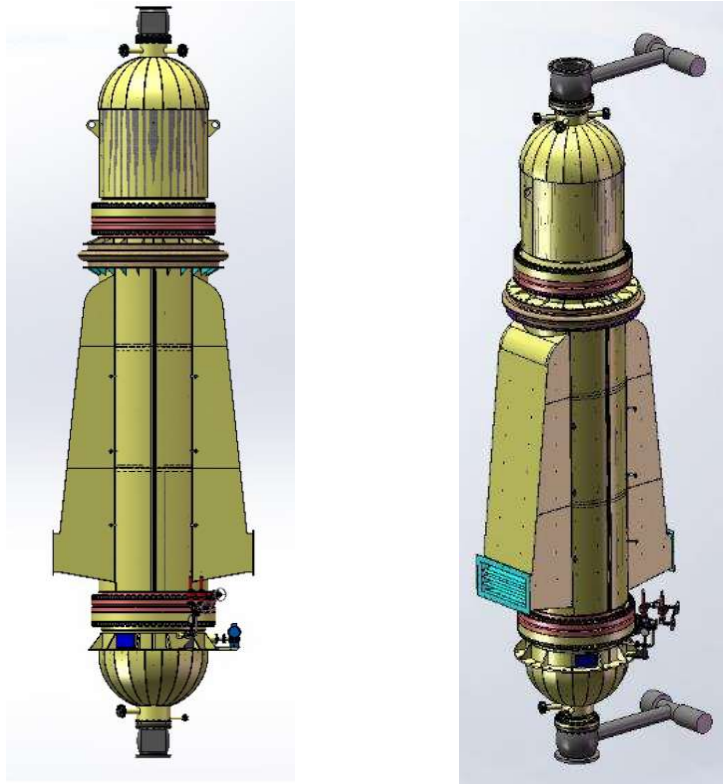


Рисунок 55 – Модель промышленного реактора

3.1. Обработка технологических режимов

Очевидно, что для получения кускового продукта необходимо использовать крупный исходный уголь. В то же время использование чрезмерно крупных классов угля не представляется перспективным, ввиду того, применение крупнокускового угля также накладывает ограничение на аппаратное исполнение технологического процесса и ведет к увеличению линейного размера реактора для исключения зависания в нем материала, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени прогрева засыпки и, соответственно, снижению производительности. В связи с вышесказанным наиболее целесообразным для производства кускового полукокса представляется использование угля класса

крупности 13 – 50 мм, достаточно широкого для минимизации затрат на его подготовку и в то же время граничными размерами частиц, обеспечивающими минимизацию содержания мелочи в продукте и возможного размера реактора нагрева, при обеспечении достаточно большого содержания крупных кусков в продукте для обеспечения удобства его транспортировки навалом в открытых полувагонах. Согласно [100], с целью исключения зависания материала, диаметр трубы реактора должен быть в 3–5 раз больше кусков угля.

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. В качестве сырья использовался уголь марки 2Б разреза «Бородинский им. М. И. Щадова» Канско-Ачинского угольного бассейна класса крупности 13-50 мм.

Технологическая схема производства полукокса представлена на рисунке 56. В реактор *1* помещается исходный уголь, после чего компрессором *2* в нем создается необходимое давление. Далее, при помощи воздуходувки *4* воздух прокачивается через воздухонагреватель *6* и попадает в теплообменный контур реактора, тем самым нагревая засыпку угля. По мере нагрева из угля начинает испаряться влага и выходить летучие вещества, при этом давление поддерживается на заданном уровне при помощи регулятора *9*, через который горючий газ выходит из реактора, предварительно остывая в теплообменнике *8*. На выходе из реактора горючий газ сразу же попадает в дожигатель и после сжигания выбрасывается в атмосферу при помощи дымососа *11* через дымовую трубу *12*. По окончании нагрева с реактора сбрасывается давление и начинается процесс охлаждения. По замкнутому контуру дымовые газы прокачиваются газодувкой *15* через слой засыпки, тем самым охлаждая ее, после чего попадают в теплообменник *14*, где в свою очередь, охлаждаются при помощи атмосферного воздуха. После охлаждения полученный продукт выгружается из реактора.

Фотографии опытного реактора представлены на рисунке 57. Схема движения греющего агента и обозначения термопар приведены на рисунке 58.

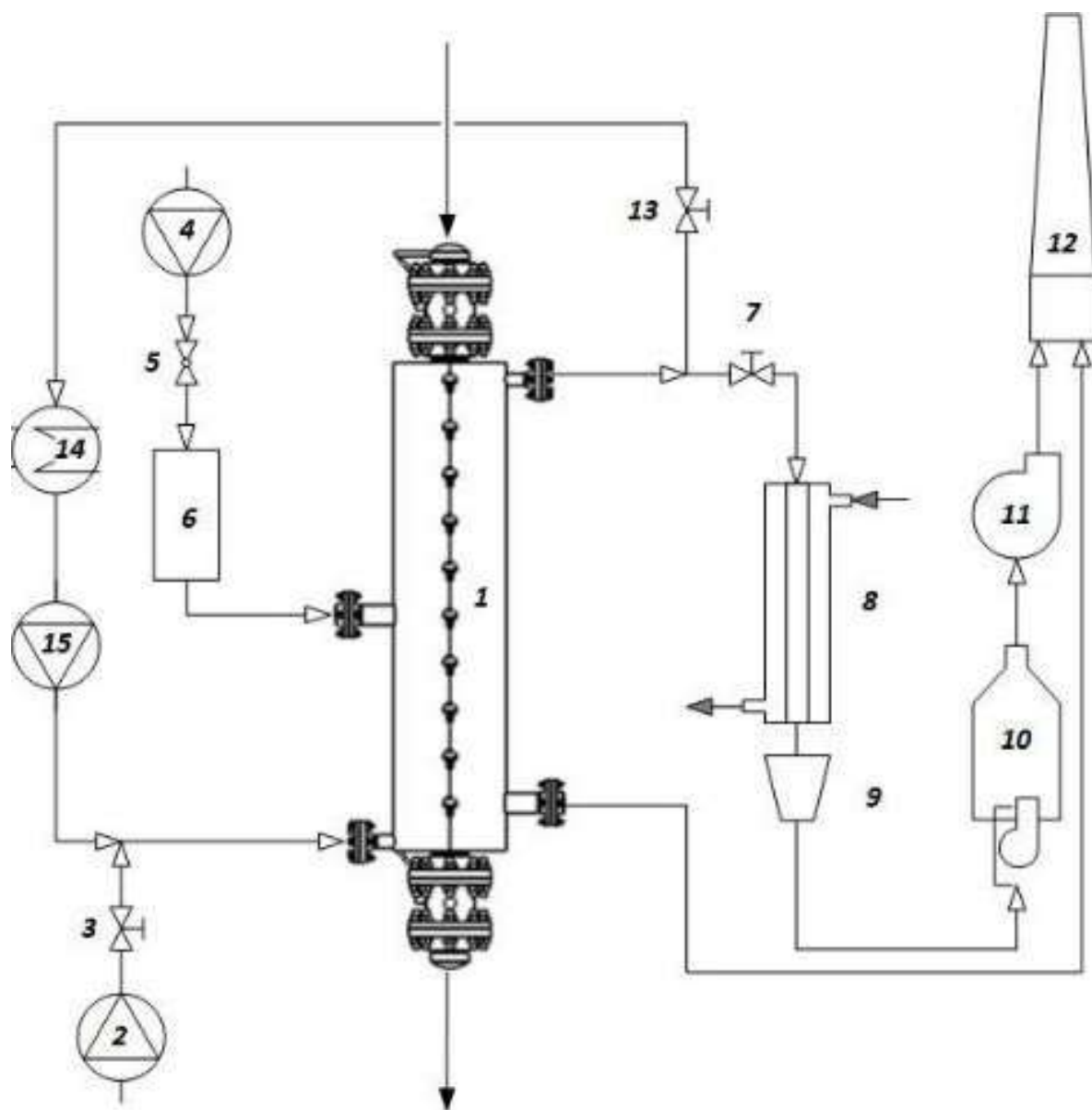


Рисунок 56 – Технологическая схема

- 1 – реактор; 2 – компрессор; 3, 5, 7, 13 – клапаны; 4, 15 – воздуходувки;
 6 – воздухонагреватель; 8 – теплообменник типа «труба в трубе»;
 9 – регулятор давления «до себя»; 10 – дожигатель; 11 – дымосос;
 12 – дымовая труба; 14 – теплообменник



Рисунок 57 – Общий вид опытного реактора

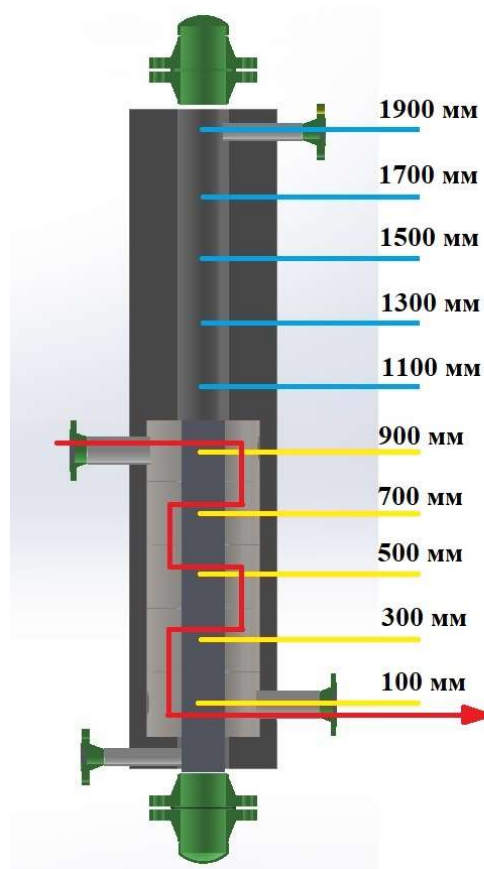


Рисунок 58 – Схема движения греющего агента и размещения термопар

Так как объемная усадка угля 2Б составляет 50 % опытная установка разделена на две равные зоны для увеличения эффективности использования полезного объема. По мере усадки угля при нагреве в обогреваемой (нижней) части, из верхней части в зону нагрева поступает уголь. Таким образом, по окончании нагрева обогреваемая часть реактора заполнена полностью.

Типичная термограмма процесса нагрева с указанными параметрами отображена на рисунке 59. Температура отслеживалась по оси засыпки по всей высоте реактора при помощи термодатчиков типа ТХА. Также отслеживались температуры греющего воздуха на входе в реактор и на выходе из него.

Как следует из рисунка, средняя температура засыпки составила 550 °С, при этом разница температур в нижней и верхней части засыпки почти 200 °С, что приводит к существенной неоднородности продукта несмотря на то, что средние характеристики продукта практически соответствуют изначально установленным требованиям к продукту: выход летучих веществ V^{daf} составил 14,2 %, а прочность на истирание – 69,0 %.

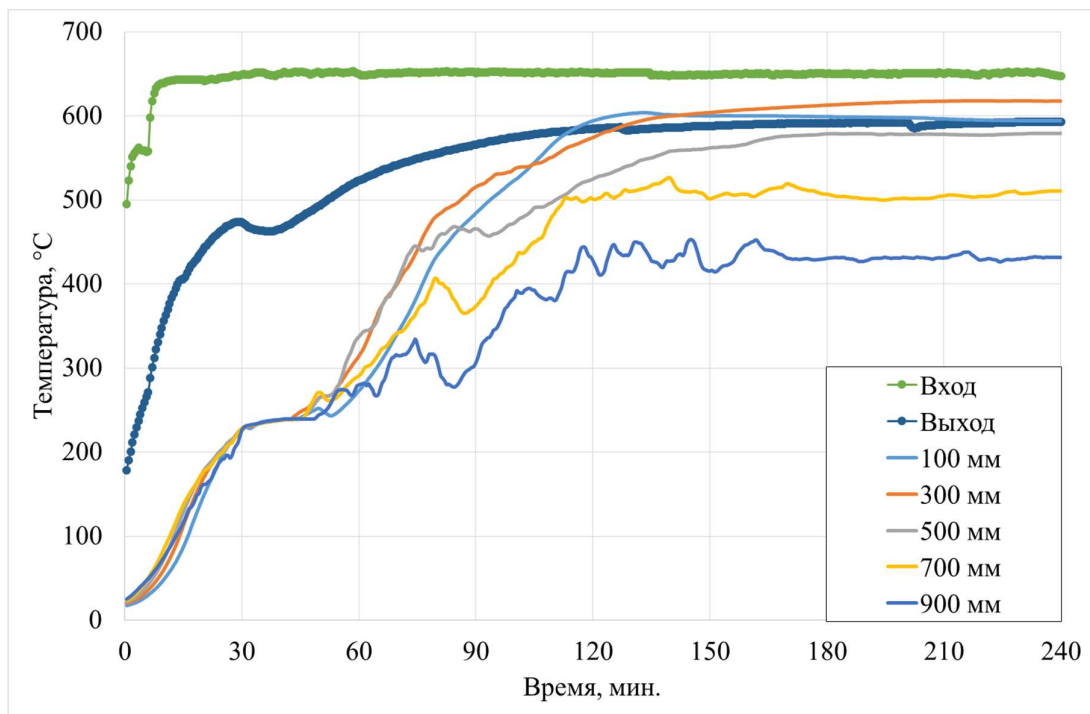


Рисунок 59 – Термограммы процесса полукоксования в разных сечениях реактора

При этом разница содержания летучих веществ в нижней и верхней частях засыпки составляет более 5 %, что ограничивает применение полученного полукокса в металлургии и других областях с высокими требованиями к сырью.

Для обеспечения равномерности прогрева засыпки по высоте реактора необходимо увеличить высоту зоны нагрева. Для определения оптимальной высоты была проведена серия опытов с различным уровнем начальной засыпки. Уровень начальной загрузки был таким, чтобы итоговый уровень полукокса учетом объемной усадки составлял 75 % и на 50 % от высоты зоны нагрева. На рисунке 60 отображен начальный уровень угля (желтая линия) и конечный уровень полукокса (оранжевая линия). Синим цветом обозначены термопары, которые по окончании процесса выходят из зоны засыпки, красным – те, которые находятся. Характеристики полукокса, полученного при указанных режимах представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Характеристики полукокса

Степень заполнения зоны нагрева, %	Влага W^f , %	Зольность A^d , %	Выход летучих веществ V^{daf} , %	Прочность на истирание, M_{10} , %
100	0,4	5,8	14,2	69,0
75	0,4	5,9	12,6	71,3
50	0,3	5,8	12,2	72,4

Как показали эксперименты, оптимальная высота засыпки составляет 75 % от полного объема опытного реактора, поскольку характеристики полученного полукокса не имеют существенных различий по высоте засыпки, при этом чем меньше зона нагрева, тем дешевле в итоге получится промышленный реактор.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что в промышленном реакторе зона нагрева должна составлять не 50 % от высоты, как в опытном, а 65 %. При такой высоте зоны нагрева объем реактора будет использован полностью, а разброс характеристик по высоте – минимальным. Термограммы нагрева с 75 % и 50 % представлены на рисунках 61 и 62.

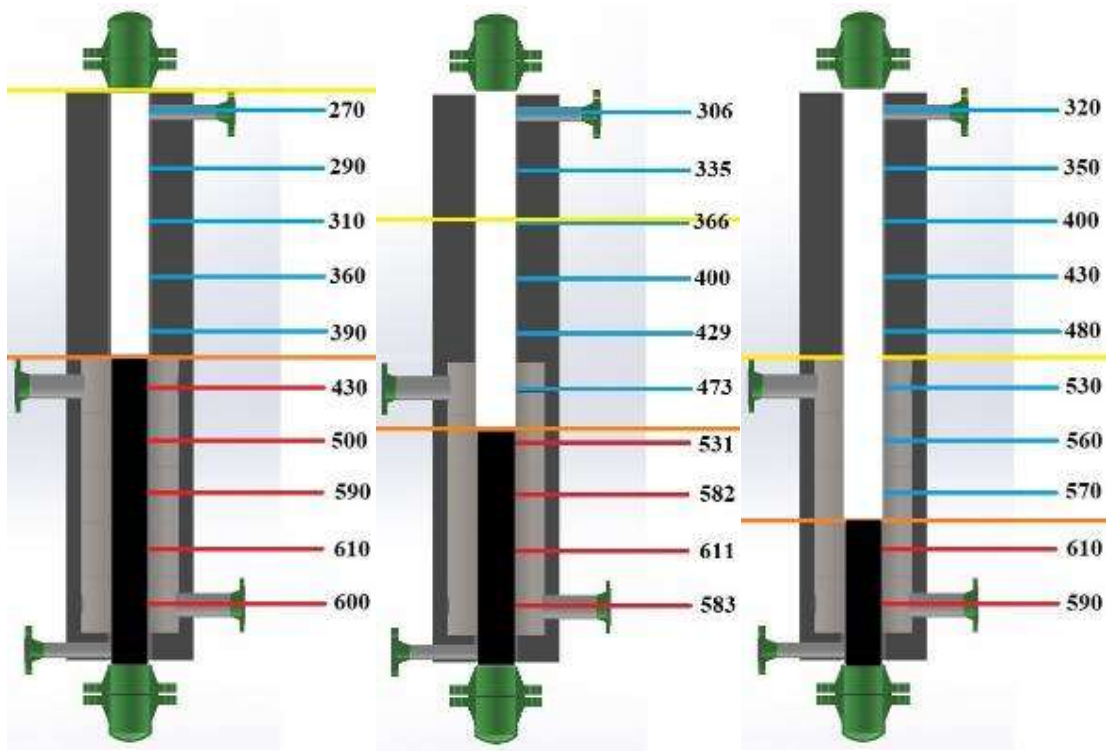


Рисунок 60 – Засыпка реактора углем (слева 100 %, середина – 75 %, справа 50 %)

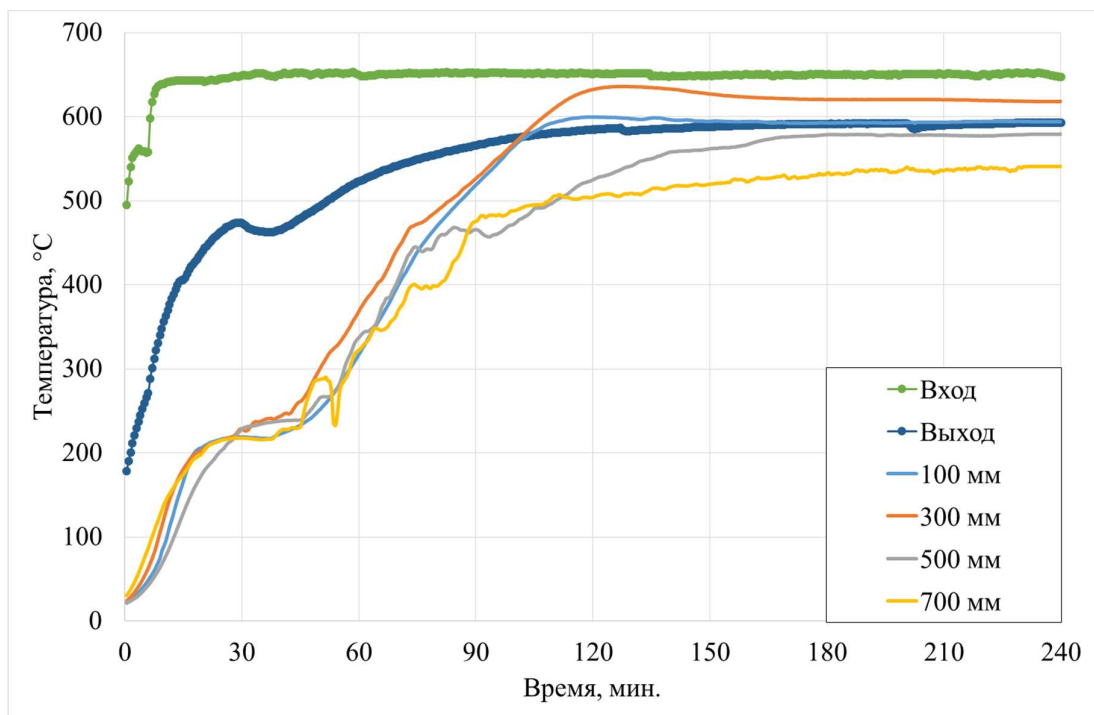


Рисунок 61 – Термограммы нагрева полукокса с 75 % заполнением реактора

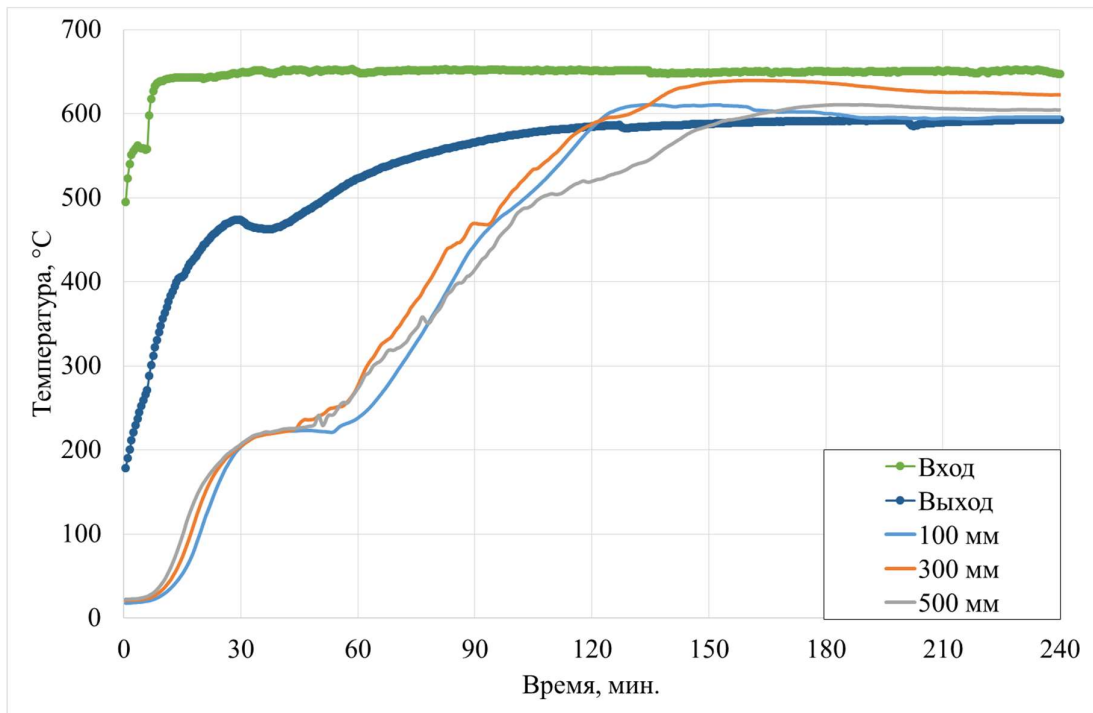


Рисунок 62 – Термограммы нагрева полукокса с 50 % заполнением реактора

На основе полученных данных принимается необходимое время нагрева при оптимальном заполнении реактора равное 180 минут. Материальный и тепловой балансы процесса переработки угля под давлением на 1 т исходного угля представлены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11 – Материальный баланс процесса получения полукокса

Материальный баланс процесса		т
Уголь		1
<i>Итого приход</i>		1
Полукокс		0,5
Газ		0,5
<i>Итого расход</i>		1

Таблица 12 – Тепловой баланс процесса получения полукокса

Тепловой баланс процесса	ГДж	%
Теплота сгорания угля	17,6	93,6
Теплота на нагрев угля до заданной температуры	1,2	6,4
<i>Итого приход:</i>	18,8	100,00
Теплота сгорания полукокса	14,8	79,2
Теплота сгорания газа	2,0	10,5
Энтальпия влажного газа	1,2	6,3
Энтальпия полукокса при конечной температуре	0,4	2,0
Теплопотери	0,4	2,0
<i>Итого расход:</i>	19,2	100,0

3.2. Расчет нагрева

Теперь необходимо формализовать довольно сложную задачу нагрева засыпки угля под давлением через стенку газовым теплоносителем. Так как прогрев засыпки внутри реактора в данном 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 общем случае дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad (1)$$

Граничные и начальные условия:

При $\tau=0$ и $0 \leq r \leq r_0$

$$\Theta = \Theta_0 = f(r) - t_{\text{ж}} = F(r);$$

При $\tau=0$ и $r = 0$

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial r}\right)_{r=0} = 0;$$

При $\tau>0$ и $r = r_0$

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial r}\right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} \Theta_{r=r_0};$$

Частное решение уравнения (1) имеет вид

$$\Theta(r, \tau) = C e^{-\mu^2 \frac{\alpha \tau}{r_0^2}} J_0\left(\mu \frac{r}{r_0}\right), \quad (2)$$

Постоянная μ в уравнении (2) определяется из граничных условий ($r=r_0$), решение которых приводит к характеристическому уравнению

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi'} \quad (3)$$

где $J_1(\mu)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

В безразмерной форме значение температуры центра и поверхности цилиндра для любого момента времени будет иметь вид:

$$\Theta_{\text{ц}} = N_0(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (4)$$

$$\Theta_{\text{п}} = P_0(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (5)$$

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.

Коэффициент теплопроводности определяли на лабораторном реакторе. Эксперимент производили со следующими исходными данными:

- начальная температура центра засыпки угля – 20 °С;
- конечная температура центра засыпки – 570 °С;
- высота реактора – 0,47 м;
- диаметр реактора – 0,1 м;
- масса загрузки угля – 1,5 кг;

- влажность угля – 34 %;
- избыточное давление нагрева – 2,0 МПа.

На рисунке 63 приведена термограмма нагрева центра засыпки.

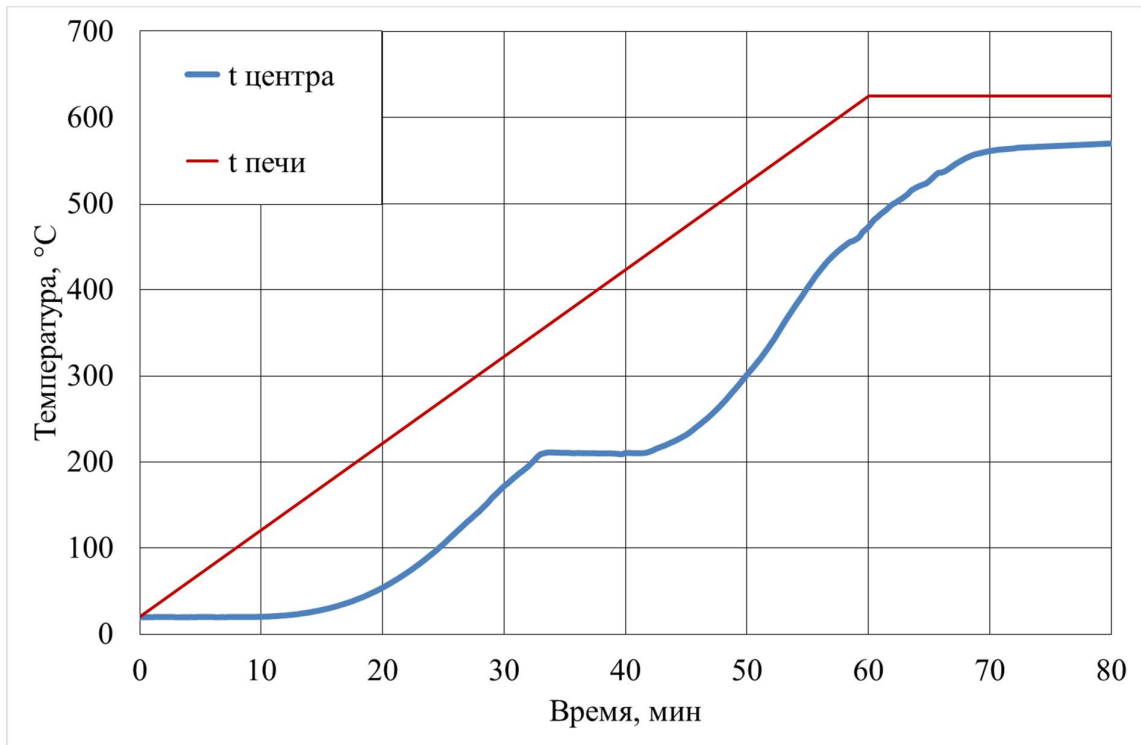


Рисунок 63– Термограмма нагрева угольной засыпки

Как показано на рисунке 63, время, необходимое для нагрева центра засыпки, составило 80 минут.

Процесс нагрева можно разделить на три этапа: нагрев сырого угля до температуры кипения воды (в нашем случае – 215 °C), испарение воды и нагрев сухого угля до конечной температуры. Тогда полное количество теплоты, затраченной на нагрев, можно выразить следующим образом, кДж:

$$Q = c_1 m_1 \Delta T_1 + L m_2 + c_3 m_3 \Delta T_3, \quad (6)$$

где c_1 – средняя удельная теплоёмкость сырого угля, кДж/(кг·К) (интерполяция данных [101]):

$$c_1 = (2,0224589 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 - 5,3353217 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 5,2978728 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,2655537) \cdot 4,187.$$

Эффективное значение c_1 в диапазоне температур 20–215 °C составило 1,34 кДж/(кг·К).

L – теплота парообразования воды, при избыточном давлении 2,0 МПа ее значение составляет 1 878 кДж/кг.

c_3 – средняя удельная теплоёмкость сухого угля (полукокса), кДж/(кг·К) (интерполяция данных [1]):

$$c_3 = (0,2 + 3,67 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,29 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \cdot 4,187.$$

Эффективное значение c_3 в диапазоне температур 215–570 °С составило 1,37 кДж/(кг·К). Подставив значения в (6), получим:

$$Q = 1,34 \cdot 1,5 \cdot 195 + 1\,878 \cdot 0,51 + 1,37 \cdot 0,99 \cdot 355 = 1,831 \text{ кДж}.$$

С другой стороны, согласно закону Фурье, количество теплоты dQ_τ , проходящее через единицу изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$ пропорционально температурному градиенту:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau, \quad (7)$$

Тогда полное количество теплоты, подведенное к реактору, составляет:

$$Q = \frac{\lambda}{r} \Delta T F \tau. \quad (8)$$

Коэффициент теплопроводности согласно (8):

$$\lambda = \frac{Qr}{\Delta T F \tau} = \frac{Qr}{\Delta T \cdot 2\pi r l \tau}. \quad (9)$$

Подставив значение в (9), получим эффективный коэффициент теплопроводности для условного материала, в виде которого представлена засыпка бурого угля марки 2Б:

$$\lambda = \frac{1\,831 \cdot 0,05}{550 \cdot 2 \cdot 3,141 \cdot 0,05 \cdot 0,47 \cdot 4800} = 0,235 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Эффективный коэффициент температуропроводности можно выразить через эффективный коэффициент теплопроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (10)$$

Насыпную плотность засыпки определяли согласно ГОСТ 32558-2013 (ISO 23499:2008). Начальная плотность условного материала, в виде которого представлена засыпка (до нагрева), составляет 600 кг/м³, конечная (после нагрева)

– 500 кг/м³. Подставив среднее значение плотности и среднее значение удельной теплоемкости, получим:

$$a = \frac{0,235}{1\,350 \cdot 550} = 0,319 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Аналогичным образом были получены эффективные значения коэффициентов теплопроводности засыпки бурого угля марки 1Б и каменного марки Д. Результаты экспериментального определения коэффициентов представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Эффективные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности угольной засыпки при нагреве

Значение	Марка угля		
	1Б	2Б	Д
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К)	0,205	0,235	0,405
Коэффициент температуропроводности, $a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	0,278	0,319	0,423

Зная начальную температуру засыпки, а также обеспечив заданную температуру греющего агента, используя численную модель процесса нагрева угольной засыпки, можно определить температуру засыпки в любой момент времени и, соответственно, время, необходимое для нагрева реактора любого диаметра до заданной температуры.

Так, например, для опытного реактора диаметром 150 мм определено расчетное время нагрева бурого угля марки 2Б – 171 минута.

Расчет производили со следующими исходными данными:

- начальная температура засыпки ($T_{\text{нач}}$) – 20 °С;
- конечная температура центра засыпки – 570 °С;
- высота засыпки – 1,5 м;
- диаметр реактора – 0,15 м;
- насыпная плотность угля – 600 кг/м³;
- масса загрузки угля – 15,9 кг;
- влажность угля – 31,4 %;
- избыточное давление нагрева – 2,0 МПа;

Температура центра засыпки в любой момент времени определяется как:

$$T = T_{га} + \theta_{ц} (T_{нач} - T_{га}), \quad (11)$$

где $T_{га}$ – средняя температура греющего агента в настоящий момент времени, °С. Значение средней температуры теплоносителя определяли интерполяцией экспериментальных данных:

при $\tau < 1830$ с $T_{га} = 0,0126569933 \cdot \tau^3 - 0,9313898354 \cdot \tau^2 + 24,466809998 \cdot \tau + 326,1960693962$;

при $\tau \geq 1830$ с $T_{га} = -0,0030198342 \cdot \tau^2 + 1,0650034095 \cdot \tau + 531,1542405072$.

Безразмерные температуры центра и стенки определяли из (12) и (13) соответственно. Функции $N_0(Bi)$, $P_0(Bi)$ и μ_1 определялись интерполяцией данных номограмм [97]:

Получены следующие функциональные зависимости $P_0(Bi)$:

при $Bi < 1$ $P_0 = 0,0022417413 \cdot Bi^3 + 0,0237435772 \cdot Bi^2 - 0,251732306 \cdot Bi + 1,000096394$;

при $1 \leq Bi < 10$ $P_0 = -0,0009967382 \cdot Bi^3 + 0,024410807 \cdot Bi^2 - 0,2227384276 \cdot Bi + 0,9690189974$;

при $10 \leq Bi \leq 100$ $P_0 = -0,0000008024 \cdot Bi^3 + 0,0001631776 \cdot Bi^2 - 0,0107971252 \cdot Bi + 0,2632258898$.

Получены следующие функциональные зависимости $N_0(Bi)$:

при $Bi < 1$ $N_0 = 0,0086097817 \cdot Bi^3 - 0,053610987 \cdot Bi^2 + 0,2531784486 \cdot Bi + 0,9996035573$;

при $1 \leq Bi < 10$ $N_0 = 0,0010188868 \cdot Bi^3 - 0,0230378185 \cdot Bi^2 + 0,179808335 \cdot Bi + 1,0590389665$;

при $10 \leq Bi \leq 100$ $N_0 = -0,0000086843 \cdot Bi^2 + 0,0012292104 \cdot Bi + 1,5651144858$

Получены следующие функциональные зависимости $\mu_1(Bi)$:

при $Bi < 1$ $\mu_1 = 1,9995367395 \cdot Bi^3 - 3,988414047 \cdot Bi^2 + 3,1482808138 \cdot Bi + 0,1272078332$;

при $1 \leq Bi < 10$ $\mu_1 = 0,0026176258 \cdot Bi^3 - 0,0574269136 \cdot Bi^2 + 0,4417913758 \cdot Bi + 0,9067145617$;

при $10 \leq Bi \leq 100$ $\mu_1 = -0,0000400105 \cdot Bi^2 + 0,0059511063 \cdot Bi + 2,167443278$

Число Bi определяется по формуле:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda} \quad (12)$$

Коэффициент теплоотдачи α при нагреве реактора воздухом определяется по формуле для поперечного омывания одиночных труб:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{га}}{d} \quad (13)$$

где $\lambda_{га}$ – коэффициент теплопроводности греющего агента при средней температуре, определялся интерполяцией справочных данных [102]:

$$\lambda_{га} = -0,0000000152 \cdot T_{га}^2 + 0,0000714822 \cdot T_{га} + 0,0250479052.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{га} \cdot d_{экв}}{\nu_{га}} \quad (14)$$

где $\nu_{га}$ – кинематическая вязкость греющего агента при средней температуре, определялся интерполяцией справочных данных [102]:

$$\nu_{га} = 0,0000639838 \cdot T_{га}^2 + 0,1015920107 \cdot T_{га} + 12,2475710040;$$

$d_{экв}$ – эквивалентный диаметр, конструктивно зависящий от площади сечения канала ($S_k = 0,033 \text{ м}^2$), по которому подается греющий агент. В нашем случае его значение равно 0,206 м.

Скорость греющего агента $V_{га}$ определяется как отношение объемного расхода греющего агента при средней температуре к площади сечения канала:

$$V_{га} = \frac{G_{об.г.а.}}{S_k} \quad (15)$$

Объемный расход греющего агента при средней температуре определяется по формуле:

$$G_{об.г.а.} = \frac{G_{масс. г.а.}}{\rho_{г.а.н.у.}} \left(\frac{273,15 + T_{га}}{273,15} \right) \quad (16)$$

Массовый расход греющего агента можно определить из необходимого количества теплоты на нагрев засыпки:

$$G_{\text{масс. г.а.}} = \frac{Q}{c\Delta T\tau} \quad (17)$$

Число Нуссельта рассчитывается по формуле:

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,6} Pr_{\text{ж}}^{0,33} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \quad (18)$$

Выполнение расчета по формулам (19)–(26) позволяет определить температуру центра засыпки в течении всего эксперимента (Приложение В).

Расчетное время нагрева центра засыпки до 570 °С составляет 171 минуту. Экспериментально определенное время для нагрева засыпки на опытном реакторе составило 180 минут (Рисунок 64), что подтверждает достоверность созданной модели. Погрешность определения длительности нагрева составляет 5,3 %.

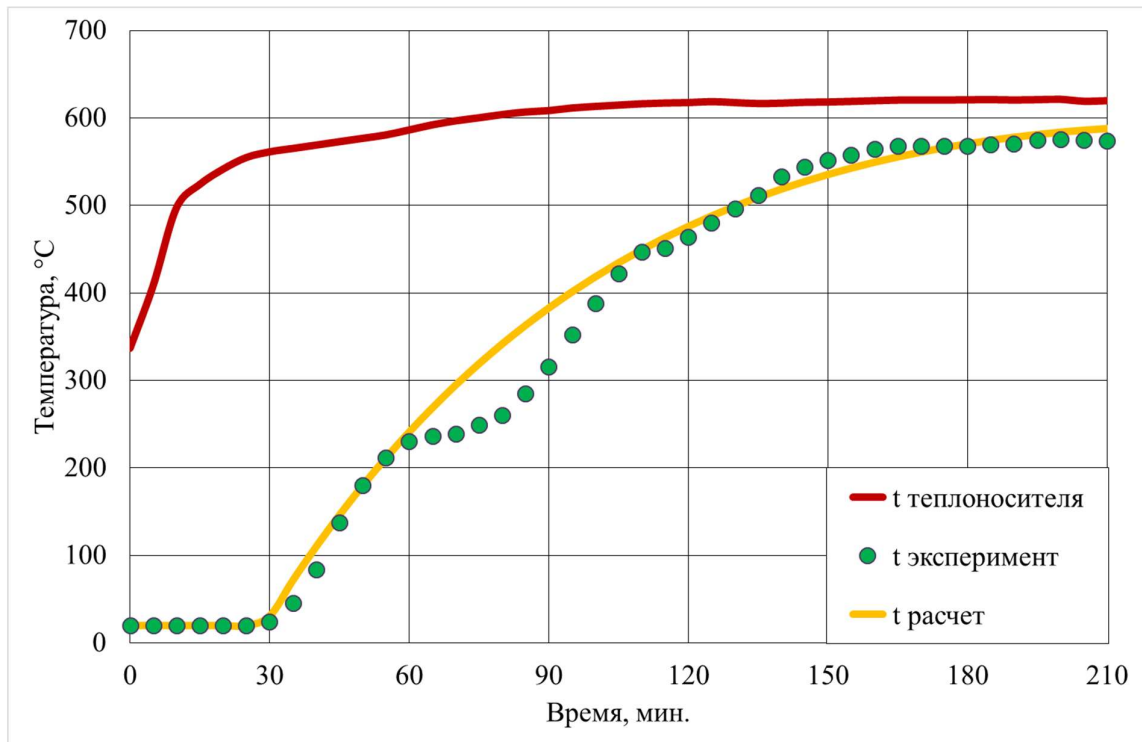


Рисунок 64 – Сравнение экспериментальных данных с расчетом

Таким образом, определенные коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, режимные параметры и использование численной модели позволяют определить производительность промышленного реактора.

Стоит отметить, что расход ограничен конструктивным расположением труб реактора. Аэродинамическое сопротивление потока не должно превышать 800 Па, что соответствует техническим возможностям существующих на сегодняшний день эксгаустеров (высокотемпературных промышленных вентиляторов).

3.3. Определение диаметра трубы реактора

С целью моделирования процесса термической усадки угольной засыпки в промышленном реакторе и исключения возможности зависания угля была разработана модель части промышленного реактора в полный размер (рисунок 65). Диаметр труб принят 150 мм.

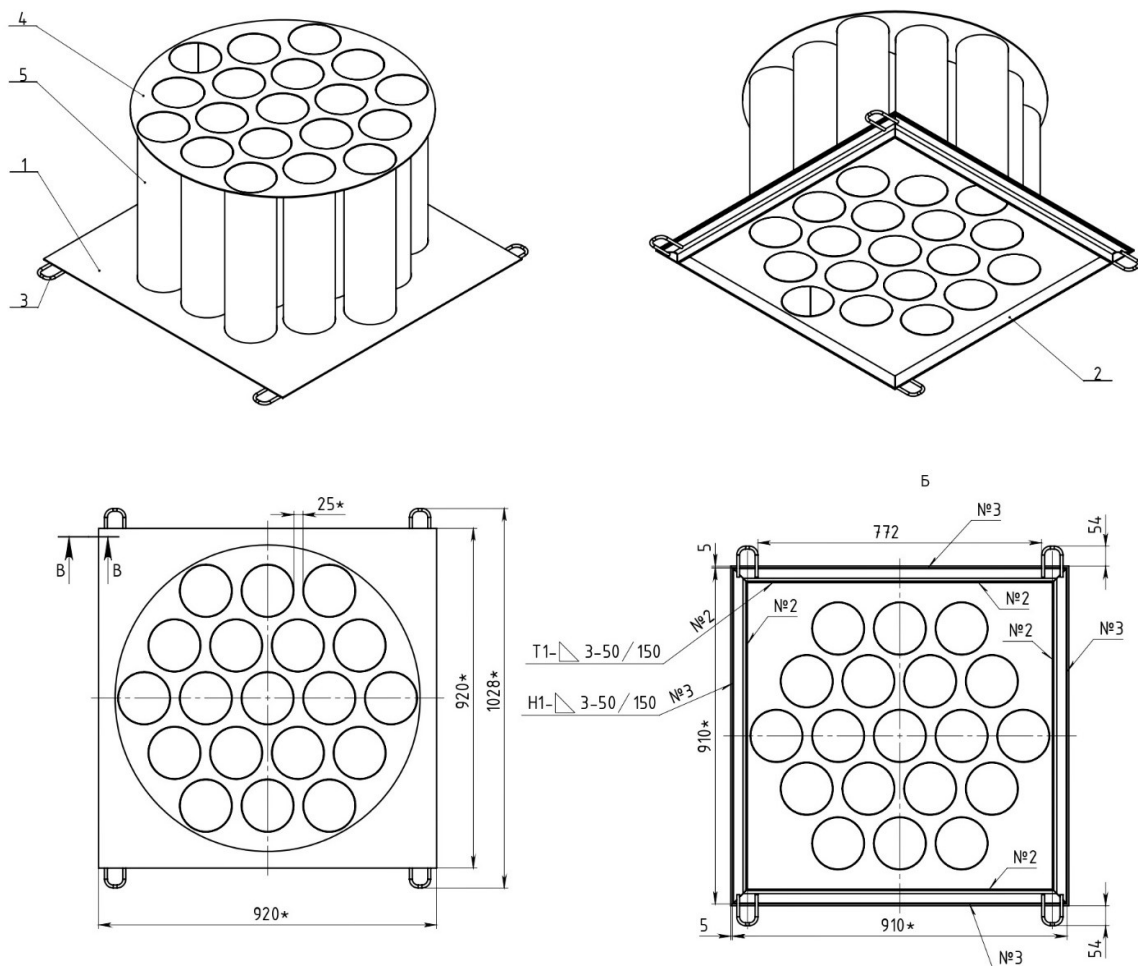


Рисунок 65 – Чертеж трубной решетки

Установка представляет собой бункер, в который установлена трубная решетка на расстоянии 1 м от верхнего края. Под бункером размещен транспортер, который позволит смоделировать процесс термической усадки в реакторе посредством плавного удаления угля из нижней части бункера. Внешний вид бункера представлен на рисунке 66.

Уголь засыпали сверху таким образом, чтобы часть бункера, расположенная над трубной решеткой, была заполнена полностью. При засыпке угля из биг-бэгов зависания не возникло, уголь спокойно просыпался через трубную решетку (рисунок 67).

Однако, при выгрузке угля из бункера с помощью транспортера, обнаружилось, что на входе в трубы образовались своды и произошло зависание. Уголь не поступал ни через одну трубу.

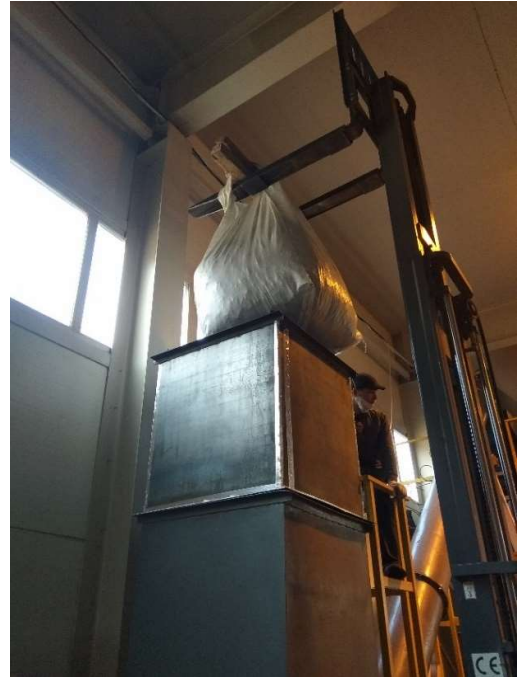


Рисунок 66 – Внешний вид бункера (справа – в процессе засыпки угля)



Рисунок 67 – Бункер (слева – до засыпки углем, справа – полностью заполненный)

С целью исключения зависания стэнд был доработан: на трубы были установлены воронки, для чего пришлось увеличить расстояние между трубами (рисунок 68).



Рисунок 68 – Воронки (слева – фотография воронки, справа – фотография трубной решетки с воронками)

Эксперимент был повторен и в ходе него уголь просыпался через трубную решетку, однако над некоторыми воронками также образовался свод и, как следствие, произошло зависание угля. Как показано на рисунке 69, уголь в течении большей части эксперимента просыпался только через несколько труб, расположенных в центре решетки. Ближе к концу эксперимента стало видно, что над крайними трубами образовался свод, при этом зависания угля в трубах не обнаружено, зависает уголь только над трубами. При практически полном опустошении бункера обсыпался свод с большей части труб (рисунок 68, справа).

Так как использование какого-либо ворошителя, расположенного над трубами, в реакторе под давлением является технически сложной и дорогой задачей, то наиболее перспективным решением указанной проблемы является увеличение диаметра труб.

Увеличение диаметра до 180 мм не позволило полностью решить указанную проблему, в крайних трубах также произошло зависание. Увеличение диаметра до 200 мм и проведение нескольких повторных экспериментов показало, что такой диаметр труб устраняет проблему зависания угля над трубной решеткой.



Рисунок 69 – Трубная решетка с воронками в процессе эксперимента

По полученным ранее расчетным и экспериментальным данным нагрев опытного реактора с температурой греющего агента $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и диаметром трубы 150 мм длится 3 часа. Были пересчитаны коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и произведен расчет нагрева промышленного реактора за указанное время. При нагреве реактора с трубами диаметром 200 мм с сохранением массы загрузки и размера реактора (за счет уменьшения количества труб) общее время процесса составляет 5 ч 20 минут.

В результате проведенных исследований, все определенные во второй и третьей главах параметры технологического процесса были использованы в качестве исходных данных для разработки промышленного реактора.

3.4. Разработка промышленного реактора

С целью выполнения экономического расчета комплекса производства полукокса под давлением в части определения стоимости промышленного реактора была разработана конструкторская документация на такой реактор.

Модель реактора представлена в начале настоящей Главы на рисунке 55. Основные характеристики реактора представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные характеристики реактора

Наименование характеристики	Значение характеристики
Рабочее давление, МПа	2,1
Расчетное давление, МПа	2,1
Пробное давление гидравлического испытания, при температуре 20°C, МПа	3,8
Рабочая температура стенок труб реактора, °C	650
Расчетная температура стенок труб реактора, °C	650
Рабочая температура стенки верхнего корпуса реактора, °C	500
Расчетная температура стенки верхнего корпуса реактора, °C	500
Рабочая температура стенки нижнего корпуса реактора, °C	400
Расчетная температура стенки нижнего корпуса реактора, °C	400
Исходный продукт: уголь класса крупности, мм	13...50
Объем загрузки исходного продукта, м ³	19,6
Конечный продукт: кусковой полукокс крупности, мм	0...30
Объем выгрузки конечного продукта, м ³	9,8
Греющий/охлаждающий агент	Дымовые газы
Температура греющего агента, °C	650
Температура охлаждающего агента, °C	50
Расход греющего агента, м ³ /ч	70000
Расход охлаждающего агента, м ³ /ч	9000
Длительность процесса термообработки, ч	5,3
Мах расход сухого газа, м ³ /ч	300
Мах температура сухого газа, °C	400
Температура эксплуатации реактора, °C	-40...+40
Назначенный срок службы, лет	10

Группа аппарата по таблице 1 ГОСТ 34347-2017	2
Группа рабочей среды по ТР ТС 032/2013	2
Масса реактора, т	55,49
Масса реактора с полной загрузкой, т	67,25
Габаритные размеры, мм:	
Длина	4225
Высота	13927
ширина	3329

Реактор представляет собой герметичный вертикальный сосуд, состоящий из верхнего корпуса, трубного пучка и нижнего корпуса. Для загрузки исходного продукта и выгрузки конечного продукта, вверху верхнего корпуса и внизу нижнего корпуса установлены сегментные шаровые клапаны(затворы), обеспечивающие герметичность реактора во время работы. Трубный пучок состоит из 55 труб D220x10 и двух трубных решеток, крепящихся к верхнему и нижнему корпусам реактора с помощью фланцевых соединений, на нескольких трубах установлены термопары. Верхний корпус реактора имеет патрубки для создания давления внутри реактора и выхода дымовых газов в процессе работы. Продувка воздухом (охлаждение продукта) после окончания рабочего цикла происходит через нижний и верхний затвор. Нижний корпус реактора имеет запорное устройство, препятствующее попаданию в него продукта реакции во время рабочего цикла, блок предохранительных клапанов и патрубков выхода подсмольной воды. Также нижний корпус имеет опорную часть, служащую для крепления реактора к опорной раме(фундаменту) по месту установки реактора.

Трубный пучок снаружи закрыт кожухом, имеющим вход и выход для газа, нагревающего межтрубное пространство. На входе и выходе газа в кожухе имеются термопары. В верхней части кожуха расположен тканевый температурный компенсатор. Снаружи реактор укрыт теплоизоляционным материалом. Материал самого реактора – нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т. Принципиальная схема устройства реактора представлена на рисунке 70.

Для загрузки угля в реактор открывается верхний сегментный (шаровый) клапан. Нижний сегментный клапан при этом закрыт. Уголь заполняет внутритрубное пространство трубного пучка и внутреннюю полость верхнего корпуса. Запорное устройство в нижней части реактора находится в положении закрыто, препятствуя попаданию угля в нижний корпус реактора. После загрузки угля верхний сегментный клапан закрывается. В верхний корпус, трубное пространство пучка и нижний корпус подается воздух, создавая давление 2,1 МПа, а в межтрубное пространство трубного пучка, ограниченного кожухом, подаются дымовые газы, нагретые до температуры 650 °С. Процесс нагрева угля через стенку при рабочем давлении 2,1 МПа продолжается 5 часов 20 минут. Контроль температуры нагревающих межтрубное пространство газов и угля в трубном пространстве осуществляется с помощью датчиков температуры, установленных на входе и выходе теплоносителя в межтрубном пространстве и внутри труб трубного пучка. Установленное давление в ходе нагрева поддерживается при помощи регулятора давления, отводящего излишки дымовых газов в горелочное устройство для последующего дожигания. При превышении установленного давления в реакторе происходит аварийный сброс дымовых газов через блок предохранительных клапанов, до рабочего давления. Во время процесса побочные продукты реакции (водяные пары, коксовый газ, подсмольная вода) выводятся из реактора через соответствующие патрубки, а уголь преобразуется в полукокс.

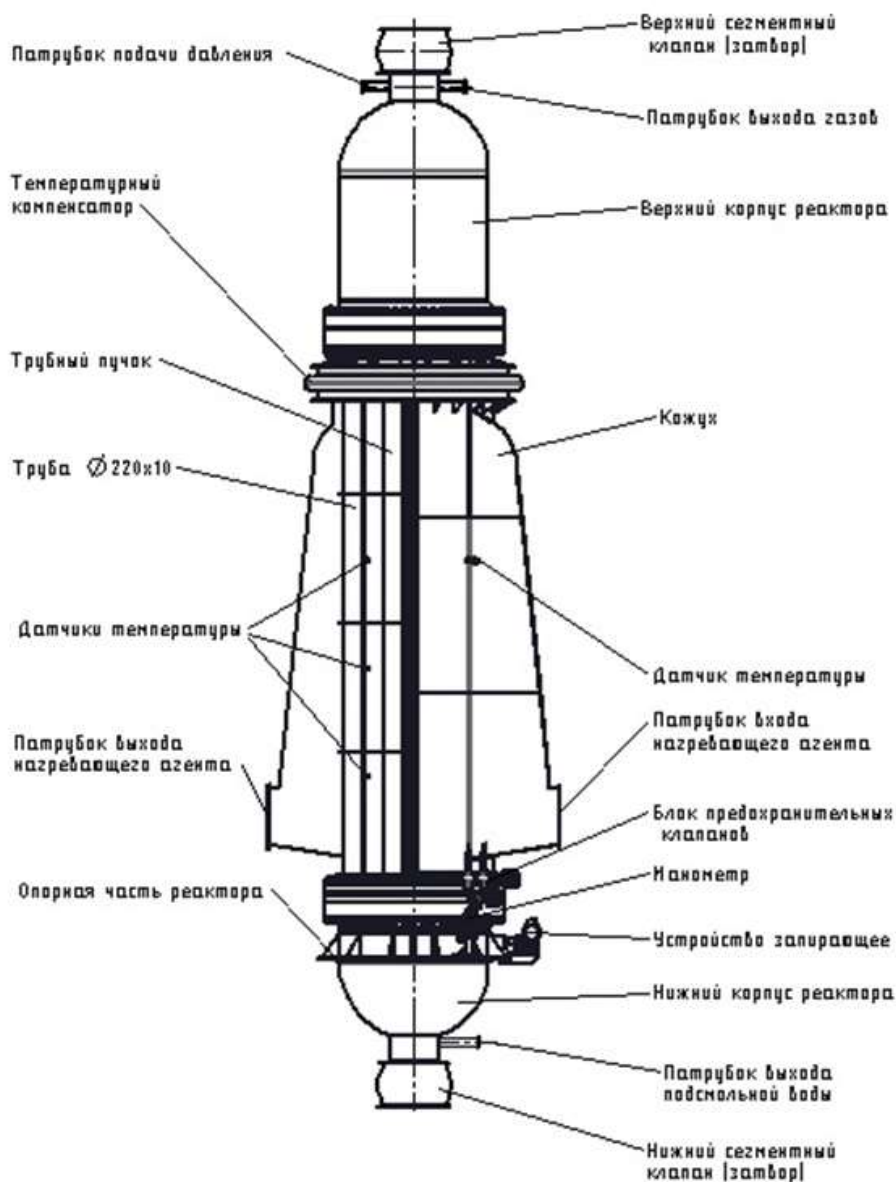


Рисунок 70 – Схема устройства реактора

По окончании процесса нагрева, продувка теплоносителем межтрубного пространства прекращается, давление внутри реактора сбрасывается до атмосферного, и, охлажденными до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ дымовыми газами, производится продувка (охлаждение) внутреннего пространства реактора по замкнутому контуру для охлаждения полукокса до температуры, не превышающей $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. По достижении указанной температуры процесс охлаждения прекращается. Далее открывается нижний сегментный клапан (затвор), открывается запорное

устройство и полукокс выгружается из реактора. После выгрузки закрываются запорное устройство и нижний сегментный клапан (затвор), а верхний сегментный клапан (затвор) открывается. Реактор готов к следующему циклу работы. Схема работы реактора представлена на рисунке 71.

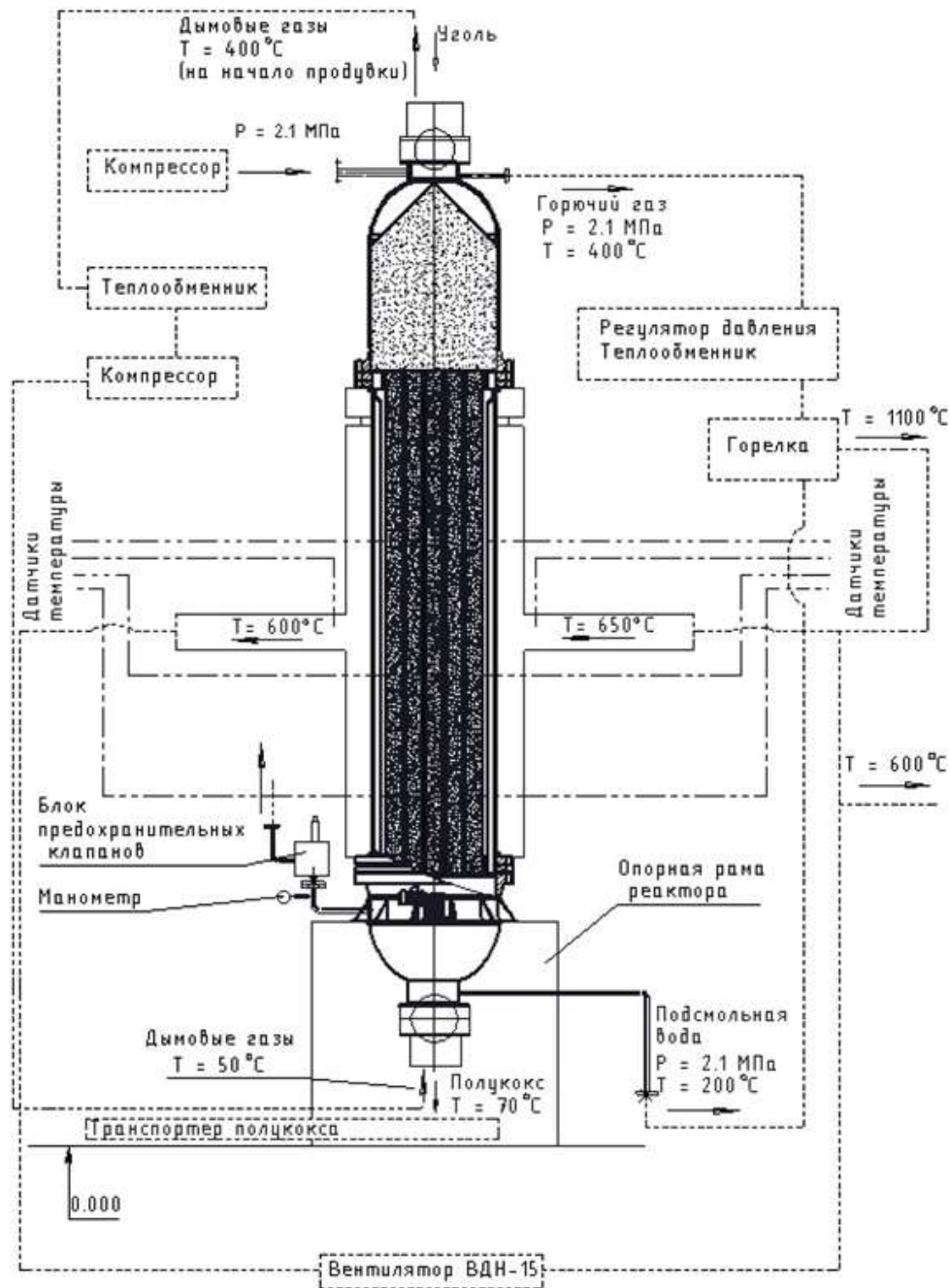


Рисунок 71 – Схема работы реактора

4 Разработка практических рекомендаций по промышленной реализации технологического процесса переработки энергетических углей при повышенном давлении

4.1. Комплекс комбинированного производства кускового полукокса и тепловой энергии

С целью выполнения экономического расчета был разработан комплекс производства полукокса под давлением из угля марки 2Б АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинским имени М.И. Щадова» путем нагрева при избыточном давлении 2,0 МПа.

Оборудование завода полукоксования представляет собой четыре идентичных блока, каждый из которых включает в себя шесть промышленных реакторов (всего – 24 реактора) с тягодутьевым и теплообменным оборудованием, а также транспортные линии загрузки угля и выгрузки готового продукта. При этом в каждом блоке из шести промышленных реакторов четыре реактора одновременно находятся в режиме полукоксования, один реактор – в режиме охлаждения, один реактор – в режиме перезагрузки.

Режим работы завода полукоксования – непрерывный, круглосуточный, 6 тыс. ч/год. Производственная программа рассчитана на производство кускового полукокса и тепловой энергии в объёме 100 000 т/год и 14,8 МВт соответственно. Материальный и тепловой балансы процесса приведены в разделе 3.3.

Принципиальная схема с указанием материального и теплового баланса в расчёте на один блок реакторов представлена на рисунке 72. Уголь 2Б (2БР) разгружается из ж.-д. вагонов и транспортёром подаётся на открытый склад, откуда при помощи погрузчика загружается в наборный бункер. Из наборного бункера уголь подаётся в дробильно-сортировочный комплекс, где рассеивается на три класса крупности. Класс 50–300 мм додрабливается до класса 0–50 мм и снова рассеивается; класс 0–13 мм подаётся в воздухонагревательную установку для генерации дымовых газов.

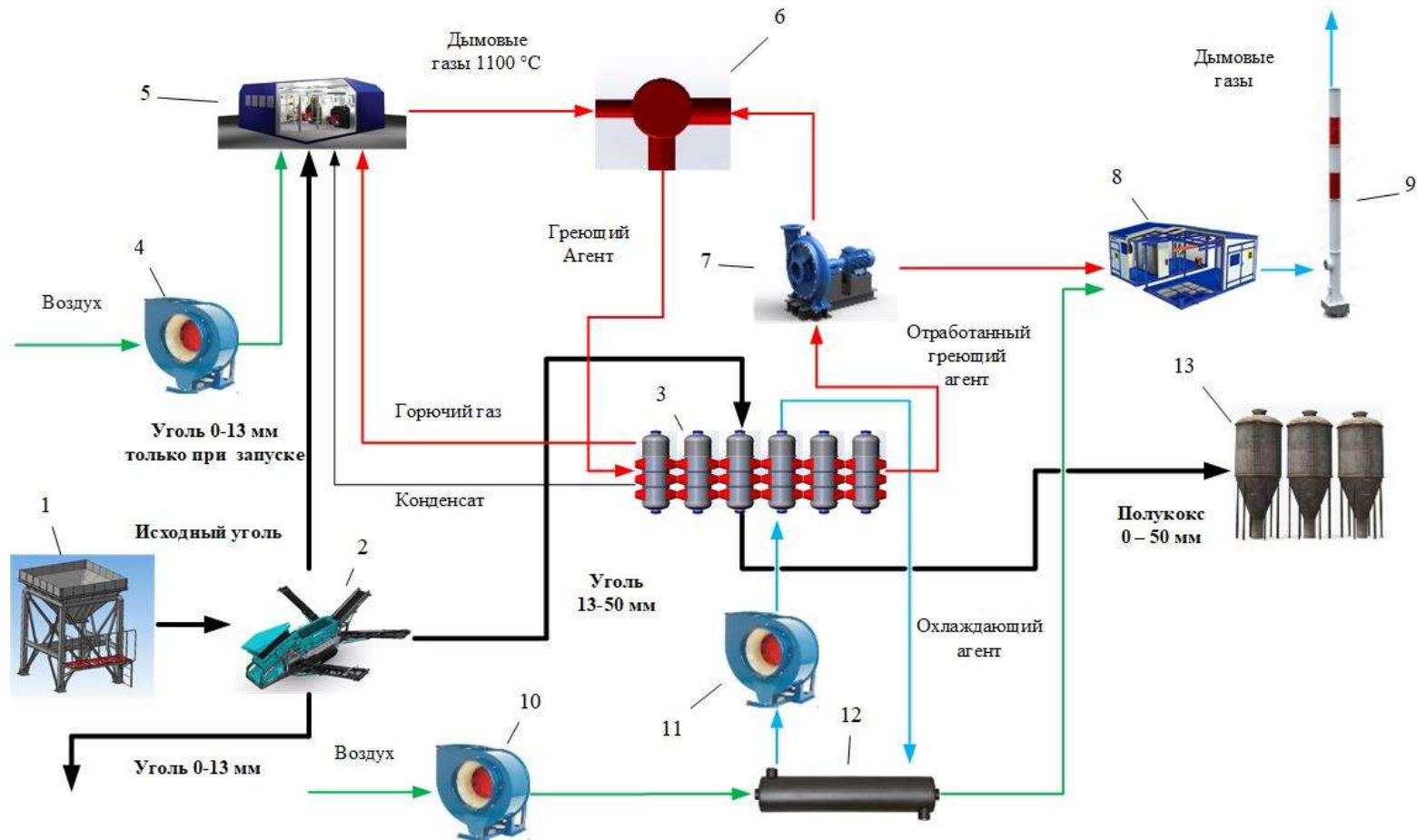


Рисунок 72 – Принципиальная схема процесса комплексного производства тепловой энергии и кускового полукочка в одном блоке реакторов: 1 – наборный бункер; 2 – ДСК; 3 – реакторы; 4 – вентилятор горелки; 5 – воздухонагревательная установка; 6 – узел смешивания газов; 7 – эксгаустер (высокотемпературный дымосос); 8 – установка полезного использования тепла; 9 – дымовая труба; 10 – вентилятор теплообменника; 11 – турбокомпрессор; 12 – теплообменник; 13 – силосный склад

После выхода всех реакторов в блоке в рабочий режим нагрев осуществляется за счёт сжигания дымовых газов, а класс 0–13 мм отгружается потребителю. Класс 13–50 мм подаётся в промышленные реакторы, откуда после термообработки под давлением перемещается в виде кускового полукокса на силосный склад готовой продукции.

Греющий агент – дымовые газы с температурой 650 °С – подаётся в теплообменный контур реакторов, при прохождении через который охлаждается до 600 °С, после чего небольшое количество охлаждённых дымовых газов поступает через дымовую трубу в атмосферу, а основная часть дымовых газов вновь нагревается до 650 °С благодаря смешиванию с соответствующим количеством дымовых газов из воздухонагревательной установки, имеющих температуру 1100 °С. Конденсат, в незначительном количестве образующийся в начале стадии нагрева угля (до превышения температуры кипения воды при рабочем давлении в реакторе) и стадии охлаждения полукокса (после охлаждения системы «газ – полукокс» ниже температуры кипения воды при атмосферном давлении), подаётся в воздухонагревательную установку для распыления в факел горелки и последующего удаления в виде пара с дымовыми газами, поступающими через дымовую трубу в атмосферу.

По достижении в центре засыпки температуры 570 °С процесс нагрева завершается, начинается процесс охлаждения полукокса в замкнутом контуре. Горючий газ из реактора с полукоксом, в начальный момент времени имеющий температуру 400 °С, проходит через газо-газовый теплообменник, охлаждаясь до 50 °С. Во второй контур газо-газового теплообменника поступает уличный воздух. Температура воздуха на выходе из теплообменника достигает 250 °С. Нагретый воздух поступает через дымовую трубу в атмосферу.

Технологическая схема представлена на рисунке 73.

Для приёма угля предусмотрен ж.-д. тупик **01** с возможностью разгрузки угля на открытый склад **03** при помощи ленточного транспортера **02**. В наборный бункер **04**, снабжённый пандусом для возможности подъезда и разгрузки техники, происходит загрузка угля фронтальным погрузчиком с открытого склада **03**.

Ленточным питателем **05** и транспортером **06** уголь подается на дробильно-сортировочный комплекс **07**. После дробления и отсева уголь при помощи ленточных транспортеров **08**, **09** распределяется следующим образом: класс 0–13 мм при помощи ленточного транспортера **10** поступает на открытый склад **11**, откуда отгружается потребителю либо подается в воздухонагревательную установку **12** (только при запуске комплекса), а класс 13–50 мм подается в накопительный бункер **13**.

Из накопительного бункера **13** питателем **14**, встроенным в бункер **13**, при помощи ленточного транспортера **15** уголь подается на крутонаклонный ленточный транспортер **16**, с которого перегружается на ленточный транспортёр **17**. Ленточный транспортёр **17** оборудован плужковыми сбрасывателями, при помощи которых уголь может быть направлен в любой из реакторов **18**. По окончании загрузки каждого реактора в нём создается избыточное давление 2,0 МПа с помощью компрессора **19**, начинается процесс нагрева.

На выходе из воздухонагревательной установки **12** образуются дымовые газы с температурой 1100 °С, которые при помощи эксгаустера **20** подаются в узел смешивания газов **21**. Эксгаустером (высокотемпературным дымососом) оборудован каждый из реакторов. Дымовые газы, проходя через теплообменный контур реакторов, охлаждаются до 600 °С. Часть этих газов поступает через дымовую трубу **22** в атмосферу, а оставшаяся часть смешивается с дымовыми газами, поступающими с воздухонагревательной установки, и на входе в реакторы греющий агент имеет температуру 650 °С. Избыточное давление, создаваемое в реакторе выходящими из угля при его нагреве водяным паром и летучими веществами, при помощи регулятора **23** поддерживается на постоянном уровне.

По окончании нагрева в реакторе сбрасывается давление, открываются клапаны **24** и **25**, начинается процесс охлаждения.

Горючий газ прокачивается по замкнутому контуру «турбокомпрессор **26** – реактор **18** – теплообменник **27**» до тех пор, пока температура засыпки не достигнет 70 °С. По второму контуру теплообменника воздух подается при помощи вентилятора **28**, после чего поступает через дымовую трубу **22** в атмосферу. По

окончании процесса охлаждения закрываются клапаны **24** и **25**, после чего полученный полукокс выгружается на разгрузочный транспортер **29**. С ленточного транспортёра **29** кусковой полукокс поступает на ленточный транспортёр **30**, общий для всех блоков реакторов. С ленточного транспортёра **30** крутонаклонным транспортёром **31** полукокс подаётся на ленточный транспортёр **32** с установленными на нём плужковыми сбрасывателями, с помощью которых полукокс загружается в накопительные силосы **33** (предусмотрено четыре силоса). В целях снижения риска возгораний полукокса в каждом силосе предусмотрена система доохлаждения готовой продукции **34** до 30 °С. Из силосов **33** предусмотрена возможность погрузки готовой продукции (полукокса) в ж.-д. вагоны при помощи транспортеров **35** и **36**. Трёхмерная (3D) визуализация комплекса представлена на рисунке 74.

4.2. Оценка экономической эффективности проекта реализации промышленного комплекса комбинированного производства тепловой энергии в виде газового топлива и полукокса из угля марки 2Б под давлением

Для экономического расчета принята производительность комплекса, равная 100 тыс. т/год. Годовая потребность в исходном угле крупностью 13–50 мм (согласно ТЗ) для производства кускового полукокса определена в соответствии с приведёнными выше технологическими решениями и после выхода комплекса на полную мощность составит 220 000 т/год. В расчете вибрационного грохота для отсева угля эффективность грохочения составляет 94 %, что обуславливает в целевом классе крупности угля присутствие мелочи класса крупности 0-13 мм в количестве не более 6 %.

Основными потребителями электроэнергии являются приводы технологического оборудования. Суммарное установленное годовое энергопотребление составляет 15 266 020 кВт·ч.

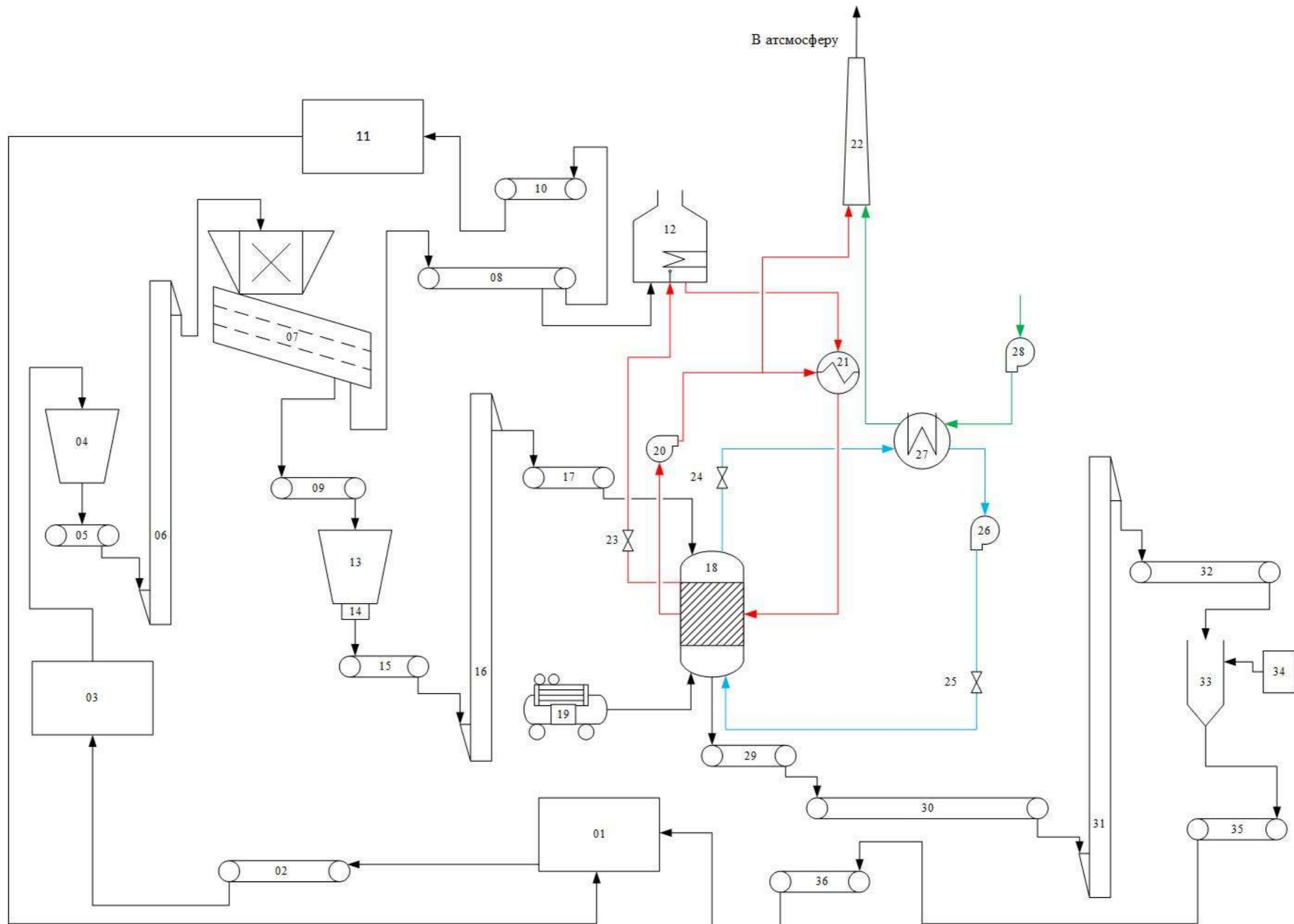


Рисунок 73 – Технологическая схема процесса производства кускового полукокса: 1 – ж.-д. тупик; 2, 8, 9, 10, 15, 17, 29, 30, 32, 35 – ленточные транспортеры; 3 – склад исходного угля; 4 – наборный бункер; 5 – ленточный питатель; 6 – транспортёр; 7 – ДСК; 11 – склад угля 0-13 мм; 12 – воздухонагревательная установка; 13 – накопительный бункер; 14 – питатель угля; 16, 31, 36 – крутонаклонные транспортёры; 18 – реакторы; 19 – компрессор; 20 – эксгаустер (высокотемпературный дымосос); 21 – узел смешивания газов; 22 – дымовая труба; 23 – регулятор давления; 24, 25 – клапаны; 26 – турбокомпрессор; 27 – теплообменник; 28 – вентилятор теплообменника; 33 – силосный склад; 34 – чиллер

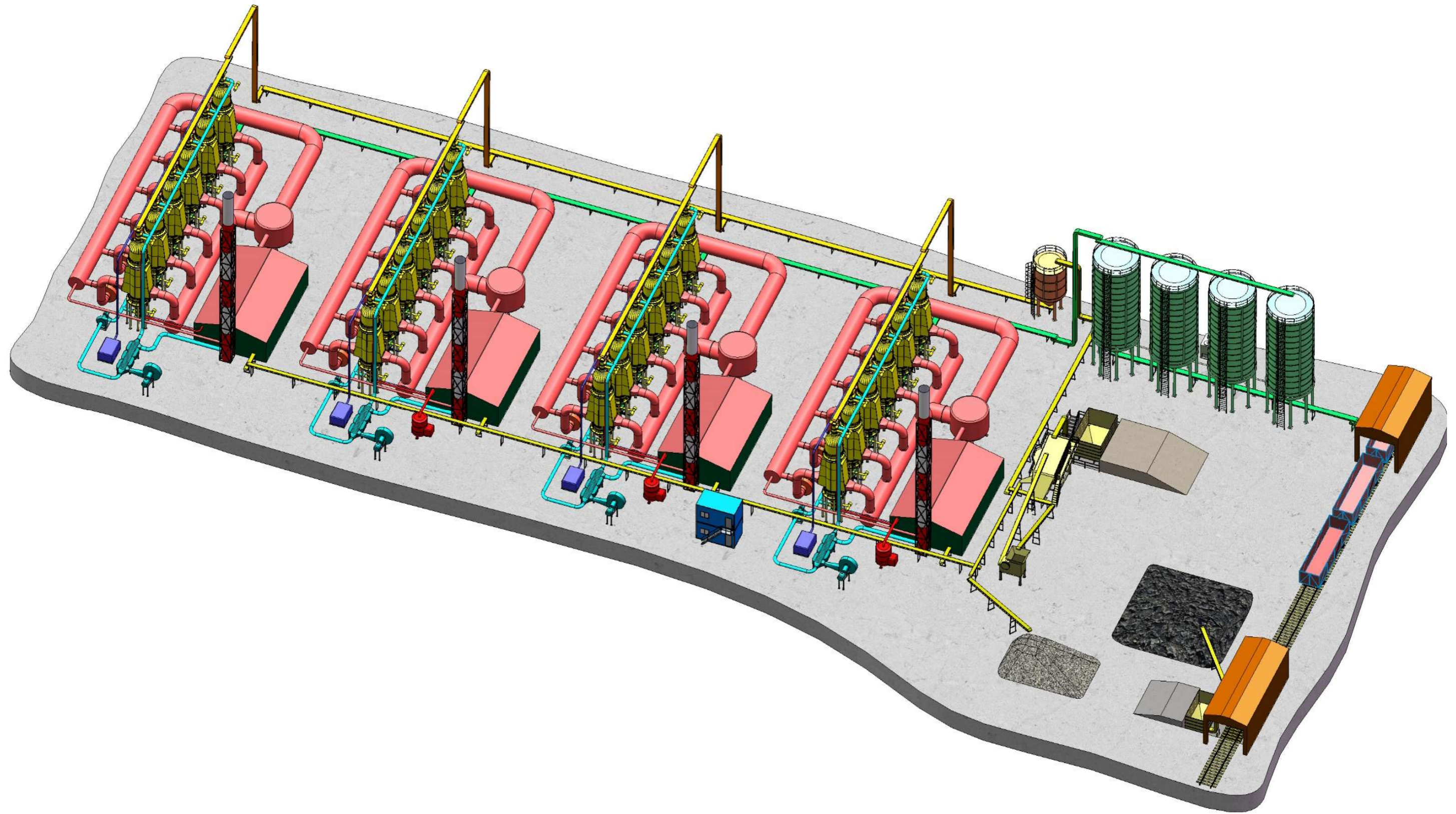


Рисунок 74 – 3D-визуализация комплекса производства кускового полукокса

В расчете численности персонала учитывается персонал, непосредственно задействованный в технологическом процессе производства полукокса (ИТР и рабочие).

Режим работы комплекса – следующий:

- количество смен в сутки – 2;
- количество часов в смене – 12;
- общее количество смен – 4 (режим: дневная смена – ночная смена – двое суток отдыха);
- количество часов работы в году – 6 000;
- режим работы комплекса – непрерывный.

Общая численность персонала комплекса определена на основании норм обслуживания технологического оборудования, а также планируемой системы управления производством и представлена в таблице 15.

За основу взяты нормативы численности рабочих котельных установок и тепловых сетей, утвержденные Приказом Госстроя России от 22.03.1999 № 65 «Об утверждении рекомендаций по нормированию труда работников энергетического хозяйства» (совместно с «Рекомендациями по нормированию труда работников энергетического хозяйства. Часть 1. Нормативы численности рабочих котельных установок и тепловых сетей»).

Таблица 15 – Списочная численность обслуживающего персонала комплекса

Наименование	Количество
Эксплуатационный персонал, в том числе:	
ИТР	12
рабочие	28

Оценка (предварительная) капитальных затрат на строительство комплекса для производства кускового полукокса 100 000 т/год включает в себя перечень основных объектов строительства, таких как здания, оборудования, д.-д. тупик, объекты энергетического хозяйства, транспортного хозяйства и связи, сети и

сооружения водоснабжения, водоотведения, теплоснабжения и газоснабжения, временные здания и т.д. Строительно-монтажные работы (СМР) приняты как 30 % от стоимости оборудования и включены в стоимость. Общая стоимость капитальных затрат по оценке составляет 3458,3 млн руб. с НДС.

В результате выполнения необходимых финансово-экономических расчётов были определены следующие основные показатели, позволяющие оценить эффективность предлагаемых решений: NPV, IRR, MIRR, PI, PP, DPP.

Денежные потоки по проекту определены в рублях в 2022 года с учётом инфляции. Чистый поток денежных средств приведён к начальному периоду финансирования инвестиционного проекта с использованием ставки дисконта в размере 13,3 %. В расчётах принят следующий уровень инфляции: 2022–2023гг. – 4,6 %.

Расчётный период для денежных потоков и определения показателей эффективности принят равным 10 годам, начиная с первого года финансирования проекта. Шаг расчёта – 1 год.

Для получения 1 т кускового полукокса определены следующие расходные коэффициенты сырья и энергоресурсов:

- уголь – 2,2 т;
- электроэнергия – 152,7 кВт·ч.

Цены на исходное сырьё и энергоресурсы:

- уголь – 600 руб./т;
- электроэнергия – 2,252 руб./кВт·ч.

Расчёт себестоимости продукции (полукокса) представлен в таблице 16. Структура себестоимости кускового полукокса приведена в таблице 17.

Таблица 16 – Расчёт себестоимости полукокса

Показатели	Ед. изм.	Значение
Объём производства	тыс. т/год	100
Стоимость угля	тыс. руб./год	132 000
Электроэнергия	тыс. руб./год	34 379
ФОТ	тыс. руб./год	25 609
Амортизация основных фондов	тыс. руб./год	234 920
Прочие расходы	тыс. руб./год	17 094
Всего затрат	тыс. руб./год	443 998
Себестоимость 1 тонны полукокса	руб./т	4 440

Таблица 17 – Структура себестоимости полукокса

Показатели	Ед. изм.	Значение
Стоимость угля	%	29,7
Электроэнергия	%	7,7
ФОТ	%	5,8
Амортизация основных фондов	%	52,9
Прочие расходы	%	3,9
Всего затрат	%	100,0

При выполнении экономического расчета было определено, что проект является эффективным при реализации кускового полукокса в сфере электрометаллургии, поэтому в качестве базового варианта принята цена 15 000 руб./т без НДС, что соответствует рыночной цене коксового орешка, как ближайшего аналога продукции по основным потребительским характеристикам. Показатели эффективности проекта представлены в таблице 18 и на рисунке 75.

Таблица 18 – Показатели эффективности проекта

Показатель	Ед. изм.	Значение
Начало реализации проекта		2022
Продолжительность инвестиционной стадии проекта	мес.	24
Продолжительность эксплуатационного периода проекта	мес.	96
Период расчёта	мес.	120
Общий объём инвестиций без НДС	тыс. руб.	3 288 882
Чистый дисконтированный доход (NPV)	тыс. руб.	2 402 722
Внутренняя норма доходности (IRR), в год	%	35,0
Модифицированная норма доходности (MIRR), в год	%	21,9
Индекс доходности инвестиций (PI)		1,9
Ставка дисконтирования, в год	%	13,3
Срок окупаемости инвестиций (PP):		
с начала инвестирования	лет	4,7
с начала эксплуатации	лет	2,7
Дисконтированный срок окупаемости (DPP):		
с начала инвестирования	лет	5,5
с начала эксплуатации	лет	3,5

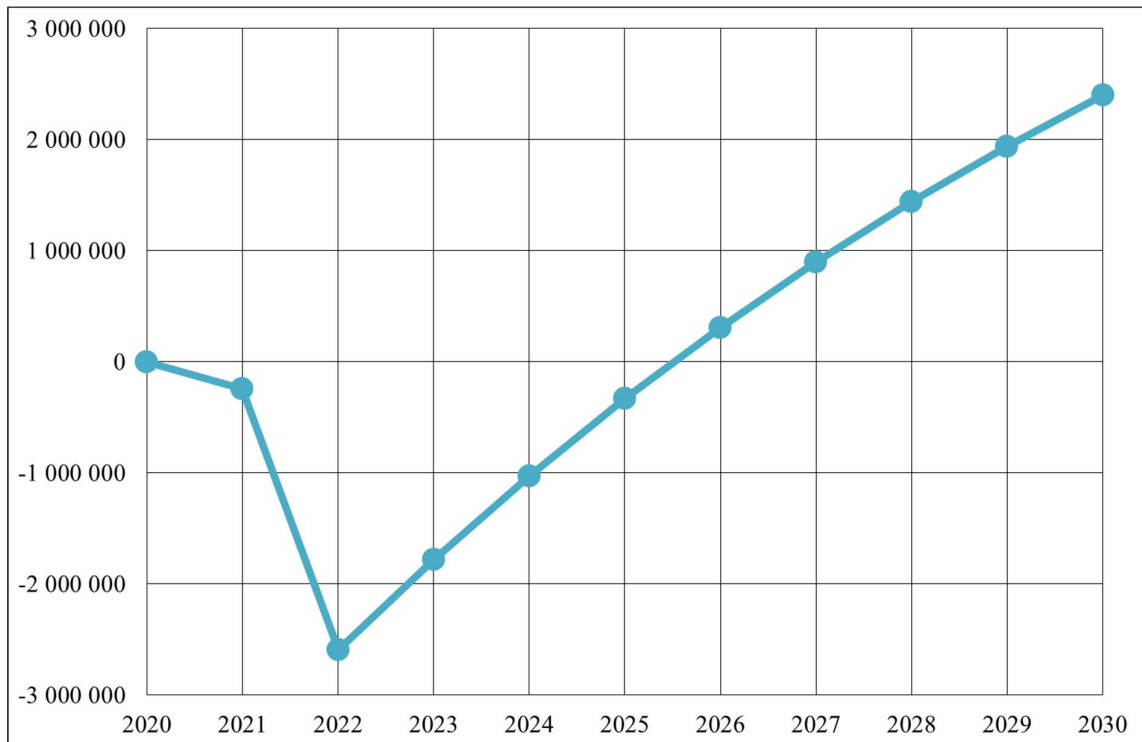


Рисунок 75 – Динамика чистого дисконтированного дохода (NPV)

Анализ безубыточности проекта по четырём параметрам, при изменении которых NPV остаётся положительным, представлен в таблице 19.

Таблица 19 – Критические значения и запас прочности контрольных показателей проекта за расчетный период

Наименование показателя	Проектное значение	Критическое значение	Запас прочности	Запас прочности
Объём отгрузки, тыс. т	800	404	396	50 %
Средняя цена реализации FCA, руб.	8 675	4 378	4 297	50 %
ОРЕХ, млн руб.	909	4 347	3 438	378 %
Инвестиции, млн руб.	2 593	6 031	3 438	133 %

Из таблицы следует, что предложенный проект обладает достаточным запасом прочности по всем показателям.

В соответствии с представленным расчётом реализация проекта даже без учета продажи тепла позволяет:

- наладить рентабельное промышленное производство кускового полукокса из бурого угля филиала АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский имени М.И. Щадова»;
- обеспечить дисконтированный срок окупаемости инвестиций в проект 3,5 года с начала эксплуатации.

4.3. Оценка степени воздействия производства на окружающую среду

Оценка степени воздействия комплекса производства кускового полукокса на окружающую среду произведена как для отдельно стоящего объекта. Расчет выполнен для двух вариантов – прямое сжигание угля и термическая переработка угля марки 2Б Бородинского разреза под давлением с получением тепловой энергии и полукокса. Сравнение выполняли в расчете на производство одинакового количества тепловой энергии – 14,8 МВт.

Согласно постановлению Правительства Российской Федерации № 1029 от 28 сентября 2015 г. «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» производство кускового полукокса по формальному признаку «Осуществление хозяйственной и (или) иной деятельности: по производству кокса» наиболее близко к объектам I категории – объектам, оказывающим значительное негативное воздействие на окружающую среду и относящимся к областям применения наилучших доступных технологий. Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» по формальным признакам производство кускового угля относится объектам I класса в группе «металлургические, машиностроительные и металлообрабатывающие объекты и производства» и имеет размер санитарно-защитной зоны равный 1000 м.

В то же время санитарно-защитная зона и платежи за негативное воздействие на окружающую среду зависят от количества выбросов загрязняющих веществ. Расчет рассеивания с определением санитарно-защитной зоны будет произведен в ходе выполнения ПИР в привязке к конкретному участку. Определение выбросов загрязняющих веществ расчетными методами от комплекса производства кускового полукокса и расчет компенсационных платежей за загрязнение атмосферного воздуха представлены ниже.

Согласно Федеральному закону от 29.07.2018 N 252-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и статьи 1 и 5 Федерального закона "О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" в части создания систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ" объекты I категории, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду, виды которых устанавливаются Правительством РФ, должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета показателей выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи

информации о показателях выбросов и сбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, на основании программы создания системы автоматического контроля.

Расчёт выбросов загрязняющих веществ осуществляется согласно методике [103], утвержденной Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды 9 июля 1999 г. Результаты расчёта представлены в таблице 20.

Таблица 20 – 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	-

Из представленных результатов следует, что 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.

4.4. Оценка объема эмиссии углекислого газа в окружающую среду

В данном разделе приведено сравнение эмиссии CO₂ при производстве углеродистого восстановителя методом полукоксования под давления из трех исследуемых углей и классического кокса. Характеристики углей представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Технический и элементный состав угля

Марка угля	W _{r,t} , %	A ^d , %	C ^{daf} , %	O ^{daf} , %	H ^{daf} , %	Q _i ^r , МДж/т
1Б	48	5,7	69,3	24,4	5,2	10,9
2Б	31	3,7	74,8	21,1	5,1	17,6
Д	10,7	10,6	82,5	9,4	4,5	23,9

Эмиссия CO₂ в расчете на 1 тонну готовой продукции представлена в таблице 22. Данные по классическому коксу были взяты из [104].

Таблица 22 – Эмиссия CO₂

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

Снижение эмиссии CO₂ при производстве углеродистого восстановителя исследуемым способом обуславливается тем, что выделяющийся горючий газ после дожигания имеет температуру, достаточную для обеспечения процесса полукоксования. Тем самым, при организации производства по способу, приведенному в разделе 4.1, процесс получается не только условно 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.

Заключение

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 производственного комплекса на окружающую среду. В сравнении с прямым сжиганием угля значительно снижаются выбросы азота, углерода и серы, а также практически исключаются выбросы твердых частиц. 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 тепловая энергия производится с нулевыми выбросами углекислого газа и наоборот.

Список литературы

1. Исламов, С.Р. Термическая обработка как новый уровень обогащения угля. – Текст: непосредственный // Уголь. – 2020. – № 5. – С. 50-55.
2. Скрыль А.И. Резервы повышения потребительских свойств угольной продукции и роста эффективности ее использования. – Текст: непосредственный // Уголь. – 2018. – № 9. – С. 12-17.
3. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. – Текст: электронный // Министерство энергетики Российской Федерации (Минэнерго России): официальный сайт. – 2019. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1846> (дата обращения: 01.07.2021).
4. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 г. – Текст: электронный // Министерство экономического развития Российской Федерации: официальный сайт. – 2015. – URL: <https://www.economy.gov.ru/> (дата обращения: 01.07.2021).
5. Гойхрах, И.М. Химия и технология искусственного жидкого топлива: учебное пособие: [12+] / И. М. Гойхрах, Н. Б. Пинягин. – 2-е изд., перераб., доп. – Москва : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1954. – 487 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=220343> (дата обращения: 01.07.2021). – ISBN 978-5-4458-4486-0. – Текст: электронный.
6. Сарыглар, Ч.А. Основные направления переработки угля / Ч.А. Сарыглар, Р.Б. Чысыма – Текст: непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 11-1. – С. 121-127.
7. Алешина, А.С. Газификация твердого топлива: учеб. пособие / А.С. Алешина, В.В. Сергеев. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с. – Текст: непосредственный.
8. Альтшулер, В.С. Новые процессы газификации твердого топлива / В.С. Альтшулер. – Москва: Недра, 1976. – 279 с. – Текст: непосредственный.

9. Шиллинг, Г.–Д. Газификация угля: Пер. с нем. и ред. С.Р. Исламова / Г.–Д. Шиллинг, Б. Борн, У. Краус. – Москва: Недра, 1986. – 175 с. – Текст: непосредственный.
10. Bodle, W.W. Coal gasification / W.W. Bodle, J. Hubler // Coal Handbook. – NY: Naroel Dekkor, 1981. – P. 493-733.
11. Исламов, С.Р. Частичная газификация угля / С.Р. Исламов. – Москва: Горное дело ООО "Киммерийский центр", 2017. – 382 с. – ISBN 978-5-905450-89-1. – Текст: непосредственный.
12. Макаров, Г.Н. Химическая технология твердых горючих ископаемых / Г.Н. Макаров, Г.Д. Харлампович. – Москва: Химия, 1986. – 496 с. – Текст: непосредственный.
13. Глущенко, И.М. Теоретические основы твердых горючих ископаемых / И.М. Глущенко. – Москва: Металлургия, 1990. – 296 с. – Текст: непосредственный.
14. Слепцов, Ж.Е. Опыт вдувания в доменную печь полукокса из бурых углей / Ж.Е. Слепцов, А.К.Гусаров, Б.И. Ашпин и др. – Текст: непосредственный // ВНИИ Черная металлургия. – № 2. – С. 37–40.
15. Малинецкий, Г.Г. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.В. Подлазов. – Москва: «КомКнига», 2006. – 280 с. – Текст: непосредственный.
16. Есин, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Часть 2: Взаимодействия с участием расплавов. 2-е изд., испр. и доп. / О.А. Есин, П.В. Гельд. – Москва: «Металлургия», 1966. – 703 с. – Текст: непосредственный.
17. Тулин, Н.А. Развитие бескоксовой металлургии / Н.А. Тулин, В.С. Кудрявцев, С.А. Пчёлкин и др. – Москва: «Металлургия», 1987. – 328 с. – Текст: непосредственный.
18. Лapidус, А.Л. Уголь и природный газ – источники для получения искусственного жидкого топлива и химических продуктов / А.Л. Лapidус, А.Ю. Крылова. – Москва: Знание, 1986. – 48 с. – Текст: непосредственный.

19. Липович, В.Г. Химия и переработка угля / В.Г. Липович, Г.А. Калабин, И.В. Калечиц и др.; под ред. В.Г. Липовича. – Москва: Химия, 1988. – 336 с. – Текст: непосредственный.
20. Печуро, Н.С. Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа / Н.С. Печуро, В.Д. Капкин, О.Ю. Песин. – Москва: Химия, 1986. – 352 с. – Текст: непосредственный.
21. Chohey, N.P. Gasification and liquefaction alike find timely roles that keep coal-processing technology up-to-date / N.P. Chohey, J. Chowdhury, Ch. Crabb et al. // Chemical Engineering (USA). – 1998. – Vol. 105. – No 10. – P 35-40.
22. Hunt, V.D. Synfuels Handbook. – NY: Industrial Press, 1983. – 559 p.
23. Malherbe, R. de Synthetic Fuels from Coal / R. de Malherbe, S.J. Paswell, A.G. Mami, M.C. de Malherbe M.C. de. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983. – 220 p.
24. Schobert, H.H. Chemicals and materials from coal in the 21st century / H.H. Schobert, C. Song // Fuel. – 2002. – Vol. 81, No 1. – P. 15-32.
25. The Science and Technology of Coal and Coal Utilization / Ed by B. Cooper & W. Ellington. – NY: Plenum Press, 1984. – 666 p.
26. Carapellucci, R. Performance of gasification combined cycle power plants integrated with methanol synthesis processes / R. Carapellucci, G. Cau, D. Cocco // Journal of Power and Energy. – 2001. – Vol. 215, No 3. – P. 347-356.
27. Neathery, J. The pioneer plant concept: co-production of electricity and added value products from coal / J. Neathery, D. Gray, D. Challman, F. Derbyshire // Fuel. – 1999. – Vol. 78, No 7. – P. 815-823.
28. Wham, R.M. Available technology for indirect conversion of coal to methanol and gasoline: a technology and economics assessment / R.M. Wham, R.C. Forrester III // Alternative Energy Sources. – 1983. – Vol. 6. – P. 3-18.
29. Николаева, С.В. Современные процессы переработки угля / С. В. Николаева, Ф. Н. Латыпова, С. Ю. Шавшукова – Текст: непосредственный // Башкирский химический журнал. – 2009. – Том 16. – № 3. – С. 122–132.

30. Малолетнев, А.С. Получение синтетического топлива гидрогенизацией углей / А.С. Малолетнев, А.А. Кричко, А.А. Гаркуша. – Москва: Недра, 1992. – 129 с. – Текст: непосредственный.
31. Кричко, А.А. Гидрогенизация твердого топлива / А.А. Кричко. – Текст: непосредственный // Развитие углехимии за 50 лет: Тр. ИГИ. – Москва: Недра. – 1984. – С.52–87.
32. Coal Gasification Processes / Ed. by P. Nowacki. – Park Ridge: Noyes Data Corporation, 1981. – 386 p.
33. Пегуро, Н.С. Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа / Н.С. Пегуро, В.Д. Канкин, А.Ю. Песин. – Москва: Химия, 1986. – 350 с. – Текст: непосредственный.
34. Сергеев, В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / Л.В. Зысин, В.В. Сергеев. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 192 с. – Текст: непосредственный.
35. Joshi, M.M. Integrated gasification combined cycle. A review of IGCC technology / M.M. Joshi, M.M. Lee ч // Energy Sources. – 1996. – Vol. 18, No 5. – P. 537–568.
36. Гинзбург, Д.М. Газификация топлива и генераторные установки / Д.М. Гинзбург. – Москва, 1938. – 386 с. – Текст: непосредственный.
37. Канторович, Б.В. Введение в теорию горения и газификация твердого топлива / Б.В. Канторович. – Москва: Metallurgizdat, 1961. – 355 с. – Текст: непосредственный.
38. Ахметов, С.А. Физико-химическая технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие. Ч. 2 / А.С. Ахметов. –Уфа: Изд-во УГНТУ, 1997. – 304 с. – Текст: непосредственный.
39. Газогенераторные технологии в энергетике / Под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Сократ, 2010. – 610 с. – Текст: непосредственный.

40. Guo, R. Evaluation approach of operating status for Texaco coal gasification process based on extension and fluzzy theory / R. Guo // Journal of chemical Engineering of Chinese Universities. – 2005. – Vol. 19. – No.1.– P. 77-83
41. Горлов, Е.Г. Прямоточная газификация водоугольных суспензий с сухим шлакообразованием высокочольных углей / Е.Г. Горлов, В.Г. Андриенко, К.Е. Нефедов – Текст: непосредственный // Химия твердого топлива. – 2009. – №2.– С. 37–42.
42. Breault, R.W. Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies / R.W. Breault // Energies. – 2010. – No3. – P. 216–240.
43. Сорокин, Е.Л. Конспект лекций по курсу Технология производства кокса. Часть 3 // Конспект лекций по программе повышения квалификации для технологического персонала / Е.Л. Сорокин, А.С. Коверя. – Днепропетровск: НМетАУ, 2013. – 61 с. – Текст: непосредственный.
44. Новые технологии коксования углей. – Текст: электронный // Черная и цветная металлургия: [сайт]. – 2019. – URL: <https://metallolome.ru/novye-tehnologii-koksovaniya-uglej/> (дата обращения: 12.08.2021).
45. Куликова, М.П. Состояние технологий коксования углей / М.П. Куликова – Текст: непосредственный // Природные ресурсы, среда и общество. – 2020. – №2 (6). – С. 70–76.
46. Страхов, В.М. Технология производства и качество полукокса из вертикальных печей типа SJ Китая / В.М. Страхов, И.В. Суровцева, А.В. Дьяченко, В.М. Меньшенин – Текст: непосредственный // Кокс и химия. – 2007. – № 5. – С. 17–24.
47. The First Industrial Scale, Commercially Operating Coal Upgrading Plant in the World – Текст: электронный // GB Clean Energy: официальный сайт. – 2013. – URL: http://gbce.com/en/projects_yield.php (дата обращения: 12.12.2019).
48. The LiMaxTM Coal Process Technology (LCP) – Текст: электронный // GB Clean Energy: официальный сайт. – 2013. – URL: <http://gbce.com/en/technology-process.php> (дата обращения: 12.12.2019).

49. Кулеш, М.В. Краткий обзор современных зарубежных технологий переработки угля: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2015 г.: в 4 частях. Часть I. – Москва: ООО «АР-Консалт», 2015. – С. 72–73. – Текст: непосредственный.
50. Тереньтев, Г.А. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов / Г.А. Тереньтев, В.М. Матюков, Ф.В. Смаль. – Москва: Химия, 1989. – 272 с. – Текст: непосредственный.
51. Шумейко, М.В. Гидрогенизация угля / М.В. Шумейко – Текст: непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 9. – С. 32–39.
52. Козак, М. Конверсия угля в жидкие углеводороды в Польше – Текст: электронный // Энергосовет: [сайт]. – 2007. – URL: <http://www.energsovet.ru/stat521.html> (дата обращения: 06.03.2021).
53. Кричко, А.А. Гидрогенизация угля в СССР / А.А. Кричко. – Москва: Библиотечка инженера, 1984. – 47 с. – Текст: непосредственный.
54. Кричко, А.А. Нетопливное использование углей / А.А. Кричко, В.В. Лебедев, И.Л. Фарберов. – Москва: Недра, 1978. – 215 с. – Текст: непосредственный.
55. Кричко, А.А. Особенности отечественной технологии переработки угля в жидкое топливо – Текст: электронный // Наука + промышленность: проблемы и перспективы. Передовые технологии России: [сайт]. URL: <http://www.ptechology.ru/Science.html> (дата обращения: 12.05.2021).
56. Aasberg-Petersen, K. Technologies for large-scale gas conversion / K. Aasberg-Petersen, J.-H. Bak Hansen, T.S. Christensen, T.S. Dybkjaer, P. Seier Christensen, C. Stub Nielsen, S.E.L. Winter Madsen, J.R. Rostrup-Nielsen // Applied Catalysis A: General. – 2001. – Vol 221, Iss. 1–2. – P. 379-387.
57. Stitt, E.H. Reactor Technology for Syngas and Hydrogen / H. Stitt // Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Sustainable Strategies for the Upgrading of Natural Gas: Fundamentals, Challenges, and Opportunities. – Vilamoura, Portugal, 2003. – P. 185–216.

58. Ernst, W.S. Push synthesis gas production limits / W.S. Ernst, S.C. Venables, P.S. Christensen, A.C. Berthelsen // *Hydrocarbon Processing*. – 2000. – № 79 (3). – 100 p.
59. Kong, Z. EROI Analysis for Direct Coal Liquefaction without and with CCS: The Case of the Shenhua DCL Project in China / Zhaoyang Kong, Xiucheng Dong, Bo Xu, Rui Li, Qiang Yin, Cuifang Song // *Energies*. – 2015. – № 8. – P. 786–807.
60. Zhang, M.H. The comprehensive evaluation of Shenhua direct coal liquefaction project / M.H. Zhang // *Sino-Glob. Energy*. – 2010. – № 15. – P. 9–18.
61. Xu, H. The Project Feasibility Study Report of Coal-to-Chemicals in China / H. Xu, X.L. Cheng, W.F. Wang // *Sustainability*. – 2014. – № 6. – P. 262–282.
62. Synfuels China Technology. – Текст: электронный // Synfuels Americas: официальный сайт URL: <https://www.synfuelsamericas.com/history/#> (дата обращения: 12.05.2021).
63. Brandt, A.R. The energy efficiency of oil sands extraction: Energy return ratios from 1970 to 2010. / A.R. Brandt, J. Englander, S. Bharadwaj // *Energy*. – 2013. – № 55. – P. 693–702.
64. Исламов, С.Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «ТЕРМОКОКС»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Исламов Сергей Романович. – Красноярск, 2010. – 37 с. – Текст: непосредственный.
65. Аникин, А.Е. Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канского-Ачинского бассейна: производство, свойства, применение / А.Е. Аникин, Г.В. Галевский – Текст: непосредственный // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2014. – № 3. – С. 52.
66. Исламов, С.Р. Глубокая переработка угля: введение в проблему выбора технологии / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов – Текст: непосредственный // *Уголь*. – 2007. – № 10. – С. 55.
67. Исламов, С. Р. Экономический кризис как побуждение к глубокой переработке угля / С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // *Уголь*. – 2013. – № 2. – С. 46.

68. Исламов, С.Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо / С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Уголь. – 2012. – № 3. – С. 64.
69. Исламов, С.Р. О новой концепции использования угля / С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Уголь. – 2007. № 5. – С. 67.
70. Гринько, Н.К. Использование чистых угольных технологий в России / Н.К. Гринько – Текст: непосредственный // Уголь. – 2006. – № 1. – С. 6–8.
71. Исламов, С.Р. Переработка бурого угля по схеме энерготехнологического кластера / С.Р. Исламов – Текст: непосредственный // Уголь. – 2009. – № 3. – С. 65.
72. Патент N 2359006 Российская Федерация, C10B 49/10 (2006.01). Способ переработки угля : N 2008117266 : заявлено 05.05.2008 : опубликовано 20.06.2009 / Исламов С.Р., Степанов С.Г. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
73. Патент N 007801 Евразийский патент, C10B 49/10 (2006.01). Способ получения металлургического среднетемпературного кокса : N 200801917 : заявлено 25.10.2005 : опубликовано 27.02.2007 / Исламов С.Р., Степанов С.Г. – Текст: непосредственный.
74. Патент N 2014882 Российская Федерация, МПК B01J 20/20 (1990.01), C01B 31/08 (1990.01). Способ получения адсорбента : N 92004035/26 : заявлено 11.11.1992: опубликовано 30.06.1994 / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов, В.С. Славин. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
75. Патент N 2014883 Российская Федерация, МПК B01J 20/20 (1990.01). Способ получения углеродного адсорбента N 93039409/26: заявлено 16.08.1993: опубликовано 30.06.1994 / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
76. Исламов, С.Р. Энерготехнологическая переработка углей: монография / С.Р. Исламов. – Красноярск: «Поликор», 2010. – 224 с. – Текст: непосредственный.
77. Михалев, И.О. Энерготехнологическое производство на основе частичной газификации углей низкой степени метаморфизма: Сборник научных трудов

- по материалам VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012 г / И.О. Михалев, С.Р. Исламов. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – 164 с. – Текст: непосредственный.
78. Степанов, С.Г. Технология совмещенного производства полукокса и горючего газа из угля / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов, А.Б. Морозов – Текст: непосредственный // Уголь. – 2002. – № 6. – С. 27–29.
79. Патент N 2288937 Российская Федерация, C10B 49/10 (2006.01). Способ получения металлургического среднетемпературного кокса : N 2005132548 : заявлено 24.10.2005 : опубликовано 10.12.2006 / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
80. Патент N 2287011 Российская Федерация, МПК C10J 3/68 (2006.01). Способ слоевой газификации угля : N 2005124137/04 : заявлено 29.07.2005 : опубликовано 10.11.2006 / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов. – 5 с. : ил. – Текст: непосредственный.
81. Степанов, С.Г. Экологическая оценка энерготехнологического использования угля / С.Г. Степанов, А.Б. Морозов, А.А. Гроо – Текст: непосредственный // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. научн. трудов Краснояр. гос. акад. цвет. мет. и золота. – Красноярск, 2003. – С. 186–189.
82. Михалев, И.О. О способах повышения экологической безопасности использования углеводородных топлив / И.О. Михалев – Текст: непосредственный // Вестник Ассоциации выпускников Красноярского государственного технического университета. – 2008. – Вып. 17. – С. 148–152.
83. Исламов, С.Р. Экологические аспекты современных технологий энерготехнологической переработки угля / С.Р. Исламов, С.Г. Баякин, И.О. Михалев – Текст: непосредственный // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности. – 2009. – Т. 14, № 6. – С. 185–189.

84. Гроо, А.А. Интенсификация процессов теплообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья / А.А. Гроо, Д.А. Логинов – Текст: непосредственный // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф. – ИТ СО РАН, 2006. – Ч. 3. – С. 29–35.
85. Гроо, А.А. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации с обратным дутьем / А.А. Гроо, Д.А. Логинов – Текст: непосредственный // XVI Школа-семинар молодых ученых и специалистов "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках": Сб. докладов. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 395–400.
86. Патент N 2345116 Российская Федерация, МПК C10B 57/00 (2006.01), C10J 3/02 (2006.01). Способ получения кокса и синтез-газа при переработке угля : N 2007131530/04 : заявлено 21.08.2007 : опубликовано 27.01.2009 / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, И.О. Михалев. – 6 с. : ил. – Текст: непосредственный.
87. Bennett, J. Coking Coal / J. Bennett. – London: Energy Publishing, 1996. – 250 p.
88. Tang, Z. Efficient and environment friendly use of coal / Z. Tang, Y. Wang // Fuel Processing Technology. – 2000. – Vol. 62, No 2. – P. 137-141.
89. 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.
90. Ким, В.А. Новые виды углеродистых восстановителей для выплавки технического кремния / В.А. Ким– Текст: непосредственный // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 25–27.
91. Грязнов Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования / Н.С. Грязнов. – Москва: Металлургия, 1983. – 184 с. – Текст: непосредственный.
92. Грязнов, Н.С. Коксование углей под газовым давлением / Н.С. Грязнов, В.К. Петров // Кокс и химия. – 1960. – № 1. – С. 30–35.

93. Джапаридзе, П.Н. Научные основы производства кокса. Сб. науч. тр. ВУХИН / П.Н. Джапаридзе, Л.А. Дракин, Н.У. Джиджейшвили. – Москва: Metallurgy, 1967. – С. 174–180. – Текст: непосредственный.
94. Кекин, Н.А. Спекание коксующихся углей / Н.А. Кекин, М.Г. Скляр, Т.С. Палагута – Текст: непосредственный // Химия твердого топлива. – 1973. – № 3. – С. 71–76.
95. Грязнов, Н.С. Пластическое состояние и спекание углей / Н.С. Грязнов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1962. – 192 с. – Текст: непосредственный.
96. Скляр, М.Г. Интенсификация коксования и качество кокса / М.Г. Скляр. – Москва: Metallurgy. – 1976. – 255 с. – Текст: непосредственный.
97. Исаченко, В.П. Теплопередача. Издание 4-е перераб. и дополненное / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 415 с. – Текст: непосредственный.
98. Видин, Ю.В. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен. Контрольные задания: Учебное пособие / Ю. В. Видин, В. В. Колосов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – 177 с. – Текст: непосредственный.
99. Лобасова, М.С. Тепломассообмен. Нестационарная теплопроводность : учебно-методическое пособие [для напр. подготовки бакалавров 03.03.02 «Физика», 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика», 14.03.02 «Ядерные физика и технологии», 16.03.01 «Техническая физика», 28.03.01 «Нанотехнология и микросистемная техника»] / Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники; сост.: М.С. Лобасова, А.С. Лобасов. – Красноярск: СФУ, 2015. - Загл. с титул. экрана. – Библиогр.: с. 36. – Изд. № 2015-3271. – Текст: электронный.
100. СП 359.1325800.2017 Силосы стальные вертикальные цилиндрические для хранения сыпучих продуктов. Правила проектирования = Vertical cylindrical steel silos for bulk products storaging. Design rules : свод правил : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 декабря 2017 г. N 1668/пр : дата введения 2018–06–15 / разработан

- ЗАО "ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова". – Москва: Стандартинформ, 2018. – Текст: непосредственный.
101. Агроскин, А.А. Теплофизика твёрдого топлива / А.А. Агроскин, В.Б. Глейбман // Москва: Недра, 1980. – 256 с. – Текст: непосредственный.
 102. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик // Москва: Наука, 1972. – 720 с. – Текст: непосредственный.
 103. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час / Санкт-Петербург: "Интеграл", 1999 – 76 с. – Текст: электронный.
 104. Отчет по мониторингу сокращения выбросов парниковых газов по проекту «Внедрение электросталеплавильного способа производства стали на ОАО «ММК». – Текст: электронный / Российский реестр углеродных единиц: официальный сайт. – 2012. – URL: <http://www.carbonunitsregistry.ru/reports-pso.htm> (дата обращения 12.10.2021).

Приложение А

Экспериментальное исследование процесса переработки бурого угля марки 2Б (АО «Разрез Березовский») под давлением

Таблица А.1 – Оборудование, использованное в экспериментах

Функция	Оборудование
Подача греющего агента	Газодувка 1124304А (расход 78 л/с) с регулировочной системой
Измерение расхода греющего агента	Ротаметр РМФ ГУЗ – 100 Ротаметр РМФ ГУЗ – 65
Нагрев греющего агента	Воздухонагреватель LE 10 000 DF HT
Нагрев лабораторного реактора	Электродуговая печь СНОЛ 10/10В
Измерение температур в реакторе	Преобразователи термоэлектрические ТХА-9425-08 (НПП «Эталон»)
Измерение массы	Весы ВТ 8908–150
Регулировка давления	Регулятор давления ВР60
Преобразование сигналов температурных датчиков	Аналого-цифровые преобразователи ADAM-4018 с преобразователем интерфейса ADAM-4520
Обработка и отображение информации с измерительного оборудования	1 desktop PC

Таблица А.2 – Пределы и погрешности измерений в экспериментах

Величина	Пределы и погрешности измерения	
Расход воздуха, м ³ /ч	10-200; погрешность 2,5% от измеряемой величины	
Давление, МПа	0,1÷6,3, погрешность 0,05 МПа	
Температура, °С	-40÷ +900 (кратковременно до 1000), инерционность: ТХА-9425-08 – 15°С	
Технический и элементный состав твёрдой фазы	W^r	н/у
	A^d	±0,2
	V^{daf}	±1,8
	C^{daf}	±0,25
	H^{daf}	±0,15
	N^{daf}	±0,05
	O^{daf}	н/у

Таблица А.3 – Свойства полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 20 - 25мм)

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористость, %
	До	После						
2,5	620	518	56,67	48,81	12,6	1,15	0,18	20,7
5		522	55,00	51,26	12,1	1,12	0,19	21,3
12,5		520	56,47	50,25	12,3	1,17	0,18	21,1

Таблица А.4 – Свойства полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 15 - 20мм)

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористость, %
	До	После						
2,5	615	527	56,67	50,24	11,9	1,18	0,19	22,4
5		518	55,00	48,73	12,5	1,14	0,18	20,5
12,5		516	56,47	49,67	12,4	1,19	0,19	22,6

Таблица А.5 – Свойства полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 10 - 15мм)

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористость, %
	До	После						
2,5	605	514	56,13	51,10	12,6	1,15	0,18	20,7
5		518	54,60	50,67	11,9	1,18	0,19	22,4
12,5		511	56,13	49,03	12,4	1,12	0,18	20,2

Таблица А.6 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева

№ эксперимента	Класс крупности	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
1	10-15	2,5	1,8	27,5	54,9	13,9	1,0	1,0
2		5	2,6	26,3	61,7	8,0	0,8	0,8
3		12,5	6,2	36,3	40,5	14,2	1,7	1,0
4	15-20	2,5	14,6	18,6	25,3	35,9	3,6	1,9
5		5	14,7	26,9	27,7	27,8	1,6	1,4
6		12,5	16,4	32,9	28,0	20,5	1,1	1,1
7	20-25	2,5	18,5	26,1	40,5	12,2	1,4	1,2

8		5	17,5	24,3	41,1	15,0	1,1	1,0
9		12,5	20,7	26,8	41,0	10,3	1,2	1,1

Таблица А.7 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева после истирания

№ эксперимента	Класс крупности	Время нагрева	Выход надрешетного продукта				
			10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
1	10-15	2,5	1,9	11,6	43,7	40,3	2,6
2		5	5,3	16,3	47,0	30,2	1,2
3		12,5	15,3	27,5	44,1	12,1	1,0
4	15-20	2,5	3,5	14,5	36,5	42,6	2,8
5		5	11,6	17,7	37,9	31,1	1,7
6		12,5	23,0	30,1	33,4	12,2	1,4
7	20-25	2,5	4,0	27,3	64,0	3,3	1,3
8		5	19,3	42,0	36,7	1,0	1,0
9		12,5	29,5	42,3	26,0	1,2	1,0
10	10-15	-	69,7	25,0	3,3	1,0	1,0
11	15-20	-	82,9	13,4	1,7	1,3	0,7

12	20-25	-	82,9	13,4	1,7	1,3	0,7
----	-------	---	------	------	-----	-----	-----

Таблица А.8 – Свойства полукокса после термообработки под давлением (класс крупности 10 – 15 мм).

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Избыточное давление, МПа	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощен ие, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористос ть, %
		До	После						
2,5	0	605	504	56,40	50,00	12,6	1,15	0,25	28,8
	0,5		523	56,20	48,31	10,1	1,2	0,22	26,4
	1,0		496	55,80	49,63	9,0	1,25	0,22	27,5
	1,5		505	55,53	52,81	8,9	1,25	0,21	26,3
	2,0		496	55,80	49,38	7,2	1,27	0,17	21,6
5	0	605	516	56,13	50,67	11,9	1,18	0,33	38,9
	0,5		522	56,33	51,26	9,7	1,2	0,31	37,2
	1,0		534	55,87	48,66	9,5	1,21	0,25	30,3
	1,5		522	56,33	52,33	8,9	1,23	0,22	27,1
	2,0		532	55,47	49,67	6,4	1,24	0,2	24,8

12,5	0	605	518	55,53	51,03	12,4	1,2	0,31	37,2
	0,5		500	55,80	48,57	10,9	1,23	0,25	30,8
	1,0		488	55,87	50,03	10,2	1,26	0,24	30,2
	1,5		526	56,07	52,20	9,1	1,27	0,18	22,9
	2,0		532	56,00	48,51	7,3	1,34	0,17	22,8

Таблица А.9 – Свойства полукокса после термообработки под давлением (класс крупности 15 – 20 мм).

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Избыточное давление, МПа	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористость, %
		До	После						
2,5	0	615	522	55,53	48,81	11,9	1,18	0,34	40,1
	0,5		534	55,93	51,27	9,35	1,21	0,26	31,5
	1,0		522	55,87	51,33	7,04	1,29	0,23	29,7
	1,5		496	55,53	48,38	6,90	1,30	0,22	28,6
	2,0		516	56,20	49,13	5,96	1,37	0,20	27,4
5	0	615	532	55,93	51,03	12,5	1,12	0,30	33,6

	0,5		488	55,47	48,87	6,79	1,18	0,27	31,9
	1,0		532	56,33	52,33	6,63	1,23	0,22	27,1
	1,5		496	56,27	50,19	5,88	1,28	0,20	25,6
	2,0		505	56,00	48,61	5,69	1,28	0,20	25,6
12,5	0	615	518	56,67	51,00	12,4	1,18	0,27	31,9
	0,5		500	55,27	51,22	9,70	1,19	0,24	28,6
	1,0		504	55,53	48,26	7,70	1,20	0,20	24,0
	1,5		523	55,47	49,77	7,69	1,28	0,20	25,6
	2,0		526	56,20	48,86	6,04	1,39	0,20	27,8

Таблица А.10 – Свойства полукокса после термообработки под давлением (класс крупности 20 – 25 мм).

Время нагрева засыпки до 570 °С, ч	Избыточное давление, МПа	Насыпная плотность, кг/м ³		Потеря массы, %	Объемная усадка, %	Водопоглощен ие, %	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Пористос ть, %
		До	После						
2,5	0	620	496	55,93	48,81	12,6	1,17	0,28	32,8
	0,5		505	56,07	51,03	9,4	1,21	0,26	31,5

	1,0		518	56,20	48,33	7,0	1,22	0,21	25,6
	1,5		532	55,53	50,00	6,9	1,24	0,20	24,8
	2,0		488	55,87	51,03	6,0	1,26	0,20	25,2
5	0	620	500	55,60	51,26	12,1	1,10	0,32	35,2
	0,5		504	55,87	48,07	8,8	1,11	0,30	33,3
	1,0		522	55,80	49,26	6,6	1,14	0,24	27,4
	1,5		496	55,67	52,26	5,9	1,23	0,20	24,6
	2,0		516	56,47	49,59	5,7	1,36	0,18	24,5
12,5	0	620	522	55,80	50,25	12,3	1,16	0,29	33,6
	0,5		534	55,87	48,57	9,7	1,20	0,25	30,0
	1,0		532	56,60	50,03	7,7	1,21	0,23	27,8
	1,5		523	56,20	49,98	7,7	1,24	0,22	27,3
	2,0		526	55,93	48,13	6,0	1,26	0,21	26,5

Таблица А.11 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 10–15 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
13	0	2,5	0,0	7,2	16,3	31,3	40,4	4,8
14	0,5		0,0	13,3	31,3	37,5	10,9	7,0
15	1,0		0,0	17,6	32,8	35,1	9,2	5,3
16	1,5		0,0	21,0	33,6	32,2	7,7	5,6
17	2,0		0,0	23,5	39,5	25,9	6,8	4,3
18	0	5	0,0	8,9	21,6	29,6	35,3	4,6
19	0,5		0,0	18,2	31,4	35,0	8,8	6,6
20	1,0		0,0	21,5	36,1	29,2	8,3	4,9
21	1,5		0,0	25,8	33,5	28,4	7,1	5,2
22	2,0		0,0	27,6	32,2	29,9	6,3	4,0
23	0	12,5	0,0	19,4	23,5	35,7	16,3	5,1
24	0,5		0,0	24,4	31,5	29,9	11,0	3,1
25	1,0		0,0	31,2	31,2	25,4	8,7	3,6
26	1,5		0,0	34,8	32,6	21,7	8,0	2,9

27	2,0		0,0	35,4	34,1	21,3	6,7	2,4
----	-----	--	-----	------	------	------	-----	-----

Таблица А.12 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 15–20 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
28	0	2,5	0,0	15,9	20,5	39,3	16,2	8,1
29	0,5		0,0	20,5	26,5	35,4	10,7	6,9
30	1,0		3,3	23,5	27,3	31,2	9,4	5,5
31	1,5		7,0	25,4	28,8	25,2	7,9	5,8
32	2,0		10,1	29,0	24,9	24,8	6,8	4,3
33	0	5	2,1	16,2	20,9	36,1	16,5	8,2
34	0,5		6,4	22,0	28,4	27,0	9,9	6,4
35	1,0		9,2	24,6	28,2	24,6	8,5	4,9
36	1,5		12,4	26,1	29,4	19,6	7,2	5,2
37	2,0		13,8	29,9	25,9	20,1	6,3	4,0
38	0	12,5	4,0	15,9	20,5	35,4	16,2	8,1
39	0,5		9,0	21,4	27,6	26,2	9,7	6,2

40	1,0		15,4	26,5	24,7	21,6	7,4	4,3
41	1,5		16,5	28,2	26,5	17,6	6,5	4,7
42	2,0		17,6	28,6	24,7	19,2	6,0	3,8

Таблица А.13 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева (класс крупности 20–25 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
43	0	2,5	1,7	7,8	22,0	55,9	9,2	3,3
44	0,5		11,5	20,1	24,1	35,7	6,0	2,6
45	1,0		21,0	32,0	26,1	16,3	2,7	1,8
46	1,5		29,1	34,3	21,5	11,4	2,1	1,5
47	2,0		37,4	36,6	16,8	6,4	1,5	1,2
48	0	5	3,9	16,7	30,7	42,9	4,0	1,9
49	0,5		20,4	27,4	22,9	25,1	2,7	1,5
50	1,0		34,1	36,1	18,6	8,4	1,6	1,2
51	1,5		35,2	37,0	17,0	8,1	1,5	1,2
52	2,0		36,3	37,8	15,5	7,8	1,5	1,1

53	0	12,5	14,5	19,5	25,1	36,2	3,5	1,2
54	0,5		25,7	29,2	21,0	20,1	3,0	1,0
55	1,0		37,4	36,8	17,3	6,0	1,2	1,2
56	1,5		38,2	36,4	15,5	7,3	1,4	1,1
57	2,0		39,1	38,7	12,9	6,7	1,5	1,0

Таблица А.14 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева после истирания (класс крупности 10–15 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
13	0	2,5	0,0	1,9	11,6	43,7	40,3	2,6
14	0,5		0,0	26,1	39,4	26,1	3,5	4,9
15	1,0		0,0	41,6	30,4	24,9	1,4	1,6
16	1,5		0,0	45,6	23,7	27,6	1,8	1,2
17	2,0		0,0	50,3	26,8	15,9	3,2	3,8
18	0	5	0,0	5,3	16,3	47,0	30,2	1,2
19	0,5		0,0	31,5	38,9	20,4	4,6	4,6
20	1,0		0,0	41,9	31,2	17,2	4,3	5,4

21	1,5	12,5	0,0	48,7	25,2	22,3	2,3	1,4
22	2,0		0,0	52,2	29,0	13,5	2,4	2,9
23	0		0,0	15,3	27,5	44,1	12,1	1,0
24	0,5		0,0	40,8	34,7	16,3	3,1	5,1
25	1,0		0,0	45,8	36,0	14,4	1,7	2,1
26	1,5		0,0	49,0	33,1	11,9	2,0	4,0
27	2,0		0,0	54,3	31,8	11,6	1,3	1,0

Таблица А.15 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева после истирания (класс крупности 15–20 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
28	0	2,5	0,0	3,5	14,5	36,5	42,6	2,8
29	0,5		0,0	33,5	35,4	23,4	3,2	4,4
30	1,0		0,0	51,9	25,1	20,5	1,1	1,4
31	1,5		0,0	55,0	20,5	19,4	3,1	1,9
32	2,0		0,0	59,8	21,6	12,9	2,6	3,1
33	0	5	0,0	11,6	17,7	37,9	31,1	1,7

34	0,5		0,0	37,3	35,6	18,6	4,2	4,2
35	1,0		0,0	52,2	25,7	14,2	3,5	4,4
36	1,5		0,0	58,4	20,5	18,1	1,9	1,2
37	2,0		0,0	61,5	23,3	10,9	1,9	2,3
38	0	12,5	0,0	23,0	30,1	33,4	12,2	1,4
39	0,5		0,0	48,2	30,4	14,3	2,7	4,5
40	1,0		0,0	58,2	27,8	11,1	1,3	1,6
41	1,5		0,0	59,9	26,0	9,4	1,6	3,1
42	2,0		0,0	61,3	27,0	9,8	1,1	0,8

Таблица А.16 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева после истирания (класс крупности 20–25 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта					
			13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
43	0	2,5	0,0	4,0	27,3	64,0	3,3	1,3
44	0,5		8,2	25,1	26,1	36,8	2,4	1,4
45	1,0		17,1	47,9	24,6	7,5	1,4	1,4
46	1,5		16,5	56,5	18,6	5,5	1,4	1,5

47	2,0		15,8	64,8	12,8	3,7	1,3	1,7
48	0	5	0,0	19,3	42,0	36,7	1,0	1,0
49	0,5		18,1	28,4	29,8	21,7	1,0	1,0
50	1,0		36,0	37,3	17,3	6,7	1,3	1,3
51	1,5		37,3	38,3	15,8	6,0	1,2	1,3
52	2,0		40,2	40,7	13,6	3,9	0,7	1,0
53	0		12,5	0,0	29,5	42,3	26,0	1,2
54	0,5	27,5		30,4	24,6	11,6	2,2	3,6
55	1,0	37,8		38,5	15,7	6,3	0,7	0,9
56	1,5	37,8		40,3	14,2	5,1	0,9	1,7
57	2,0	39,5		41,7	11,6	6,0	0,7	0,5

Таблица А.17 – Гранулометрический состав полукокса после термообработки с различным временем нагрева до и после истирания (класс крупности 13–50 мм)

№ эксперимента	Давление, МПа	Время нагрева	Выход надрешетного продукта								
			30-50	25-30	20-25	13-20	10-13	6-10	2-6	1-2	0-1
58	2,0	2,5	28,5	19,0	13,2	9,9	8,9	7,1	6,3	4,9	2,2
59 (истирание)	2,0		4,0	15,3	24,5	27,1	19,0	3,6	3,0	1,9	1,7

Приложение Б

Экспериментальное исследование процесса переработки бурого угля марки 1Б (ООО «Приморскуголь») и каменного угля марки Д (ООО «СУЭК-Хакасия», разрез Черногорский).

Таблица Б.1 – Оборудование, использованное в экспериментах

Функция	Оборудование
Подача греющего агента	Газодувка 1124304А (расход 78 л/с) с регулировочной системой
Измерение расхода греющего агента	Ротаметр РМФ ГУЗ – 100 Ротаметр РМФ ГУЗ – 65
Нагрев греющего агента	Воздухонагреватель LE 10 000 DF HT
Нагрев лабораторного реактора	Электропечь СНОЛ 10/10В
Измерение температур в реакторе	Преобразователи термоэлектрические ТХА-9425-08 (НПП «Эталон»)
Измерение массы	Весы ВТ 8908–150
Регулировка давления	Регулятор давления ВР60
Преобразование сигналов температурных датчиков	Аналого-цифровые преобразователи АДАМ-4018 с преобразователем интерфейса АДАМ-4520
Обработка и отображение информации с измерительного оборудования	1 desktop PC

Таблица Б.2 – Пределы и погрешности измерений в экспериментах

Величина	Пределы и погрешности измерения	
Расход воздуха, м ³ /ч	10-200; погрешность 2,5% от измеряемой величины	
Давление, МПа	0,1÷6,3, погрешность 0,05 МПа	
Температура, °С	-40÷ +900 (кратковременно до 1000), инерционность: ТХА-9425-08 – 15°С	
Технический и элементный состав твёрдой фазы	W^r	н/у
	A^d	±0,2
	V^{daf}	±1,8
	C^{daf}	±0,25
	H^{daf}	±0,15
	N^{daf}	±0,05
	O^{daf}	н/у

Таблица Б.1 – Технический анализ полукокса из угля марки 1Б

Температура нагрева угля, °С	Общая влага W^r , %	Зольность A^d , %	Выход летучих V^{daf} , %
Исходный уголь	42,3	7,9	55,4
400	0,6	12,7	49,2
500	1,5	15,6	25,6
570	2,1	16,5	14,3
600	1,2	18,3	10,6

Таблица Б.2 – Технический анализ полукокса из угля марки Д

Температура нагрева угля, °С	Общая влага W^r , %	Зольность A^d , %	Выход летучих V^{daf} , %
Исходный уголь	10,7	10,6	40,5
400	1,4	13,6	26,6
500	2,6	17,1	14,1
600	1,2	18,7	9,9

Таблица Б.3 – Характеристики полукокса из угля марок 1Б и Д

Марка исходного угля	Параметр	Давление, МПа						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
1Б	Прочность M_{10} , %	7,3	32	52,0	62,9	76,0	81	82,0
	Объем пор, $см^3/г$	0,39	0,30	0,25	0,22	0,20	0,19	0,19
	Водопоглощение, %	15,0	12,5	9,1	7,4	7,3	6,8	6,7
Д	Прочность M_{10} , %	58,7	66,7	74,7	78,5	82,3	82,1	82,0
	Объем пор, $см^3/г$	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19
	Водопоглощение, %	10,4	7,7	7,0	6,1	5,2	5,2	5,1

Приложение В

Расчет процесса нагрева бурого угля марки 2Б при избыточном давлении 2,0 МПа

Параметр	Значение										
	Длительность нагрева, мин.										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Температура ГА, °С	326	427	490	526	544	554	564	565	569	573	577
Массовый расход ГА, кг/ч	128,8	128,8	126,4	125,0	124,2	123,8	123,6	123,3	123,3	123,2	123,1
Объемный расход ГА, м ³ /ч	235,6	270,1	291,2	303,0	308,8	311,8	315,0	315,4	316,7	318,0	319,2
Скорость ГА, м/с	6,54	7,50	8,09	8,42	8,58	8,66	8,75	8,76	8,80	8,83	8,87
Кинематическая вязкость ГА, м ² /с·10 ⁶	52,2	67,3	77,5	83,4	86,5	88,1	89,8	90,0	90,8	91,5	92,1
Коэффициент теплопроводности ГА, Вт/(м·К)	0,047	0,053	0,056	0,058	0,059	0,060	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061
Число Рейнольдса	14148	12586	11787	11382	11191	11095	10991	10981	10939	10899	10860
Число Нуссельта	91,4	85,1	81,8	80,2	79,4	79,0	78,6	78,5	78,4	78,2	78,0
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	28,5	29,9	30,8	31,2	31,5	31,6	31,7	31,7	31,8	31,8	31,9
Число Био	9,1	9,6	9,8	10,0	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2
Число Фурье	0,00	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17
P_0	0,213	0,200	0,192	0,187	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,169
N_0	1,555	1,563	1,568	1,572	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577
μ_1	2,144	2,169	2,186	2,197	2,223	2,223	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224
Безразмерная температура центра	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,88	0,81	0,74	0,68
Безразмерная температура поверхности	0,21	0,18	0,16	0,15	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07
Температура центра засыпки, °С	20	20	20	20	20	20	44	86	125	162	196

Параметр	Значение										
	Длительность нагрева, мин.										
	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
Температура ГА, °С	581	584	588	591	594	597	600	603	605	607	610
Массовый расход ГА, кг/ч	123,1	122,9	122,8	122,8	122,7	122,6	122,6	122,5	122,4	122,4	122,3
Объемный расход ГА, м³/ч	320,4	321,6	322,7	323,7	324,7	325,6	326,5	327,4	328,2	328,9	329,6
Скорость ГА, м/с	8,90	8,93	8,96	8,99	9,02	9,05	9,07	9,09	9,12	9,14	9,16
Кинематическая вязкость ГА, м²/с·10⁶	92,8	93,4	94,0	94,6	95,2	95,7	96,2	96,7	97,1	97,6	98,0
Коэффициент теплопроводности ГА, Вт/(м·К)	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,063	0,063	0,063	0,063
Число Рейнольдса	10824	10789	10756	10724	10694	10666	10639	10614	10590	10568	10547
Число Нуссельта	77,9	77,8	77,6	77,5	77,4	77,2	77,1	77,0	76,9	76,9	76,8
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)	31,9	31,9	32,0	32,0	32,1	32,1	32,1	32,2	32,2	32,2	32,2
Число Био	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Число Фурье	0,19	0,20	0,22	0,24	0,25	0,27	0,29	0,30	0,32	0,34	0,35
P_0	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169
N_0	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577
μ_1	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224	2,224
Безразмерная температура центра	0,63	0,58	0,53	0,49	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30	0,27
Безразмерная температура поверхности	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
Температура центра засыпки, °С	228	258	285	311	335	358	379	398	416	433	449

Параметр	Значение										
	Длительность нагрева, мин.										
	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
Температура ГА, °С	612	614	615	617	619	620	621	622	623	624	624
Массовый расход ГА, кг/ч	122,3	122,3	122,2	122,2	122,2	122,1	122,1	122,1	122,1	122,0	122,0
Объемный расход ГА, м ³ /ч	330,3	330,9	331,5	332,0	332,4	332,9	333,2	333,5	333,8	334,0	334,2
Скорость ГА, м/с	9,17	9,19	9,21	9,22	9,23	9,25	9,26	9,27	9,27	9,28	9,28
Кинематическая вязкость ГА, м ² /с·10 ⁶	98,3	98,7	99,0	99,3	99,6	99,8	100,0	100,2	100,4	100,5	100,6
Коэффициент теплопроводности ГА, Вт/(м·К)	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Число Рейнольдса	10528	10510	10494	10479	10466	10454	10443	10434	10426	10419	10414
Число Нуссельта	76,7	76,6	76,6	76,5	76,4	76,4	76,3	76,3	76,3	76,2	76,2
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	32,3	31,9	32,3	32,3	32,3	32,3	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4
Число Био	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Число Фурье	0,37	0,39	0,41	0,42	0,44	0,46	0,47	0,49	0,51	0,52	0,54
P_0	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168
N_0	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577
μ_1	2,224	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225
Безразмерная температура центра	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
Безразмерная температура поверхности	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Температура центра засыпки, °С	463	477	489	500	511	521	530	538	545	552	558

Параметр	Значение							
	Длительность нагрева, мин.							
	165	170	175	180	185	190	195	200
Температура ГА, °С	625	625	625	625	625	624	624	623
Массовый расход ГА, кг/ч	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0
Объемный расход ГА, м ³ /ч	334,4	334,4	334,5	334,5	334,4	334,3	334,1	333,9
Скорость ГА, м/с	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,29	9,28
Кинематическая вязкость ГА, м ² /с·10 ⁶	100,7	100,7	100,7	100,7	100,7	100,7	100,6	100,6
Коэффициент теплопроводности ГА, Вт/(м·К)	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Число Рейнольдса	10411	10408	10407	10407	10409	10412	10416	10422
Число Нуссельта	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2	76,2
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4
Число Био	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Число Фурье	0,56	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64	0,66	0,68
P_0	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168
N_0	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577	1,577
μ_1	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225	2,225
Безразмерная температура центра	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
Безразмерная температура поверхности	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Температура центра засыпки, °С	564	569	574	578	581	585	587	590

Приложение Г

Акты внедрения



Филиал Общества с ограниченной ответственностью
«Сибирский научно-исследовательский институт углеобогащения» в г. Красноярске
Филиал ООО «СибНИИУглеобогащение» в г. Красноярске
Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Лебедевой, 64А, 3-ий этаж

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий филиалом
ООО «СибНИИУглеобогащение»
в г. Красноярске
В.Ю. Иншаков

В.Ю. Иншаков
_____ марта 2022 г.

АКТ

об использовании результатов диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
ЧЕРНЫХ Артема Петровича «Энерготехнологическая переработка угля под
давлением с целью производства кускового полукокса и газового топлива»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы А.П. Черных использованы ООО «СибНИИУглеобогащение» при разработке конструкторской документации на промышленный реактор энерготехнологической переработки бурого угля марки 2Б при давлении 2,0 МПа производительностью 4 600 т/год по карбонизату и 15 000 ГДж/год по тепловой энергии в виде горючего газа.

Полученные в диссертационном исследовании экспериментальные данные, разработанная на их основе расчетная модель и результаты этих расчетов стали основой конструкторских решений при разработке промышленного реактора. С использованием полученных данных были определены эффективные размеры основных рабочих элементов реактора, необходимые конструкционные материалы, длительность стадий нагрева и охлаждения процесса энерготехнологической переработки угля, что при заданной производительности реактора позволило определить размеры зон нагрева и загрузки угля и общие габаритные размеры реактора.

Результаты диссертационной работы, полученные в ходе исследований нагрева кускового угля в широком диапазоне давлений, могут быть использованы при разработке аналогичных реакторов повышенной мощности, при более высоком давлении и для углей различных марок.



СУЭК ОТКРЫТОЕ
АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО
«СУЭК-КРАСНОЯРСК»

РОССИЯ, 660049, Г. КРАСНОЯРСК,
УЛ. ЛЕНИНА, Д. 35, СТР. 2,
ТЕЛ.: (391) 228-60-01, 228-60-02,
ФАКС: (391) 227-19-00,
E-MAIL: PRIEMNAJA@SUEK.RU

WWW.SUEK.RU

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «СУЭК-Красноярск»

А.В. Федоров

_____ 2022 г.

АКТ

*об использовании результатов диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
ЧЕРНЫХ Артема Петровича «Энерготехнологическая переработка угля под
давлением с целью производства кускового полукокса и газового топлива»*

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы А.П. Черных внедрены при разработке технико-экономического обоснования создания комплекса производства кускового полукокса и газового топлива из бурого угля марки 2Б АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский имени М.И. Щадова», а также конструкторской документации на промышленный реактор.

Показатели процесса термической переработки при повышенном давлении, свойства производимых продуктов, материальный и тепловой балансы процесса получения кускового полукокса и газового топлива соответствуют результатам, полученным в диссертационной работе А.П. Черных.

Степанов Сергей Григорьевич,
начальник Управления инновационных
технологий переработки угля,
доктор технических наук