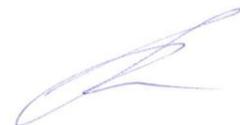


Общество с ограниченной ответственностью
«Энерготехнологическая компания «ТЕРМОКОКС»

На правах рукописи



Кулеш Михаил Владимирович

**АВТОТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕЙ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНОЙ
ГАЗИФИКАЦИИ В СЛОЕ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДУТЬЁМ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Исламов Сергей Романович

Красноярск – 2016

Содержание

Введение	5
Глава 1. Обзор существующих методов термической переработки угля	11
1.1 Перспективность термической переработки углей низкой степени метаморфизма.....	11
1.2 Газификация угля.....	13
1.3 Производство обогащенного твердого топлива.....	15
1.4 Зарубежный опыт полукоксования углей.....	17
1.4.1 Процесс ENCOAL.....	18
1.4.2 Печи Лурги для полукоксования.....	19
1.4.3 Переработка угля в печах типа SJ.....	21
1.4.4 Технология LiMax TM	25
1.4.5 Технология GEO-COAL.....	28
1.4.6 Технология сушки и брикетирования угля без связующего ВСВ.....	30
1.5 Отечественные технологии полукоксования.....	32
1.5.1 Разработка Энергетического института (ЭНИИ).....	32
1.5.2 Полукоксование на цепных колосниковых решётках.....	35
1.5.3 Полукоксование в туннельных печах.....	36
1.5.4 Получение кусковых углеродистых восстановителей в печах вертикального типа.....	37

1.6 Технологии серии ТЕРМОКОКС	38
1.6.1 Технология частичной газификации угля в кипящем слое (ТЕРМОКОКС-КС)	39
1.6.2 Технология частичной газификации угля в слоевых аппаратах (ТЕРМОКОКС-С).....	41
1.7 Теоретическая база исследований в области карбонизации угля.....	46
1.8 Основные выводы и постановка задач исследования.....	52
Глава 2. Экспериментальное исследование взаимосвязи тепловых параметров процесса карбонизации с прочностными характеристиками полукокса	54
2.1 Постановка задач экспериментального исследования.....	54
2.2 Методика проведения экспериментов и описание экспериментальной установки.....	55
2.3 Исследование процесса сушки одиночных образцов угля.....	58
2.4 Исследование процесса карбонизации одиночных образцов углей 3Б (разрез Большесырский) и Д (разрез Моховский).....	65
2.5 Исследование процесса карбонизации углей других марок ...	71
2.6 Обсуждение результатов исследований и основные выводы...	72
Глава 3. Исследование частичной газификации угля в слоевом аппарате с пульсирующим обращённым дутьём.....	75
3.1 Постановка задач экспериментального исследования	75
3.2 Поисковые эксперименты и обоснование необходимости применения пульсирующего дутья.....	78

3.3 Термическая переработка угля 3Б (разрез Большесырский)...	79
3.4 Термическая переработка угля марки Д (разрез Моховский)..	83
3.5 Термическая переработка угля марки Д (разрез Караканский)	85
3.6 Обсуждение полученных результатов.....	86
3.7 Краткие выводы.....	87
Глава 4. Подготовка результатов исследования к практическому использованию в промышленности.....	89
4.1 Постановка задач этапа.....	89
4.2 Технические решения по аппаратурному оформлению технологического процесса.....	89
4.3 Технологическая схема производства облагороженного твердого топлива.....	94
4.4 Технические показатели производства.....	98
4.5 Экономические показатели производства.....	103
4.6 Краткие выводы.....	106
Заключение.....	108
Список использованных источников.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А: Экспериментальное оборудование.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Протоколы испытаний.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ В: Технологический регламент.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Г: Акты внедрения.....	161

ВВЕДЕНИЕ

В России в последние годы уделяется особое внимание исследованиям в области глубокой переработки бурых и длиннопламенных углей. На ближайшую перспективу поставлена задача увеличения доли угля в энергетическом балансе страны за счёт снижения потребления природного газа [1].

Согласно принятой Правительством РФ «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» поставлена задача обеспечения конкурентоспособности угольной продукции на внутреннем рынке с заменяющими её энергоресурсами, а на внешнем – с альтернативными поставщиками [2]. К сожалению, по целому ряду причин эта программа не исполняется [3]. В то же время увеличение потребления ископаемых углей будет сопровождаться ростом экологической нагрузки на окружающую среду, поскольку при сжигании и переработке угля образуется больше вредных побочных продуктов по сравнению с нефтью и природным газом.

Снижение негативного воздействия угольной энергетики на окружающую среду может быть достигнуто за счёт совершенствования технологии сжигания угля и перехода к использованию экологически более безопасных видов топлива угольного происхождения. Традиционные методы энергетического и технологического использования угля, по существу, достигли своего предела экономической и экологической эффективности. В связи с этим значительный интерес представляет разработка новых способов переработки угля, которые обеспечивают качественное повышение энергоэффективности использования угля, а также высокий уровень экологической безопасности, как получаемой продукции, так и самих способов переработки [4].

Угли Канско-Ачинского бассейна (КАБ) являются одними из наиболее перспективных для комплексной переработки. Бассейн располагает уникальными запасами бурых углей, пригодных для добычи открытым способом. При выборе того или иного способа переработки Канско-Ачинских углей прежде всего необходимо использовать их преимущества: низкую себестоимость добычи;

низкую зольность; низкое содержание серы, фосфора, тяжелых металлов и других вредных примесей; высокую реакционную способность; стабильность состава, в т.ч. минеральной части [5].

Угли низкой степени метаморфизма (далее для сокращения будем использовать термин «молодые угли», подразумевая под ним угли низкой степени метаморфизма, или что то же самое – угли с высоким содержанием летучих веществ), каменные и бурые, необходимо рассматривать не только как топливо для сжигания, но и как ценное технологическое сырье для переработки в продукцию с улучшенными потребительскими свойствами, что, в свою очередь, обеспечит расширение сферы их применения. Настоящая работа посвящена именно этой *актуальной теме*.

Цель работы заключается в разработке научно обоснованного технологического процесса термической переработки углей низкой степени метаморфизма для получения топлива с повышенными потребительскими свойствами в части теплотехнических, экологических и прочностных характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи исследования**:

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

1. Выполнить критический анализ технологий термической переработки угля для оценки перспективности их промышленного применения и на основе полученных результатов определить направление исследований.

2. Выполнить экспериментальное исследование процесса термообработки одиночных частиц угля для определения основных управляющих параметров, изучить влияние этих параметров на теплотехнические и прочностные характеристики получаемого полукокса.

3. Опираясь на результаты исследований, полученных на одиночных частицах угля, обосновать выбор конструкции установки для нового процесса

производства полукокса. На данной установке выполнить экспериментальные исследования по переработке углей.

4. Разработать технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма и оценить эффективность его применения в промышленном масштабе.

Теория и методология исследований основаны на положениях теплофизики, химической физики, теплоэнергетики, а также экспериментальных и теоретических данных в области термической переработки угля.

Объектом исследования является технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма.

Предмет исследования – взаимосвязь тепловых процессов переработки углей с характеристиками конечных продуктов.

Методы исследований: натурный эксперимент, включающий измерение характеристик по стандартизированным методикам, статистическую обработку полученных результатов и др.; метод аналогий и сравнения; метод анализа и обобщения.

Информационную базу исследований в данной работе составили источники в виде научных статей в журналах, научных докладов, отчётов, данных и сведений из книг, презентаций технологий переработки углей, материалов научных конференций, а также результаты собственных экспериментов и расчётов.

Значительный вклад в результаты исследований, использовавшихся в настоящей работе, внесли такие исследователи, как Е.М. Тайц, Н.С. Грязнов, П.С. Маковецкий, К.И. Сысков, З.Ф. Чуханов, В.В. Померанцев, А.А. Агроскин, М.Б. Школлер, В.С. Славин, С.Р. Исламов и др.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования процесса термообработки одиночных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей во взаимосвязи с прочностными характеристиками получаемого полукокса, которые показывают, что при изменении температуры греющей среды со скоростью не более 0,056 град/с обеспечивается прочность полукокса на раздавливание не менее 8 МПа.

2. Результаты исследования процесса частичной газификации углей в слоевом реакторе с пульсирующим обращенным воздушным дутьем, которые позволили определить количественные значения управляющих параметров для получения высококалорийного твердого топлива из исследуемых углей, а именно: расход воздуха, время подачи дутья, время останова дутья.

3. Новый технологический процесс производства кускового полукокса из углей низкой степени метаморфизма, отличающийся возможностью применения слоевых аппаратов с пульсирующим обращенным воздушным дутьем.

Научная новизна работы, заключается в следующем:

1. Экспериментально установлен характер взаимосвязи темпа нагрева и прочности отдельных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей в процессе их термообработки, что позволило определить режимы нагрева куска угля для достижения высокой прочности полукокса.

2. Установлено, что в процессе частичной газификации в слоевом реакторе с обращенным дутьем снижение скорости нагрева кускового угля обеспечивается применением пульсирующего режима дутья.

3. Разработан новый технологический процесс автотермической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ в высококалорийное твердое топливо, отличающийся возможностью применения слоевых аппаратов с пульсирующим обращенным воздушным дутьем. Подана заявка на изобретение (заявка на пат. 2015143182 от 09.10.2015).

Практическая значимость. Новые экспериментальные исследования позволили: определить технологические режимы переработки ряда углей

(марки Б и Д) в слоевом газификаторе с пульсирующим обращенным воздушным дутьем, обеспечивающим экономию энергетических ресурсов и улучшение качества продукции; разработать новый технологический процесс автотермической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ в кусковое высококалорийное топливо (полукокс) с возможностью комбинированного производства энергоносителей, обладающий улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками; разработать технологический регламент производства полукокса из углей низкой стадии метаморфизма и практические рекомендации по проектированию такого производства.

Личный вклад автора состоит в подготовке и модернизации экспериментальных установок, разработке методик исследования, постановке, подготовке и проведении экспериментов, получении и обработке экспериментальных данных на всех этапах работы, в апробации результатов работы, разработке практических рекомендаций по реализации данного технологического процесса в промышленном масштабе, подготовке текстов статей для публикации в научных журналах и сборниках конференций. Общая научная идея, направления и задачи исследований были сформулированы при участии научного руководителя.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных средств и аттестованных методик проведения исследований; применением современного, откалиброванного и поверенного регистрирующего и испытательного оборудования, позволяющего с высокой точностью осуществлять измерения требуемых параметров; удовлетворительной сходимостью экспериментальных результатов при повторном воспроизведении в одних и тех же условиях; непротиворечивостью исследованиям других авторов.

Реализация результатов работы. Прикладные результаты диссертационной работы (технологический регламент производства, рекомендации по проектированию углеперерабатывающего производства, экономические расчеты и др.) приняты компанией ООО «Сибуголь»

(г. Красноярск), проектным институтом СибНИИУглеобогащение (АО «СУЭК»), ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск) для использования при проектировании углеперерабатывающих предприятий, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация результатов диссертационных исследований. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития» (2015), IX всероссийской конференции «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2015), на научном семинаре научно-исследовательского отдела ООО «ЭТК Термококс» (2016).

Публикации по теме диссертационных исследований. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций, из них 2 статьи переведены на английский язык и опубликованы в журналах индексируемые Scopus, Web of science, Thomson Reuters, 2 доклада в сборниках международных и российских конференций индексируемые РИНЦ.

Глава 1. Обзор существующих методов термической переработки угля

1.1 Перспективность переработки углей низкой степени метаморфизма

Уголь является одной из основных составляющих топливно-энергетического баланса многих стран мира, несмотря на огромные масштабы потребления нефти и газа. В основном уголь используется как энергетическое, химическое и технологическое сырье во многих областях промышленности. Данное полезное ископаемое представляет собой уникальный материал с огромным потенциалом для переработки. Несмотря на широкое распространение угля, экологическая опасность при использовании этого вида топлива очень высока, в первую очередь из-за повышенной эмиссии вредных веществ в атмосферу при его сжигании. Однако известно, что можно значительно снизить ущерб природной среде от угольной энергетики, если использовать облагороженный или «чистый уголь», синтетические газообразные или жидкие виды топлива, получаемые путем химической переработки угля [6].

На свойства продукции из угля также влияет и сырье, которое используется в процессе технологической переработки. Так, молодые угли характеризуются малым содержанием углерода и низкой структурной прочностью, вследствие этого сфера применения твердых продуктов из таких углей является более ограниченной, чем у углей высокой степени метаморфизма. К углям низкой степени метаморфизма относятся бурые угли и часть каменных (марки Д и Г). Характерной их особенностью является высокое содержание летучих веществ ($V^{daf} > 40\%$).

Российская федерация обладает колоссальными запасами бурых углей. Наибольшая их часть сосредоточена на территории Красноярского края и в Южной Якутии. Наиболее перспективными для комплексной переработки являются угли Канско-Ачинского бассейна [7]. В первую очередь, «сибирские угли» обладают высокой теплотой сгорания, низким содержанием золы и серы,

отсутствием вредных элементов, а также возможностью добычи открытым способом. Причем одна тонна условного топлива в 2–3 раза дешевле, чем из природного газа и в 3–5 раз – чем из нефти [8]. Эти и другие преимущества делают данные бурые угли уникальным сырьем для получения ценных продуктов переработки.

Несмотря на преимущества углей данного бассейна, практически всё добываемое сырье идет на сжигание с традиционно низкими для угольной энергетики показателями экономической и экологической эффективности [5]. Однако процент перерабатываемого сырья постоянно увеличивается. Известно, что комплексное технологическое использование дешевых малозольных бурых углей Канско-Ачинского бассейна позволяет получать целый спектр продуктов переработки. Ниже на рисунке 1.1 представлены потенциально возможные варианты переработки угольного сырья Канско-Ачинского бассейна.

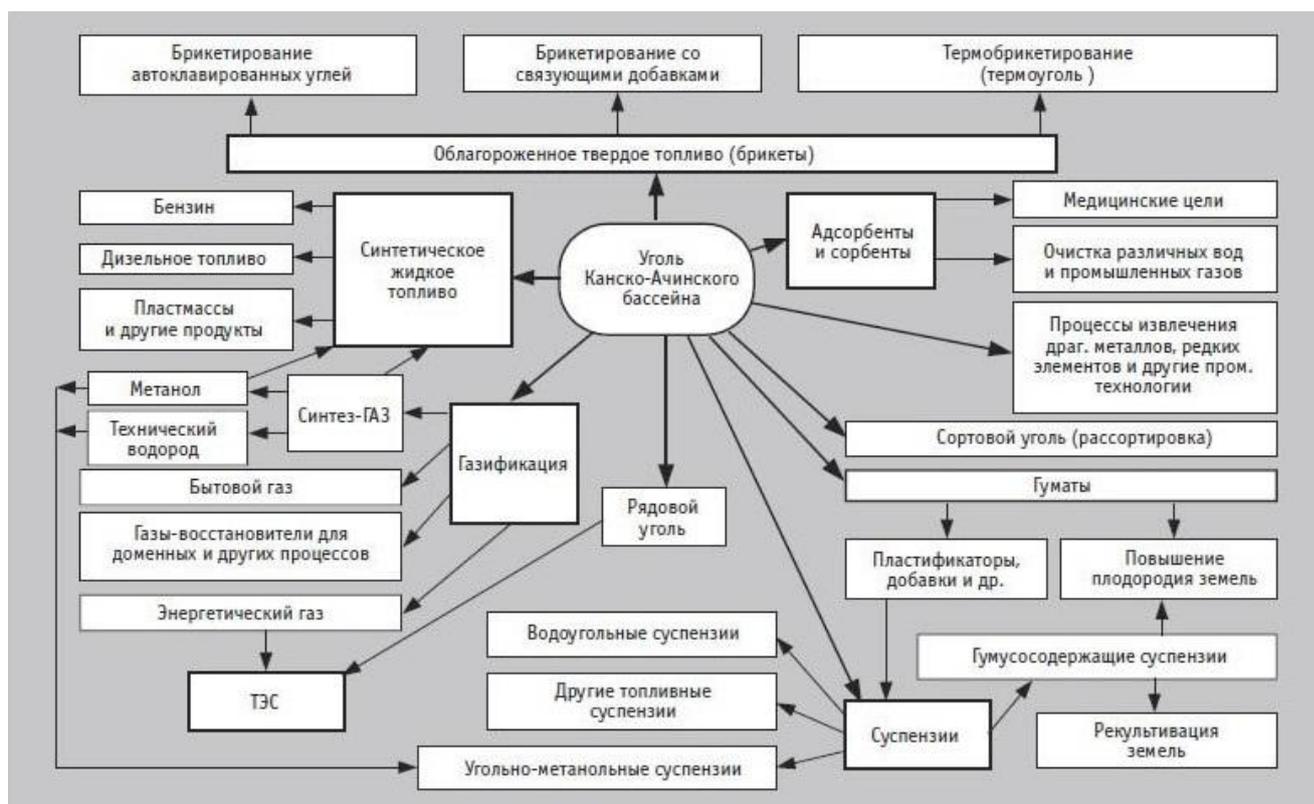


Рисунок 1.1 – Варианты технологической переработки углей Канско-Ачинского бассейна [8]

С каждым годом предъявляются всё более высокие требования к использованию угля, уже на сегодняшний день во многих странах мира введены ограничения на его использование. В связи с этим возрастает потребность общества в высококачественных углях. Одним из перспективных решений проблемы является термическая переработка дешевых углей низкой степени метаморфизма в высококалорийное топливо с низким содержанием летучих веществ – потенциальный заменитель дорогих и дефицитных марок углей [9].

Как известно, основной проблемой термической переработки молодых углей является резкое снижение прочности куска в процессе удаления влаги и летучих веществ. Низкая прочность усложняет транспортировку и перегрузку бурого угольного полукокса, что радикально ограничивает сферу его применения и вызывает необходимость введения дополнительного передела – формования (брикетирование, экструдирование и т. п.) [9]. Процесс формования решает задачи связанные со структурной прочностью полукокса, однако является достаточно затратным, что оказывает влияние на стоимость конечного продукта.

В данной работе поставлена задача увеличения прочности куска путем оптимизации процесса термической обработки угля.

Первоначально рассмотрим современное состояние технологий переработки низкосортных углей. При этом основное внимание будет уделено технологиям полукоксования бурого угля. В данной главе проанализированы наиболее перспективные отечественные и зарубежные разработки в этой области промышленности.

1.2 Газификация угля

Газификация твердого топлива – процесс превращения органического вещества топлива в горючий газ при воздействии на него свободного кислорода (воздух, кислород) или связанного кислорода (водяной пар, углекислый газ) [10].

Технология газификации представляет интерес для энергетиков и других потребителей газообразного топлива, например, при обжиге и сушке руд, кирпича

и нерудных материалов. Однако можно выделить в отдельную сферу производство газа химического назначения и бескоксую металлургию (прямое восстановление металлов). Что касается последнего, то это направление активно развивают известные во всем мире компании Kobe Steel, Hysla, Midrex Technologies [5]. На рисунке 1.2 представлены различные сферы применения продуктов, получаемых методом полной газификации угля.



Рисунок 1.2 – Сферы применения продуктов газификации угля [11]

Среди первых аппаратов, использовавшихся для газификации угля в промышленных масштабах можно отметить такие как «Лурги», «Винклера» и «Копперс-Тотцека». В настоящее время применяются аппараты, как первоначальных конструкций, так и их различные модификации, однако наряду с этим утверждением в разных странах идет разработка большого числа новых технологических решений в сфере газификации угля.

Область исследований технологий газификации угля является достаточно широкой, однако в рамках диссертационной работы более целесообразным представляется уделить большее внимание технологиям карбонизации угля.

1.3 Производство обогащенного твердого топлива

Производство обогащенного твердого топлива из молодых углей, является наиболее экономически привлекательным способом их использования на ближайшую и среднесрочную перспективу [5]. Речь идет о карбонизации бурых и длиннопламенных углей. Продукция ориентирована на крупномасштабный рынок металлургического сырья, специализированного технологического топлива, бездымного топлива. Среднетемпературный кокс из этих углей имеет отличную перспективу как заменитель дорогостоящего классического кокса в целом ряде металлургических процессов: производство ферросплавов, агломерация и т. п. В доменном производстве при неизбежной замене природного газа пылеугольным топливом может быть использовано до 15 млн. тонн в год буроугольного кокса для вдувания в горн. Уровень цен за 1 тонну условного топлива в металлургии в несколько раз выше, чем в энергетике, а объем потребления исчисляется десятками миллионов тонн и с каждым годом возрастает.

Объем этого сегмента рынка формируется за счет необходимости замещения:

- дорогостоящего классического кокса более дешевым карбонизатом, изготовленным из недорогих марок угля; потенциальный объем потребления СНГ - более 5 млн. тонн в год;
- природного газа в доменном производстве пылеугольным топливом (ПУТ), потенциальный объем потребления СНГ – более 15 млн. т в год.

Большой потенциал расширения рынка сбыта имеют цементные, глиноземные производства и другие крупные потребители технологического топлива, которые также нуждаются в замещении природного газа или дорогостоящего привозного угля высококалорийным карбонизатом из местных низкосортных углей. Потенциальный объем потребления этого сегмента рынка в СНГ – более 30 млн. тонн в год. Необходимо отметить и значительный экспортный потенциал этого класса продукции.

Подавляющее большинство промышленно освоенных технологий термической переработки угля (а также многие из предлагаемых к внедрению), в том числе традиционное коксование, основаны на применении аллотермических аппаратов, в которых нагрев угля осуществляется через стенку или за счет контакта с вводимым извне теплоносителем. Для этого используются дымовые газы, твердый зернистый теплоноситель (как правило, это уже карбонизированный уголь) или оба вида теплоносителя.

У аллотермических технологий три принципиальных недостатка, которые обуславливают высокую стоимость конечного продукта:

- низкая энергоэффективность, обусловленная внешним подводом тепла;
- сложность переработки и утилизации побочных продуктов – смол, подсмольных вод и фусов;
- экологическая опасность производства.

Последний фактор обусловлен поступлением в окружающую среду отработанного теплоносителя и сточных вод, а вместе с ними – оксида углерода, канцерогенов, фенолов, пыли и пр. Токсичность и мутагенная активность продуктов переработки угля в сотни раз превосходит токсичность нефтепродуктов. А затраты на их дезактивацию чрезвычайно высоки. Например, для приведения коксовой батареи в соответствие природоохранным нормам требуется сооружение очистных систем, соизмеримых по стоимости с коксовой батареей.

Сегодня на первый план выходят автотермические способы переработки угля, в которых существенно выше интенсивность подвода тепла к углю, а «огневое обезвреживание» летучих продуктов пиролиза осуществляется непосредственно в процессе переработки угля внутри основного технологического аппарата [5].

1.4 Зарубежный опыт полукоксования углей

В зависимости от конечной температуры коксования различают три группы процессов: низкотемпературное (500–700°С), среднетемпературное (700–900°С) и высокотемпературное коксование (свыше 900°С) [12]. Однако отдельно стоит отметить, что разные авторы [12,13,14] приводят различные границы температур для этих процессов. Различия обычно колеблются в интервале 50-100°С, в целом температурные уровни схожи. Твердый продукт, полученный в результате низкотемпературного коксования, называют полукоксом. Попутно с производством полукокса в процессе низкотемпературного коксования получают и другие, не менее ценные продукты, хотя всё же основную ценность составляет именно угольный полукокс.

Для производителей важно, чтобы продукт полукоксования имел конкурентоспособные характеристики по сравнению с аналогичными видами топлива. Его стоимость зависит не только от цены угольного сырья, но на этот фактор также оказывает влияние стоимость процесса переработки. Одним из примеров использования дешевого угля является карбонизация низкосортных углей 2Б, 3Б и марки Д в промышленные или бытовые виды топлива, которые составляют конкуренцию углям высшей степени метаморфизма и продуктам их переработки.

В мире накоплен огромный опыт в области низкотемпературной карбонизации угля [15–23]. Способы подвода тепла к обрабатываемому сырью могут быть разнообразны. В производстве применяются варианты перерабатывающих установок, как с внутренним, так и с внешним подводом тепловой энергии. В качестве примера старых конструкций можно привести вертикальные и наклонные металлические камеры (реторты) с внутренним и внешним обогревом, а также туннельные и камерные печи. Сравнительно невысокая производительность и малая надежность привели к отказу от некоторых из этих конструкций [24]. Однако многие из них применяются и по сей день.

В продолжение главы будут рассмотрены различные способы и агрегаты для полукоксования органического сырья, в частности низкосортных углей.

1.4.1 Технология ENCOAL

При варианте с внешним обогревом тепло к сырью подводится от стен печи, которые снаружи обогреваются продуктами горения отопительного газа [25].

Печи с внешним обогревом обладают достоинством, которое заключается в том, что продукты горения и продукты полукоксования не смешиваются. У печей данного типа имеется не менее существенный недостаток. Вследствие низкой теплопроводности сырья загрузка нагревается неравномерно. Это негативное влияние критически сказывается на качестве получаемого карбонизата. Для нивелирования данной проблемы приходится уменьшать толщину слоя перерабатываемого сырья, снижать скорость нагрева, либо же шевелить загрузку топлива, что в свою очередь отрицательно сказывается на производительности печей. В качестве примера реализации технологии с внешним обогревом можно привести опытно-промышленный завод ENCOAL.

Опытно-промышленное производство по технологии ENCOAL

Одна из технологий полукоксования с внешним обогревом была разработана и запущена в производство в США. В 90-е годы была запущена в эксплуатацию опытно-промышленная установка ENCOAL производительностью 300 тыс. тонн угля в год [26–29]. Технология ENCOAL также известна в России как «мягкий пиролиз» (полукоксование при температуре 550-600°C, давлении 101325 Па = 1 атм). Суть технологии заключается в следующем: предварительно измельченный и подсушенный уголь подается в ретортную камеру с внешним обогревом для термической обработки. В результате термообработки получают следующие продукты: полукокс, смола, газ.

Схема производства представлена на рисунке 1.3

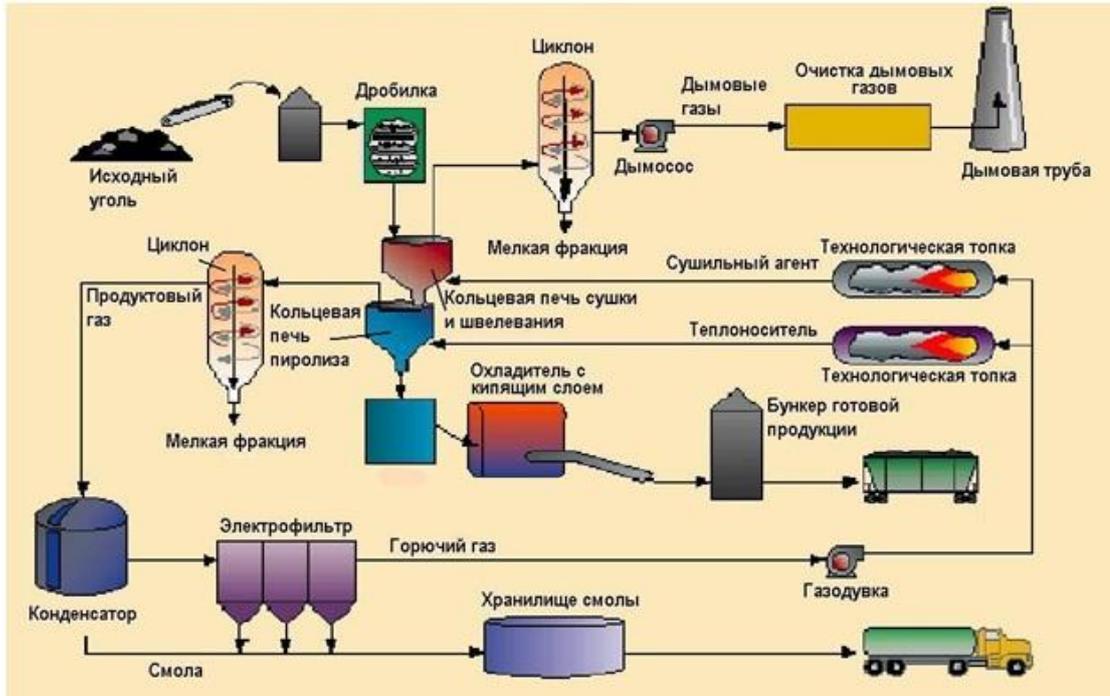


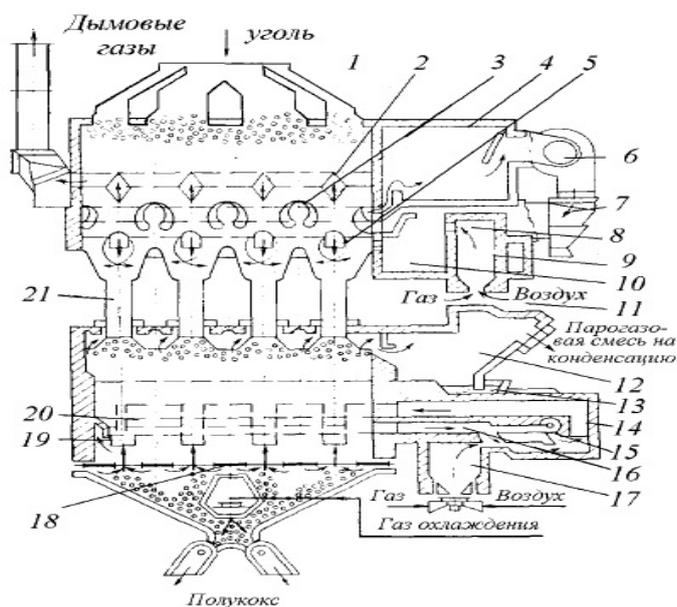
Рисунок 1.3 – Схема производства по технологии ENCOAL [26]

Несмотря на положительные результаты опытно-промышленной апробации технологии, установку пришлось законсервировать из-за экономической неэффективности. По данным [30–35] для строительства завода с возможностью переработки 5,5 млн. тонн угля в год затраты составляют около 475 млн. долларов.

1.4.2 Печи Лурги для полукоксования

Печь Лурги является самой распространенной печью с внутренним автотермическим обогревом. Эти печи широко применялись и продолжают использоваться в настоящее время в промышленности разных странах мира. Печь Лурги предназначена для полукоксования кускового фракционированного угля. В процессе термообработки сырье проходит последовательно зоны сушки и полукоксования. В зоне сушки обогрев осуществляется смесью дымовых газов, получаемых при сжигании обратного газа в специальной топке с рециркулирующим газом этой же зоны. В зоне термического разложения обогрев

обеспечивает смесь дымовых газов, полученных также в специальной топке, с газом, поступающим из зоны охлаждения. При этом температура газотеплоносителя составляет 550–600°C при полукоксовании и 800–1000°C — при среднетемпературном коксовании. В нижней зоне полукоксы охлаждаются обратным газом до 150–200°C и далее передается в бункер охлаждения. В зависимости от параметров процесса производительность может варьироваться в пределах 200–300 тонн угля в сутки [24]. Схема трехзонной печи Лурги для полукоксования приведена на рисунке 1.4



1 – распределительное устройство; 2 – коробка для отвода газов из камеры сушки; 3 – коробка для отсоса циркулирующего теплоносителя; 4 – отстойная камера циркулирующего теплоносителя; 5 – коробка для подачи теплоносителя; 6 – вентилятор-дымосос для отсоса циркулирующего газа; 7 – смешительная камера; 8 – окно топки камеры сушки; 9 – топка; 10 – смешительная камера; 11 – горелка; 12 – газосборный канал; 13 – гидрозатвор; 14 – камера смешения зоны полукоксования; 15 – инжектор; 16 – сборный канал газа охлаждения; 17 – топка камеры полукоксования; 18 – устройство для разгрузки полукокса; 19 – колосники для отвода газа охлаждения; 20 – колосники для подачи теплоносителя в зону полукоксования; 21 – переточные рукава

Рисунок 1.4 – Трехзонная печь Лурги для полукоксования [24]

Основным недостатком печей Лурги является невозможность использования в качестве сырья топлив мелкой фракции и углей с низкой термической прочностью. Этот факт обуславливается высокой скоростью движения газа-теплоносителя в засыпке. Промышленные эксперименты по возможности использования углей Канско-Ачинского угольного бассейна в качестве сырья в печах Лурги показали отрицательный результат [36].

В России печи Лурги использовались на заводе Ангарской нефтехимической компании (г. Ангарск, Иркутская область). В настоящее время на Ленинск-Кузнецком заводе полукоксования эксплуатируются шахтные печи Пинча – ближайшего прототипа печи Лурги.

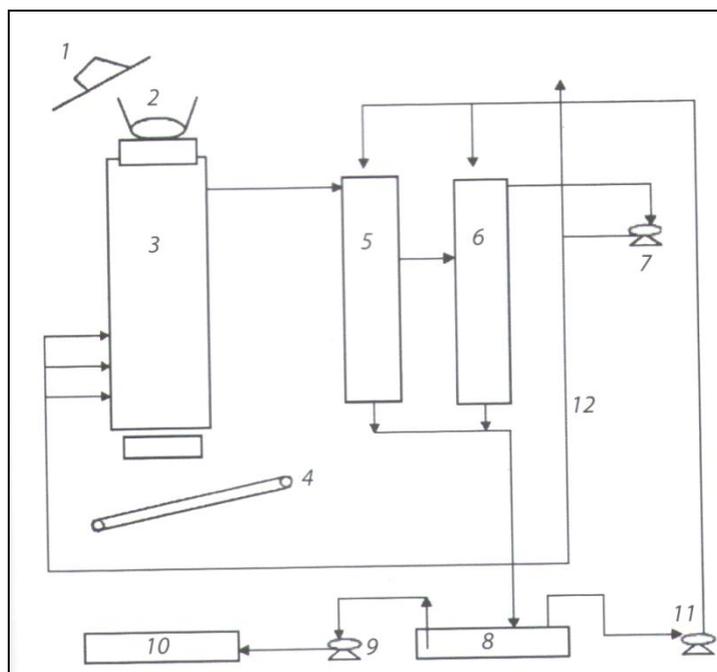
1.4.3 Переработка угля в печах типа SJ

Одним из успешных примеров применения печей с внутренним обогревом является завод полукоксования, оснащенный вертикальными печами типа SJ. Данное предприятие находится в Китае (уезд Шеньму, провинция Шаньси), а его производительность оценивается в 100 тыс. тонн полукокса в год (2 печи). В качестве сырья используются молодые каменные угли. На рисунке 1.5 представлена фотография именно этого предприятия с печами типа SJ в качестве основных перерабатывающих агрегатов.



Рисунок 1.5 – Вертикальная печь типа SJ (Китай) [37]

На рисунке 1.6 приведена принципиальная схема процесса переработки угля в печи SJ.



1 – тележка для подачи угля; 2 – бункер для загрузки угля; 3 – печь полукоксования; 4 – ленточный конвейер для полукокса; 5 – скруббер Вентури; 6 – колонна вихревого потока; 7 – центробежно-нагревательная воздуходувка; 8 – емкость для оседания смолы и аммиачной воды; 9 – насос для выкачивания смолы; 10 – емкость для смолы; 11 – насос для разбрызгивания горячей аммиачной воды; 12 – труба для подачи в печь подогретого газа

Рисунок 1.6 – Принципиальная схема производства полукокса в печах типа SJ [37]

Печь SJ представляет собой установку вертикального типа, состоящую из четырех камер. Визуально печь похожа на прямоугольный параллелепипед со сторонами ~ 7 м и толщиной ~ 4 м. В качестве сырья для переработки применяется уголь крупностью 20–80 мм, который загружают сверху печи тележкой 1 в бункер 2. Имеются четыре таких бункера (по числу камер печи). Загрузка угля непосредственно в печь осуществляется периодически (~ 5 –6 т/ч) и синхронно связана с выгрузкой полукокса. Газ для нагрева загрузки вдувается через фурмы, установленные в стенах печи. Сгорая и частично сжигая выделившиеся при нагреве летучие компоненты угля, газ равномерно нагревает

загрузку угля. Камеру 3 можно условно разделить на три зоны: верхняя – подсушка угля, средняя – непосредственно полукоксование; нижняя – охлаждение и выгрузка полукокса. В зоне полукоксования достигается температура $750\pm 20^{\circ}\text{C}$, в зоне охлаждения - не ниже $80\text{--}100^{\circ}\text{C}$. Для охлаждения полукокс подается в водяную ванну и далее сушится на конвейере 4 [37].

Выходящая из печи парогазовая смесь состоит из газа сушки угля и части летучих продуктов; газа от сгорания смеси газа и воздуха, вдуваемого в нижнюю часть печи, и сгорания летучих веществ; пара от тушения кокса. Этот газ отводится через трубу и далее очищается в скруббере Вентури 5 и вихревой колонке 6. Технологический газ с помощью вентилятора 7 возвращается в печь для последующего сжигания. В процессе коксования образуется смола, которая поступает в осадочную емкость 8 для дегидратации, потом её насосом 9 направляют в смолоприемник 10 для вторичной дегидратации [37].

Отмечается, что в результате термопереработки получается полукокс достаточно высокого качества. Производимый продукт широко используется в производствах ферросилиция, ферромарганца и карбида кальция, а также начинается применение в производстве фосфора.

Авторами [37] отмечены следующие преимущества, рассмотренной технологии полукоксования с использованием вертикальных печей типа SJ:

- компактность установки;
- высокая производительность;
- простота в обслуживании и легкость управления процессом;
- высокое качество полукокса как углеродистого восстановителя.

Из недостатков данной технологии необходимо отметить: низкую экологическую безопасность производства, а также возможность переработки только каменных углей.

1.4.4 Технология LiMax™

Технология переработки угля под названием LiMax™ также родом из Китая. За последние 10 лет корпорация «ГО БАН» стала одним из лидеров индустрии Китая по переработке низкосортных углей в высококалорийное топливо. Данный факт подтверждается запуском углеперерабатывающего завода во Внутренней Монголии мощностью 1 млн. т в год, а в данный момент компания работает над расширением производства до 4 млн. т в год [38]. Как заявляют авторы, их технология является наиболее продвинутой в мире в сфере переработки низкосортных углей в высококалорийное топливо.

Технология LiMax™ является самостоятельной разработкой корпорации «ГО БАН». Кроме того, в известном во всем мире адвокатском агентстве «Finnegan» выполнены формальности по защите прав на интеллектуальную собственность. В процессе термообработки по технологии LiMax™ удается полностью удалить влагу из низкосортного угля, в результате этого получается сушеный уголь с развитой пористой структурой. 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. На рисунке 1.7 представлен процесс модификации угля по технологии LiMax™.

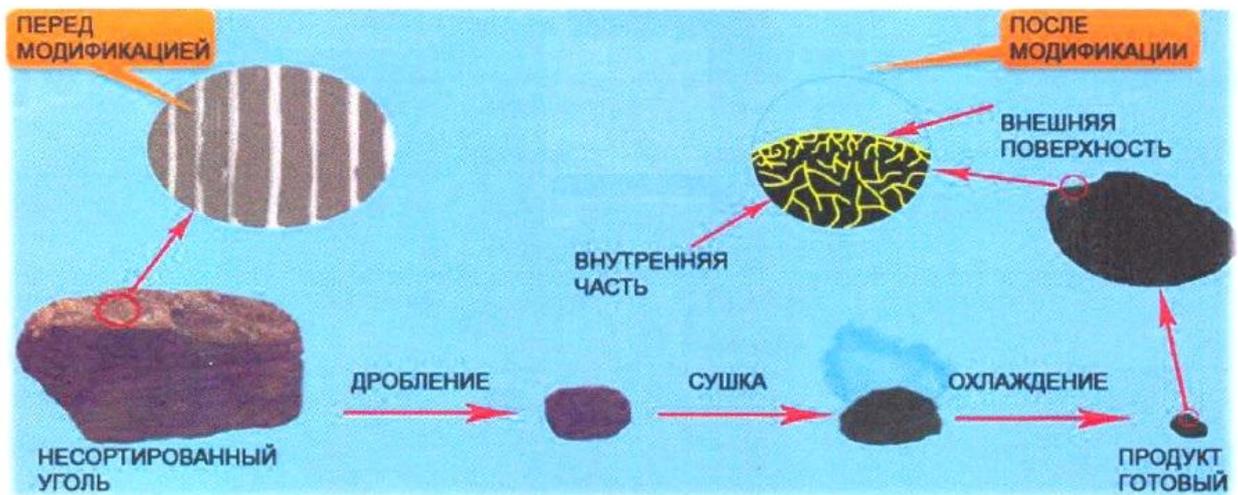


Рисунок 1.7 – Процесс модификации куска бурого угля по технологии LiMax™ [39]

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. Себестоимость переработки составляет от 5 до 10 долларов за тонну продукта (при мощности завода в 1 млн. т. угля в год). Стоимость завода мощностью 1 млн. т. угля в год составляет примерно 25–30 млн. долларов [39].

На рисунке 1.8 изображена принципиальная схема технологии полукоксования низкосортных углей LiMax™.

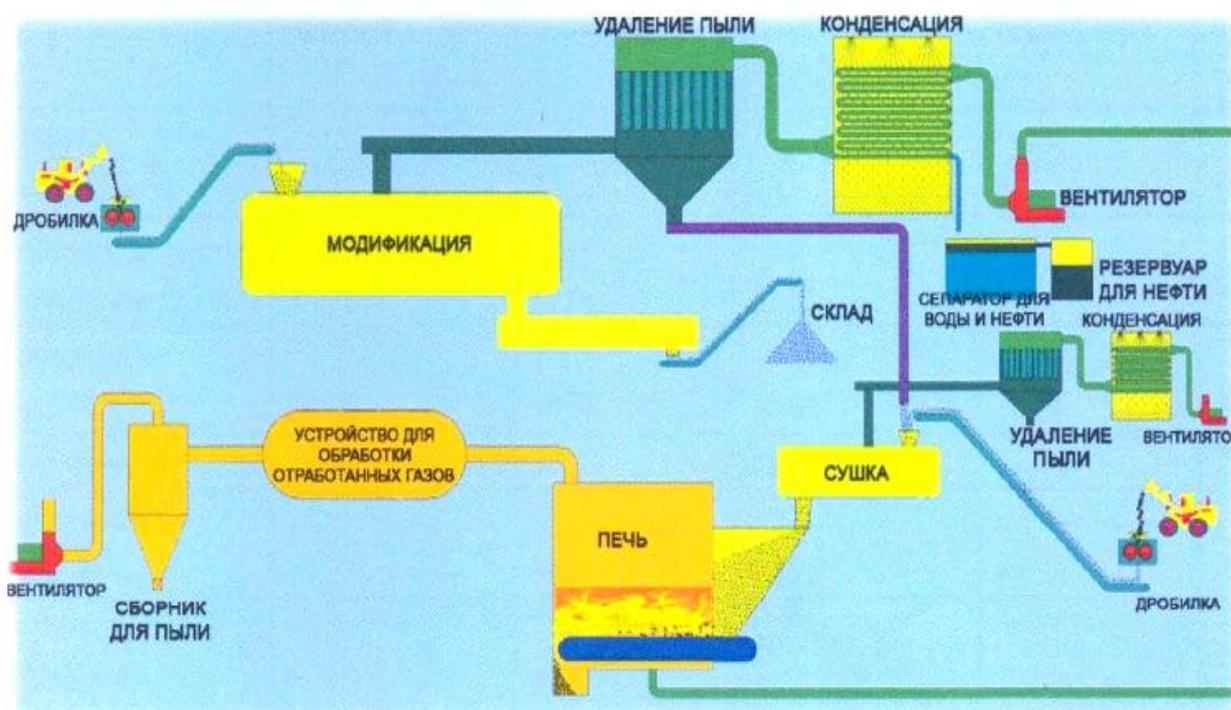


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема процесса переработки углей LiMax™ [39]

Высококалорийное топливо не является единственным продуктом переработки, также попутно производится горючий газ и электроэнергия. Преимуществами технологии являются [40]:

- низкие капитальные затраты
- низкие эксплуатационные затраты;
- производство гидрофобизированного и транспортабельного топлива;
- возможность производства продуктов карбонизации с широким спектром характеристик;
- попутное производство электроэнергии.

На своём сайте разработчик отмечает, что обработка бурого угля по технологии LiMax™ аналогична его дальнейшей углефикации и переводит его в разряд углей более высокой степени метаморфизма. В то же время непонятно как предполагается использовать получаемое по технологии LiMax™ топливо (о нём говорится лишь как о «сырье для углехимической промышленности»).

Недостатками данной технологии являются: ограничения по классу крупности и маркам угля, а также низкая экологическая безопасность производства.

1.4.5 Технология GEO-COAL

Технология под названием GEO-COAL разработана в Индонезии. Суть технологии заключается в следующем: в процессе термической переработки из низкосортных углей удаляется влага и большая часть летучих веществ, в результате чего остается высококалорийный карбонизат. Технология позволяет получать из низкосортного угольного сырья несколько видов высококалорийных продуктов: GEO-LITE (20,1–23,9 МДж/кг или 4800–5700 ккал/кг), GEO-НІ (23,9–28,5 МДж/кг или 5700–6800 ккал/кг), GEO-MET (более 28,5 МДж/кг или 6800 ккал/кг).

В первоисточнике [41] сообщается, что в качестве сырья для переработки может использоваться как уголь, так и другое органическое сырье, например бамбук или древесина. Как и в технологии LiMaxTM, по словам разработчиков, уголь после термообработки обладает повышенными гидрофобными характеристиками. На рисунке 1.9 представлена схема углеперерабатывающего предприятия с обозначением последовательности процессов.

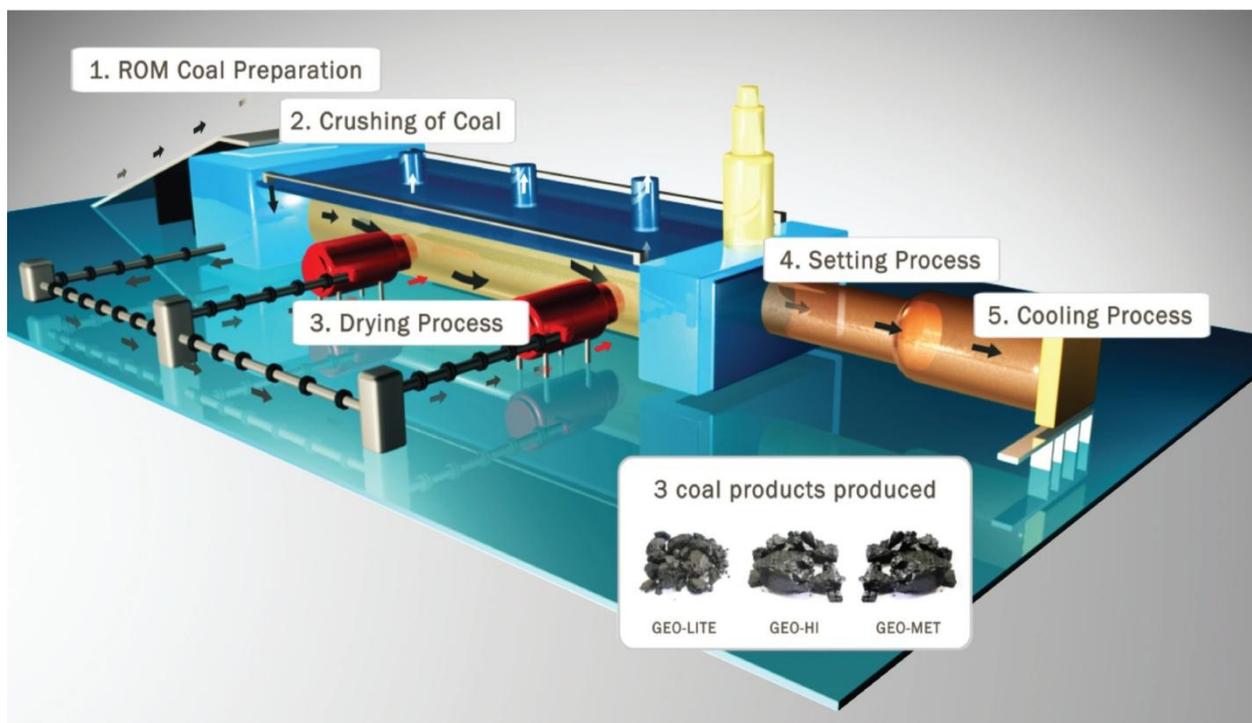


Рисунок 1.9 – Схема перерабатывающего предприятия по технологии GEO-COAL с возможностью получения 3-х видов топлива [42]

Как видно из схемы (рисунок 1.9), сначала уголь подается на дробилку и измельчается до фракции 5–50 мм. Далее уголь сушится и подается на термообработку, после чего охлаждается.

Принимая во внимание сравнительно низкие капитальные, эксплуатационные затраты, высокие тепловые характеристики получаемых видов топлив и широкий спектр перерабатываемого сырья эта технология переработки низкосортного органического сырья может получить широкое распространение в странах Азии.

Однако одной из отрицательных и очень существенных особенностей производимого карбонизата из молодых углей стоит отметить низкую структурную прочность продукта. Данная характеристика однозначно будет препятствовать широкому применению данной технологии.

1.4.6 Технология сушки и брикетирования угля без связующего ВСВ

В последние годы за рубежом активизировался интерес к технологии брикетирования бурых углей без использования связующих. Одним из примеров является технология Binderless Coal Briquetting (BCB), разработанная под эгидой австралийской компании White Energy. Брикет прессуется без связующего из высушенного до влажности 5–7% и нагретого примерно до 100–120°C угольного порошка. Получаемый продукт имеет сравнительно высокую теплоту сгорания (21,8–23,5 МДж/кг или 5200–5600 ккал/кг), хорошую влагостойкость и приемлемую для практики прочность. При этом по требованиям разработчиков технологии зольность исходного угля должна быть не более 12–15% [43,44].

Процесс переработки угля разделяется на 5 стадий [45–47]:

1. подготовка угля;
2. сушка угля;
3. осаждение частиц угля;
4. брикетирование;
5. охлаждение.

В 2007 году White Energy Company начала строительство первого промышленного предприятия на востоке Калимантана (Индонезия) мощностью 1 млн. тонн в год брикетированного бурого угля. Его запуск был запланирован на вторую половину 2008 года. Однако завод запустить не удалось даже после семи лет неудачных попыток. Всего на Калимантане планировалось построить 5 таких модулей.

На рисунке 1.10 представлена схема перерабатывающей линии.

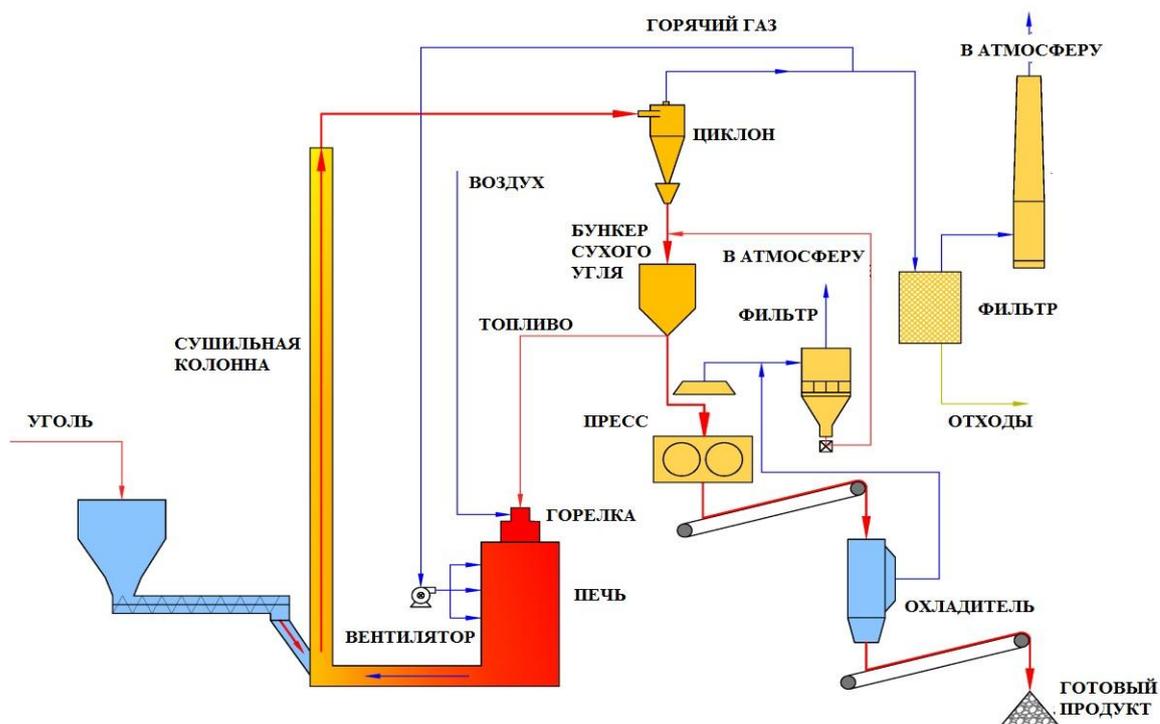


Рисунок 1.10 – Схема линии переработки низкосортного угольного сырья с получением брикетов без использования связующего вещества [45]

Главные причины неудачи заключаются как в самой технологии, так и в поставленной цели. Этот результат характерен и показателен для всех попыток производства брикетов из сушеного угля низкой степени метаморфизма.

Стоит отметить, что компанией СУЭК совместно с компанией ТЕРМОКОКС была выполнена НИОКР по возможности использования данной технологии для низкосортных углей Канско-Ачинского бассейна, в частности для угля марки 2Б Березовского месторождения.

В 2009 году сотрудники компании ТЕРМОКОКС в составе делегации посетили в Австралии стендовую установку Collie, и опытно-промышленную установку Cessnock. Наименее надежными, по мнению экспертов, являются элементы конструкции, связанные с сушкой пылевидного бурого угля в потоке горячего сушильного агента, а также последующие операции перемещения угольной пыли вплоть до валкового пресса. Нагретая до 100-120°C сухая пыль бурого угля при контакте с воздухом обладает исключительно высокой

взрывоопасностью. Однако самая главная проблема данной технологии заключается в качестве конечного продукта. Брикетты из сушеного бурого угля обладают высокой пирофорностью. Кроме того, при перегрузках таких брикеттов неизбежно образуется сухая, мелкодисперсная пыль, обладающая высокой взрывоопасностью. Эти специфические характеристики резко повышают требования к условиям перевозки, складирования и непосредственного использования брикеттов. Например, в этом случае категорически исключается морская перевозка. А для проектов в Индонезии это эквивалентно закрытию производства, поскольку с самого начала они были ориентированы на экспортную поставку продукции (внутреннее потребление, по сути, равно нулю).

1.5 Отечественные технологии полукоксования

И в СССР, и в современной России велись и ведутся разработки с целью вовлечения в топливно-энергетический баланс страны низкосортных углей [48–54]. На сегодняшний день известно множество вариантов перспективных технологий переработки молодых углей в высококалорийной топливо [15,16]. В продолжение данной главы представлен обзор отечественных технологий.

1.5.1 Технология Энергетического института (ЭНИИ)

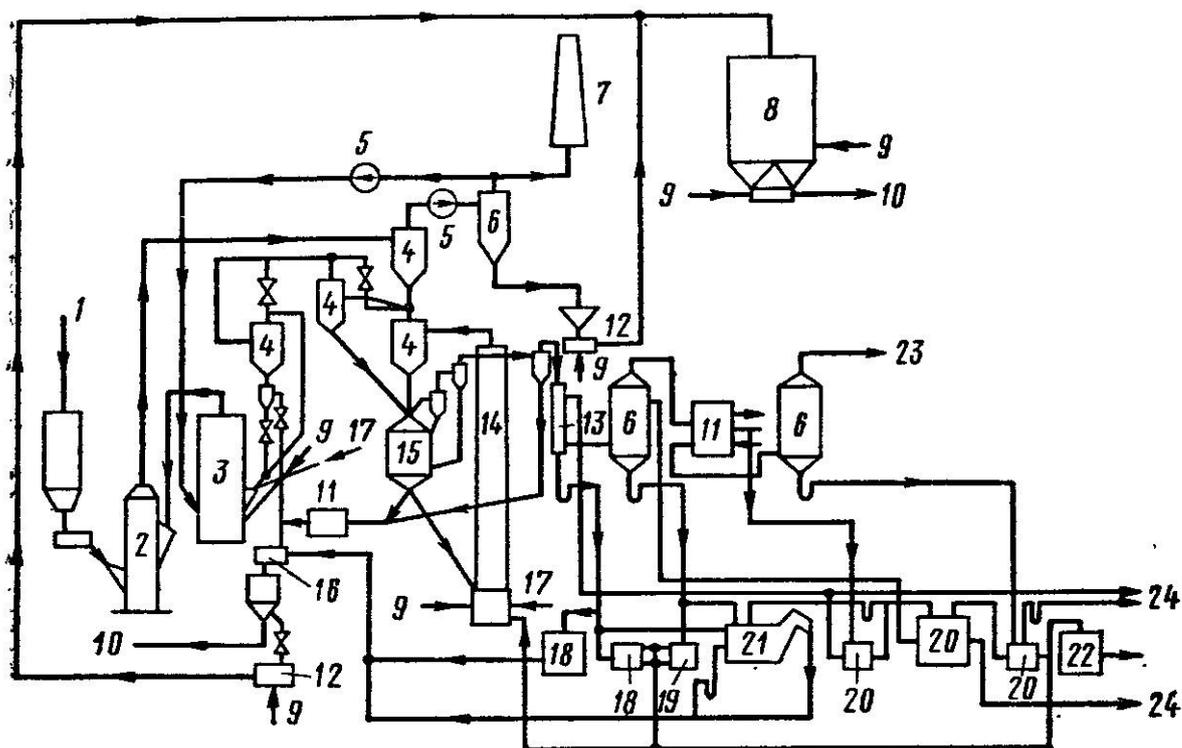
В 60-х годах в Красноярске на заводе «Сибэлектросталь» в опытно-промышленном масштабе был реализован способ полукоксования бурого угля Канско-Ачинского бассейна. Эта технология очень близка к технологии Lurgi-Ruhrgas по аппаратурному оформлению. В основу проекта легли исследования член-корреспондента АН СССР Чуханова З.Ф., выполненные в институте ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, г. Москва. Суть технологии состояла в следующем: бурый уголь нагревался газовым теплоносителем на первой стадии (этап сушки и бертинирования), а далее процесс полукоксования шел под

воздействием твердого теплоносителя. Причем твердый теплоноситель получали путем сжигания полукокса, выводимого из реактора. Далее парогазовая смесь проходила обеспыливание, конденсацию и направлялась на дальнейшее разделение продуктов. Данная технология позволяла получать мелкозернистый и пылевидный буроугольный полукоксы.

В результате выполненных работ на данной опытно-промышленной установке были исследованы режимы переработки пыли из Канско-Ачинских углей. В течение трех лет работы установки было произведено свыше 100 тысяч тонн буроугольного полукокса. Были проведены крупномасштабные испытания этого продукта при вдувании в горн доменной печи №1 Западно-Сибирского металлургического комбината с целью замены части доменного кокса. Также буроугольный продукт был протестирован в качестве компонента угольной шихты при получении специального кокса на Кузнецком металлургическом комбинате и Кемеровском коксохимическом заводе [12, 55].

В 1988 году на Красноярской ТЭЦ-2 была построена установка ЭТХ-175 производительностью 175 тонн бурого угля в час. К использованию этой установки перешли с ЭТХ-6, производительностью соответственно 6 тонн бурого угля в час. По мнению автора [56] именно такое резкое увеличение производительности установки привело к множеству неразрешимых проблем, связанных с её реализацией. Существует обоснованное мнение, что при проектировании установки для ТЭЦ-2 был нарушен классический масштабный коэффициент перехода от одного уровня производительности к другому [55]. Классический коэффициент составляет 1:10, однако установка была реализована с коэффициентом 1:30 [57].

Технологическая схема установки ЭТХ-175 представлена на рисунке 1.11.



1 — уголь; 2 — шахтная мельница; 3 — топка сушильного контура; 4 — циклоны; 5 — вентиляторы; 6 — электрофильтры; 7 — дымовая труба; 8 — емкости полукокса; 9 — воздух; 10 — полукокс; 11 — теплообменник; 12 — пневмонасосы; 13 — скруббер; 14 — технологическая топка; 15 — камера термического разложения; 16 — смеситель; 17 — мазут; 18, 19, 20 — емкости тяжелой, средней и легкой смолы; 21 — отстойник; 22 — сливная емкость; 23 — горячий газ; 24 — легкая смола и фенольная вода

Рисунок 1.11 — Технологическая схема установки ЭТХ-175 для переработки углей Канско-Ачинского бассейна [58]

Для ЭТХ-175, как и для предшествующей установки (ЭТХ-6), была присуща одна трудноразрешимая задача — очистка газов от смолы и пыли. Необходимо отметить также тот факт, что технология имела очень сложное оформление, в том числе из-за огромного количества питателей затворов для мелкозернистого материала.

Первоначально, целью технологии было производство бытового газа. Однако процесс внедрения затянулся, а после того, как природный газ стал широко и повсеместно применяться, интерес к данной технологии пропал. В связи с этим, авторы разработки начали тестировать применение полукокса и получение жидкого топлива. После многих лет пуско-наладочных работ установка так и не была доведена до рабочего состояния.

Необходимо ответить, что разработчики данной технологии внесли весомый вклад в исследование новых сфер применения буроугольного полукокса [59,60].

1.5.2 Полукоксование на цепных колосниковых решетках

В России разработка технологии полукоксования на колосниковой решетке выполнялась МХТИ им. Менделеева, а затем ВУХИНОм. За рубежом этот способ широко используется в Канаде, США, Германии, ЮАР, Индии [55].

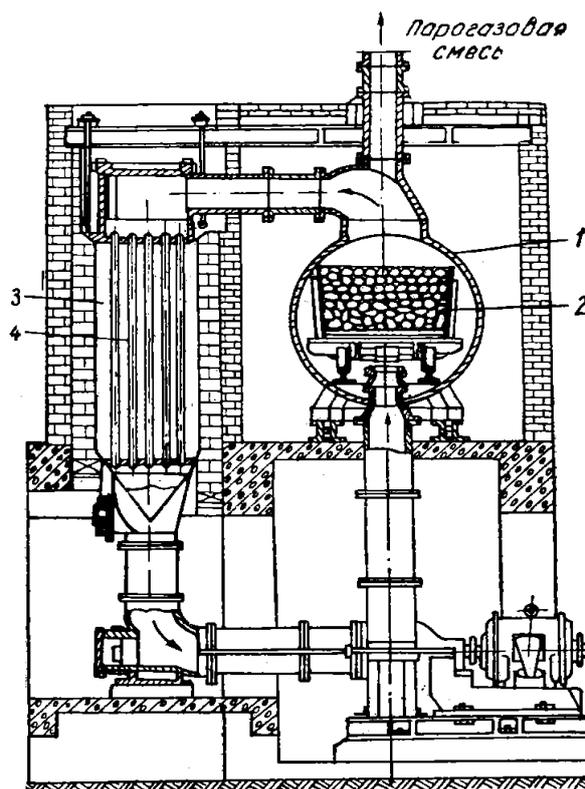
Пиролиз угля осуществляется в окислительном режиме за счет сгорания над слоем топлива выделяющихся летучих веществ. В связи с этим процесс получил название «автотермический» или «аутогенный». Возможность широкой настройки и регулировки параметров процесса позволяет производить различные виды кокса и полукокса. В данной технологии сырьем выступают угли марки Д класса крупности 25–80 мм. Использование бурых углей в качестве сырья для переработки представляется затруднительным в силу того, что в результате нагрева куски угля растрескиваются, и происходит вынос мелкой фракции с колосниковой решетки. Основным недостатком данной технологии является низкое качество получаемой продукции ввиду неравномерности обработки сырья по площади решетки.

В 2003 году в Казахстане была построена опытно-промышленная установка для получения углеродистых материалов для недоменных потребителей из углей марки Д Шубаркольского разреза [61]. Однако, по имеющимся данным, в ходе её эксплуатации так и не удалось добиться однородного по объему и качественного полукокса.

В России в промышленном масштабе эта технология не применяется. Исключение составляют малотоннажные производства полукоксов из углей марок Д и СС на котельных Кузбасса и Алтайского края [61].

1.5.3 Полукоксование в туннельных печах

Туннельная печь представляет собой теплоизолированный обжигательный канал прямой, кольцевой или П-образной формы со стабильными тепловыми зонами [62]. Туннельные печи применяются при полукоксовании углей и сланцев. На рисунке 1.12 представлена туннельная печь для коксования сланцев.



1 – туннель; 2 – вагонетка; 3 – обогревательный канал; 4 – калорифер

Рисунок 1.12 – Поперечный разрез печи для полукоксования [63]

Движение перерабатываемого сырья в печи осуществляется за счет вагонеток, которые перемещаются в теле печи с помощью специальных толкателей. В качестве теплоносителя в камере полукоксования используется парогазовые продукты полукоксования. В результате многократной рециркуляции (до 12 раз) происходит пиролиз паров смолы. При этом из сырья выделяются дополнительные парогазовые продукты, избыток которых отводится в отделение охлаждения и конденсации.

Недостатками данной технологии считается громоздкость печей, а также низкое качество продукции из-за неравномерности термообработки угля по объему вагонетки. Информация об использовании этой технологии в настоящее время отсутствует.

1.5.4 Получение кусковых углеродистых восстановителей в печах вертикального типа

В Московском горном институте проводились исследования по получению углеродистых восстановителей из кусковых бурых углей марки 2Б. Авторами был предложен двухстадийный процесс термообработки угля без доступа воздуха с низкой скоростью нагрева:

- первая стадия – сушка со скоростью нагрева 1-2 град/мин, обеспечивающая равномерное медленное удаление влаги;
- вторая стадия – нагрев до 850°C со скоростью 2–3 град/мин, обеспечивающий постепенное удаление летучих веществ.

Авторами было установлено, что в результате длительного процесса пиролиза с низкой скоростью нагрева молекулы бурого угля перестраиваются наиболее рационально, образуя прочный кусковой материал – буроугольный кокс [64].

Опытно-промышленные испытания были проведены в вертикальной прокалочной печи с электрообогревом. В результате термообработки кускового бурого угля Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна в вертикальной прокалочной печи, обеспечивающей низкую скорость подъема температуры, получен углеродистый материал (буроугольный кокс) по гранулометрическому составу и прочности пригодный для использования в электротермии и при выплавке фосфора.

Суммарный выход фракции 6–25 мм составил свыше 56%, а класса 3–25, который может использоваться как углеродистый восстановитель в процессах

выплавки фосфора – 89%. Структурная прочность буроугольного кокса составила сравнительно высокое значение – 70%.

Проведенные авторами исследования показали возможность получения из кусковых бурых углей Березовского месторождения углеродистых восстановителей требуемого качества, а также возможность применения для этой цели вертикальных прокалочных печей. Однако предложенное авторами решение об использовании вертикальных печей с внешним или внутренним обогревом обладает всеми преимуществами и недостатками данных аппаратов, а именно: низкая скорость и равномерность обработки сырья (при варианте печи с внешним обогревом), сложность конструкции печи и т.п.

1.6 Технологии серии ТЕРМОКОКС

Концепция, объединяющая процессы серии ТЕРМОКОКС-КС и ТЕРМОКОКС-С, является на сегодняшний день одной из самых перспективных в плане переработки бурых углей в буроугольный полукокс. Суть концепции состоит в разделении углей с высоким выходом летучих веществ на два продукта – газовое топливо и коксовый остаток (полукокс). В зависимости от выбора процесса для переработки угля и рабочих параметров основным продуктом термообработки угольного сырья может являться полукокс или горючий газ [65–73].

На рисунке 1.13 представлена принципиальная схема энерготехнологической концепции ТЕРМОКОКС.



Рисунок 1.13 – Принципиальная схема энерготехнологической концепции ТЕРМОКОКС [5]

Как видно из рисунка 1.13 для реализации возможностей данной концепции необходимо лишь угольное сырье и окислитель, в данном случае воздух.

Ниже рассмотрены более подробно процессы составляющие концепцию ТЕРМОКОКС: ТЕРМОКОКС-КС и ТЕРМОКОКС-С.

1.6.1. Технология частичной газификации угля в кипящем слое (ТЕРМОКОКС-КС)

В данном процессе происходит частичная газификация угля с применением технологии кипящего слоя. Продуктами переработки угля являются полукокс и тепловая энергия. На рисунке 1.14 приведена принципиальная схема процесса ТЕРМОКОКС-КС [74,75].

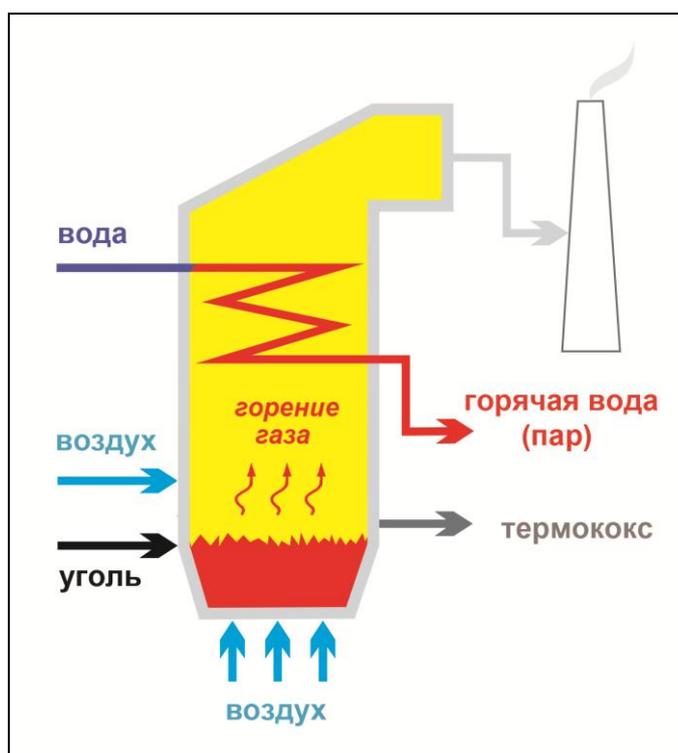


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема процесса карбонизации угля в псевдоожиженном слое ТЕРМОКОКС-КС [5]

В режиме карбонизации уголь перерабатывается в газовое топливо и высокорреакционный коксовый остаток. Газовое топливо и небольшое количество пылевого уноса из кипящего слоя дожигаются в надслоевом пространстве топочного объёма за счёт вторичного дутья [76].

Данный технологический процесс обладает несомненными преимуществами, качественно выделяющими его как в линейке процессов серии ТЕРМОКОКС, так и среди других процессов – это высокая производительность и экологичность. 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 формования в брикеты.

1.6.2 Технология частичной газификации угля в слоевых аппаратах (ТЕРМОКОКС-С)

В 1996 году в г.Красноярске был сдан в эксплуатацию завод ЗАО «Сорбентуголь» (Завод был спроектирован и построен под руководством д.т.н. С.Р. Исламова. В 2000 г. был продан и переименован в ЗАО «Карбоника-Ф»). На данном перерабатывающем предприятии мощностью 33 тысячи тонн угля в год производится 10 тысяч тонн буроугольного полукокса в год. В качестве сырья используется местный уголь Канско-Ачинского бассейна. Из 1 тонны бурого угля (отсева класса 0–25 мм после сортировки угля) с теплотой сгорания 15,9 МДж/кг (3800 ккал/кг) производится 0,3 тонны полукокса с теплотой сгорания 27,2 МДж/кг (6500 ккал/кг) и 1700 м³ горючего газа с теплотой сгорания 3,6–3,77 МДж/м³ (850-900 ккал/м³). По энергетическому балансу 56% теплоты сгорания исходного угля содержится в полукоксе и 40% – в горючем газе. Теплопотери составляют ~ 4% [55]. На рисунке 1.15 приведена принципиальная схема производства полукокса и попутного газа на заводе Карбоника-Ф, а на рисунке 1.16. фотография цеха сорбентов.

Буроугольный полукокс, получаемый на предприятии Карбоника-Ф, в качестве активированного угля марки АБГ поставляется предприятиям энергетики и металлургии, а также востребован в коммунально-бытовом хозяйстве в системах очистки воды.

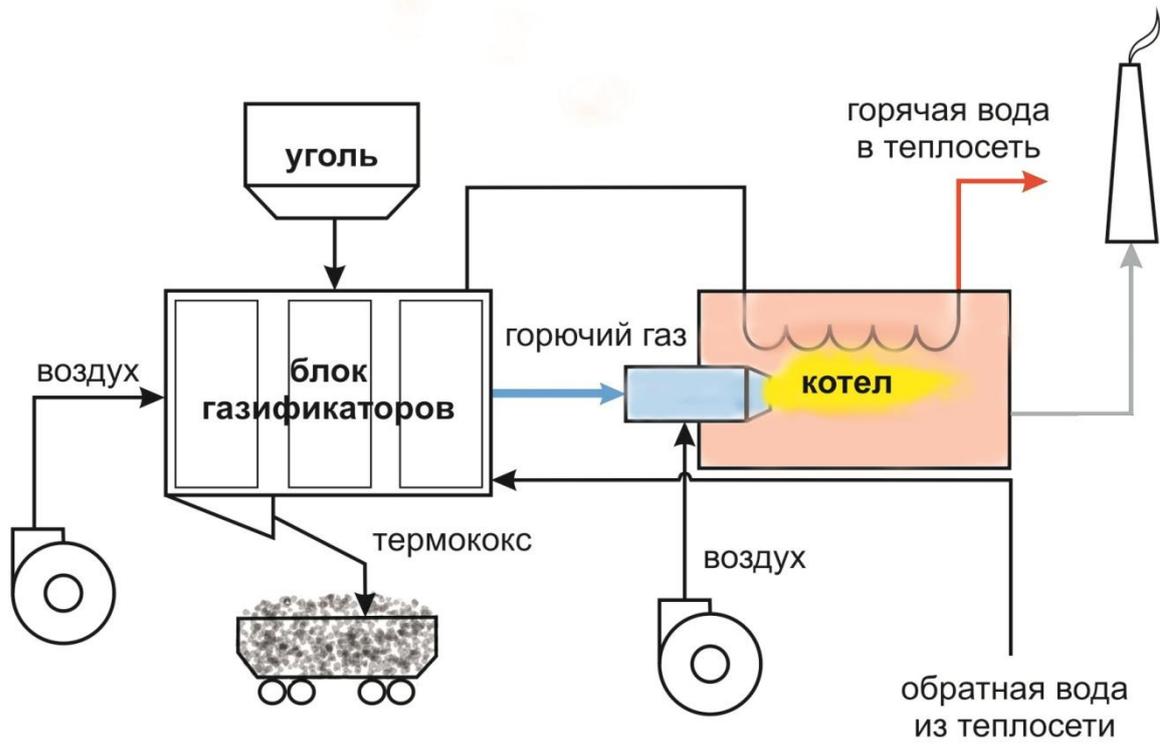


Рисунок 1.15 – Принципиальная схема производства полукокса и горючего газа [77]



Рисунок 1.16 – Фотография цеха сорбентов завода Карбоника-Ф

Область применения активированного угля АБГ постоянно расширяется. В том числе благодаря относительно низкой цене продукта, которая складывается за счет низкой цены на угольное сырье и низкой стоимости процесса карбонизации. Цены на аналогичное топливо по стране намного выше.

В основе перерабатывающего предприятия Карбоника-Ф лежит молодая, но очень перспективная технология переработки угольного сырья в слоевых газификаторах с обращенным дутьем «ТЕРМОКОКС-С»[78–80].

Основными преимуществами данной технологии являются:

1. Простота аппаратного оформления процесса. В аппарат подается только воздух.

2. Экологическая безопасность производства. В результате технологической переработки угля не образуется вредных выбросов. Необходимо отметить, что завод Карбоника-Ф находится практически в центре города и абсолютно не влияет на экологическую обстановку.

3. В отличие от всех существующих технологий в данной – нет сброса газообразного теплоносителя в атмосферу и поэтому не требуется сооружение дополнительных систем газоочистки и каталитического дожигания оксида углерода.

На рисунке 1.17 представлена для сравнения фотография труб двух предприятий.



Рисунок 1.17 – Фотография трубы работающего завода Карбоника-Ф (справа) и котельной работающей на угле (справа)

ТЕРМОКОКС-С

По существу процесс ТЕРМОКОКС-С – слоевая газификация с обращенным воздушным дутьем. Технология радикально отличается от классических процессов пиролиза и коксования тем, что при переработке угля не образуются побочные продукты в виде конденсированных вредных веществ (смолы, фусы, фенольные воды и т.п.) [81–83]. Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 1.18.



Рисунок 1.18 – Принципиальная схема процесса ТЕРМОКОКС-С [5]

Также как и в предыдущем процессе в результате переработки угля получается два полезных продукта: полукокс и горючий газ. В качестве аппаратного оформления процесса применяется слоевой газификатор. Однако направление дутья изменено по сравнению с классическим вариантом использования. Здесь дутье подается навстречу волне физико-химических превращений и тем самым производимый генераторный газ не содержит продуктов термического разложения угля: сажи, смолистых веществ, канцерогенов, фенолов и других токсичных веществ. Данный газ может быть применен в качестве источника тепловой или электрической энергии. Содержание твёрдых примесей, оксидов серы и азота в дымовых газах ниже, чем при сжигании эквивалентного по теплосодержанию количества угля [84–86].

По сравнению с классической 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 [87, 88].

Возможен вариант работы установки в режиме газогенерации или же в режиме полукоксования. Однако стоит отметить, что в обоих случаях мы будем получать как генераторный газ, так и полукокк, но в различных количествах.

Данная технология частичной газификации угля по процессу ТЕРМОКОКС-С отлично подходит для получения карбонизата и попутного генераторного газа из углей низкой степени метаморфизма. Эту технологию можно назвать безотходной, поскольку единственным выбросом в атмосферу являются продукты сгорания генераторного газа. Также огромным преимуществом является низкий уровень как капитальных, так и операционных затрат. Слоевой аппарат прост и удобен в обслуживании и эксплуатации.

Использование данного процесса слоевой карбонизации угля, несомненно, оправдано для варианта получения полукокса класса орех. Однако при использовании менее метаморфизированного бурого угля, по сравнению с длиннопламенным углем, в процессе его переработки происходит термодробление исходной фракции до размера коксовой мелочи. Данная проблема решается введением стадии брикетирования в производственный процесс.

1.7 Теоретическая база исследований в области карбонизации угля

В настоящей диссертации значительное внимание уделяется рассмотрению работ по исследованию физико-химических и механических свойств кокса и полукокса в области низких и средних температур.

Исследователи используют различные подходы к изучению влияния определенного набора параметров на процесс карбонизации угля, а соответственно и на свойства получаемого продукта. Однако в целом к факторам, влияющим на термическую деструкцию угля, относятся температура, давление, продолжительность нагревания и термическая устойчивость исходных и промежуточных соединений.

Хорошо известно, что при хранении добытого кускового бурого угля по мере удаления из него влаги он растрескивается и часто распадается на мелкие образования. Так, например, при хранении угля Березовского месторождения Красноярского края в лабораторных условиях за 5 дней удаляется 13% влаги, в результате чего в кусках угля образуется сеть трещин.

При исследовании образования каменноугольного кокса экспериментаторами установлены факторы, определяющие его гранулометрический состав, найдены уравнения для определения допустимой скорости нагрева угля для получения его определенного гранулометрического состава [89]. Те же факторы имеют значение при оценке процесса растрескивания кусковых бурых углей, который обусловлен усадочными напряжениями, возникающими вследствие градиента скорости усадки при усыхании или карбонизации материала. Этот градиент, в свою очередь, зависит (для одного и того же материала) от скорости сушки или карбонизации [90].

Широкое исследование по этой теме было проведено Грязновым Н.С. [13]. В его работе «Пиролиз углей в процессе коксования» уделяется большое внимание исследованию влияния скорости нагрева, а также различных температурных уровней на свойства конечного продукта. Как отмечает автор [13], пиролиз (карбонизация) как процесс превращения органических соединений под действием высокой температуры характеризуется протеканием первичных реакций деструкции и вторичных взаимодействия и уплотнения остаточных фрагментов исходных молекул [13, 91]. Применяя термин «пиролиз» к термическому преобразованию органического материала, подразумевают не только его распад, но и синтез новых продуктов. Эти стадии процесса взаимно связаны и протекают одновременно с тем лишь различием, что каждая из них преобладает в определенном интервале температуры и времени [13, 91].

Известно, что огромное влияние на протекания процесса пиролиза оказывает скорость нагрева куска угля. Как отмечает автор [13] при быстром нагреве избирательность и последовательность деструкции нарушается, разрыв связей протекает случайно, так как вследствие перегрева материала одновременно

происходит разрыв как слабых, так и более прочных связей, тем более что энергетические характеристики химических связей в большинстве случаев различаются незначительно. При медленном нагревании ($0,05^{\circ}\text{C}/\text{с}$, или $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) в зерне диаметром 3 мм перепад температуры по радиусу составляет $0,1\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает относительно равномерный прогрев массы угольного зерна. С увеличением скорости нагрева изменяется состав образующихся продуктов: количество тяжелых фракций, выделяемых в жидкую и парогазовую фазы. При нагреве со скоростью $1,66^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ($100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) градиент температуры по радиусу зерна составляет $5\text{--}10^{\circ}$, а при скорости $100^{\circ}\text{C}/\text{с}$ – свыше 150° . В этих условиях процесс коксования может идти только послойно. Поэтому при существенном изменении скорости нагрева наблюдаются различные результаты [10, 13]. Зная, что в рамках диссертационной работы в экспериментах с углем будет использоваться класс ≥ 15 мм и, основываясь на этих результатах, следует, что для создания условий протекания процесса пиролиза в объеме, а не послойно, исследования необходимо проводить при низких скоростях нагрева.

При термическом разложении бурого угля, опираясь на заключение автора [10], выделены четыре температурные зоны:

1. Зона подогрева и подсушки $100\text{--}140^{\circ}\text{C}$, наряду с этим может происходить распад неустойчивых углекислородных комплексов – пероксидов [92] и выделение окклюдированных газов, как CO_2 .

2. Зона начала теплового распада угля – $140\text{--}180^{\circ}\text{C}$.

3. Зона образования испарений и возгонки смолы с образованием газа и полукокса – $180\text{--}550^{\circ}\text{C}$.

4. Зона удаления из полукокса остатка летучих с образованием преимущественно газа – $500\text{--}550^{\circ}\text{C}$ и выше. По мере повышения температуры образуется все большее и большее количество газообразных веществ, быстро удаляемых из нагревательного пространства.

Что касается растрескивания угольных зерен, то в одной из статей автора [93] было изучено поведение витринитов бурого угля Ирша-Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Автором показано, что при нагреве

со скоростью $0,05^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ($3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) до $60\text{--}70^{\circ}\text{C}$ на поверхности частиц угля начинают появляться первые трещинки. Их количество увеличивается в процессе дальнейшего нагрева, также увеличиваются в объемах уже существующие трещины, происходит скалывание углов и выступов. Автор связывает образование трещин с возникновением градиента усадки вследствие высыхания при низких температурах, а при более высоких температурах (до 700°C) — вследствие пиролиза. Исходя из данных Бочкарева К.И. [94] следует, что при карбонизации данного угля основное развитие пористости происходит в интервале $350\text{--}450^{\circ}\text{C}$ и достигает 28%. Помимо образования трещин в процессе выхода влаги растрескивание также происходит вследствие термического расширения частиц угля. Другими авторами также отмечается [95, 96], что с увеличением степени метаморфизма угля средний коэффициент расширения снижается и может достигать значений примерно в 3-4 раза меньших, чем для более молодых углей. Соответственно и прочность марок углей высшей степени метаморфизма значительно выше, чем у бурых углей [13].

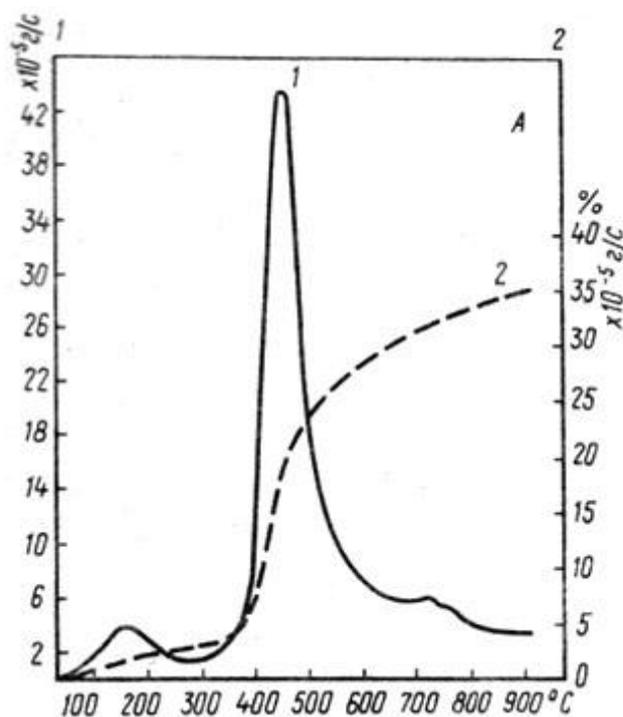
Следует отметить, что вся влага ископаемого угля различается на два вида: внутреннюю и внешнюю. Внешняя влага испаряется при нахождении угля на воздухе, однако внутренняя влага на воздухе не испаряется, это обуславливается гигроскопичностью вещества угля, а именно тем, что влага заперта в порах [13].

После высушивания при 105°C до постоянной массы угли удерживают ещё некоторое количество влаги, причём тем большее, чем ниже степень метаморфизма угля. При дальнейшем нагреве угля до начала его термической деструкции ($> 200^{\circ}\text{C}$) химически связанная (или внутренняя) влага составляет $\sim 30\%$ от её количества, выделяющегося при сушке в стандартных условиях [13].

Десорбция газов, адсорбированных углями в естественных условиях, происходит до начала термической деструкции, а также параллельно испаряется влага.

С повышением температуры и, соответственно, энтальпии системы происходит разрыв водородных и наименее прочных ковалентных связей с потерей массы при температурах ниже 300°C (в зависимости от термостойкости).

Образование полукокса следует за максимальной скоростью выделения летучих веществ, главным образом смолы и газообразных углеводородов, при температуре выше 450°C [13]. Опираясь на экспериментальные данные, полученные на угле марки Г, на рисунке 1.19 автором показано, что максимальная скорость выделения летучих веществ, представлена пиком на дифференциальной термографической кривой в области температур $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$.



1 – дифференциальная термографическая кривая (ДТТ); 2 – интегральная термографическая кривая (ТГ) [13]

Рисунок 1.19 – Убыль массы при постоянной скорости нагрева $0,17^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ($10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$). Уголь кузнецкий марки Г

Автор [13] также отмечает, что при малой скорости нагрева термическая деструкция углей имеет избирательный характер, так как расщепление атомных группировок протекает последовательно в зависимости от их термостойкости, начиная с разрушения наиболее слабых химических связей. При этом остаточная масса угля становится более термостойкой и вновь подвергается деструкции лишь при высокой температуре. Однако с увеличением скорости нагрева существенно

изменяется и механизм деструкции, что в свою очередь приводит к образованию продуктов деструкции иного качества [13].

При коксовании в промышленных печах экстремальность процесса выделения летучих веществ объясняется тем, что их выделение протекает одновременно из различных зон коксуемой загрузки, находящихся в различных температурных условиях. Проявляются также вторичные реакции: пиролиз паров смолы и компонентов газа на слое кокса, оказывающего каталитическое влияние на их пиролиз, а также во внутренних слоях угольной загрузки. Это обеспечивает в течение всего периода коксования сравнительно равномерный выход летучих веществ, замедляющийся лишь в конце процесса [13].

Изложенное выше подчёркивает, что уголь является сложной системой соединений переменного состава. Процесс пиролиза представляет собой совокупность множества параллельных и последовательных необратимых реакций, усложненных пространственными затруднениями: теплопередачей, диффузией парогазовых веществ, массопереносом при формировании надмолекулярных образований и твердой фазы и др. Именно поэтому формализованные кинетические исследования пиролиза углей оказываются малоэффективными и даже почти бесполезными, если их проводят в отрыве от всестороннего экспериментального изучения процесса. Применительно к пиролизу углей установление значений кинетических параметров имеет вспомогательное значение. Основу кинетических исследований с целью выяснения механизма пиролиза углей составляет совокупность физических, химических и физико-химических экспериментов, выявляющих количественное и качественное изменение промежуточных и конечных продуктов, их свойства и взаимодействие в ходе процесса, в особенности при изменении его условий [13].

1.8 Основные выводы и постановка задач исследования

По результатам обзора были выделены следующие технологии: Geo-Coal, LiMax, печи SJ, ТЕРМОКОКС-С. Однако, не смотря на свою перспективность, данные технологии обладают как рядом преимуществ, так и рядом недостатков, препятствующих их широкому применению в сфера переработки углей с высоким содержанием летучих веществ.

На основе выполненного аналитического обзора зарубежных и отечественных разработок в сфере термической переработки низкосортных углей в высококалорийное твердое топливо сформулированы следующие выводы.

1. Современные технологии термической переработки углей низкой стадии метаморфизма ориентированы преимущественно на производства кускового продукта (без затрат на стадию брикетирования) из молодых низкосортных углей.

2. В связи с обостряющейся проблемой техногенного загрязнения одной из наиболее актуальных задач становится минимизация воздействия на окружающую среду в процессе переработки углей.

3. Преимущество имеют технологии, позволяющие регулировать в необходимых пределах физико-химические характеристики получаемого обогащенного топлива.

Таким образом, в настоящее время востребованным направлением прикладных исследований является разработка технологии по производству высококалорийного твердого топлива из углей низкой степени метаморфизма без применения стадии брикетирования. Основными критериями эффективности данного производства являются: низкие удельные капитальные затраты, простота обслуживания, низкие операционные затраты и минимальное воздействие на окружающую среду. Всеми перечисленными критериями обладает технологический процесс ТЕРМОКОКС-С. Однако при карбонизации молодых углей по этой технологии производится мелкозернистый продукт, требующий последующего брикетирования.

Исходя из вышеизложенного и поставленной цели исследования, были сформулированы следующие задачи.

1. Выполнить экспериментальное исследование процесса термообработки одиночных частиц угля для определения основных управляющих параметров, изучить влияние этих параметров на теплотехнические и прочностные характеристики получаемого полукокса.

2. Опираясь на результаты исследований, полученных на одиночных частицах угля, обосновать выбор конструкции установки для нового процесса производства полукокса. На данной установке выполнить экспериментальные исследования по переработке углей.

3. Разработать технологический процесс термической переработки углей низкой степени метаморфизма и оценить эффективность его применения в промышленном масштабе.

Глава 2. Экспериментальное исследование взаимосвязи тепловых параметров процесса карбонизации с прочностными характеристиками полукокса

2.1 Постановка задач экспериментального исследования

Данная глава посвящена решению задачи 1, сформулированной в разделе 1.8: выполнению экспериментального исследования процесса нагрева одиночных частиц угля и определению основных управляющих параметров, а также изучению их влияния на теплотехнические и прочностные характеристики получаемого полукокса.

Исходя из этого был сформирован список задач, которые необходимо решить в рамках данного раздела:

1. Найти температуру греющей среды для отвода влаги из куска угля и при этом сохранения прочности на удовлетворительном уровне.
2. Определить основные управляющие параметры процесса карбонизации угля.
3. Определить температурный диапазон и максимальную скорость нагрева для получения образцов удовлетворительной прочности с целевым выходом летучих веществ соответствующих требованиям к бездымному топливу (~15%).
4. Определить динамику изменения прочности образцов угля в границах температурного диапазона.

В качестве сырья в экспериментах в работе были использованы:

Бурые угли Канско-Ачинского бассейна (Красноярский край):

- 2Б, АО «Разрез Березовский» (АО «СУЭК»);
- 3Б, разрез Большесырский, ООО «Сибуголь».

Длиннопламенные угли Кузнецкого бассейна (Кемеровская область):

- Д, разрез Моховский, ОАО «Угольная компания Кузбассразрезуголь»;
- Д, разрез Караканский, ООО «Каракан-Инвест».

В таблице 2.1 приведены технологические характеристики данных углей.

Таблица 2.1 – Технологические характеристики углей

Угли	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	Прочность на раздавливание, МПа	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
2Б (березовский)	30,4	4,9	48,5	14,8	15,7
3Б (большесырский)	20,1	4,5	45,9	16,6	21,1
Д (моховский)	17,9	6,6	42,3	29,8	21,8
Д (караканский)	15,1	9,0	42,5	28,3	23,0

2.2 Методика проведения экспериментов и описание экспериментальной установки

Для исследования процесса термообработки одиночных частиц угля использовалась лабораторная садочная электропечь шахтного типа СНОЛ 10/10. Технические характеристики печи приведены в приложении А.

Из стальных уголков был изготовлен стенд для установки печи с целью обеспечения загрузки и выгрузки проб сверху. Над шахтой печи размещалось крепление для лабораторных весов. Печь укомплектована измерителем-регулятором температуры ПТ200 с индикаторным табло, расположенным на лицевой стороне печи. Данный термоконтроллер позволял программировать скорость нагрева печи. Для этого задавались конечная температура и время нагрева. Также прибор позволял отслеживать в режиме реального времени расхождения между расчетной и реальной температурой в печи. На рисунке 2.1 представлена схема лабораторной установки, на которой проводились исследования.

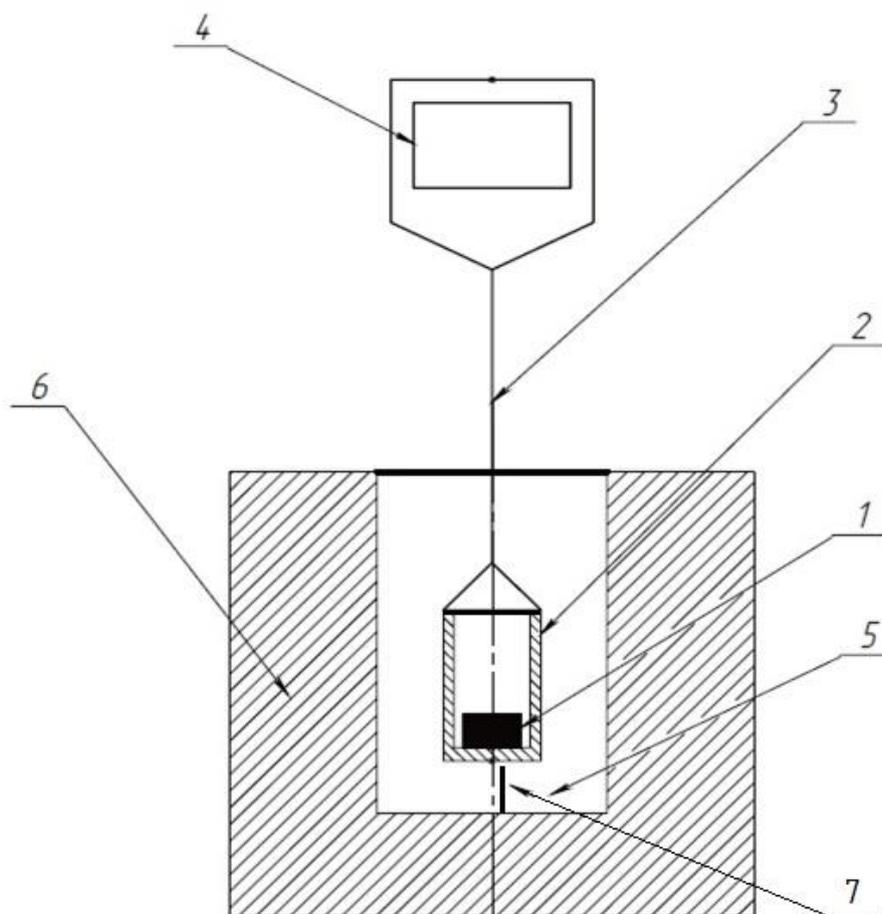


Рисунок 2.1 – Схема лабораторной установки для исследования процесса термической обработки одиночных частиц угля

Образцы угля *1* помещались в закрытый металлический контейнер с отверстием в верхней части *2* (для отвода продуктов пиролиза), закрепленный на подвесе *3* электронных весов *4*. На время эксперимента контейнер вводился в камеру нагрева *5* электрической печи *6*. Под контейнером с исследуемой пробой угля размещался чувствительный элемент термопары *7*. Контроль динамики потери массы образцов осуществлялось в ходе эксперимента с помощью подвесной системы, закрепленной на лабораторных весах и погруженной в печь. Печь, в свою очередь, была максимально герметизирована во избежание теплопотерь.

Для выполнения экспериментальных исследований была разработана следующая последовательность действий.

Подготовка сырья

Для унификации условий нагрева и более корректного измерения прочности использовались изготовленные из исходного угля образцы кубической формы со стороной 20 мм. Кубическая форма предавалась образцу с помощью напильника из более крупных кусков угля. Данная форма была выбрана не случайно, а для более точного определения прочности образцов и для сохранения однородности испытываемых образцов [4].

Испытания в электропечи

Эксперименты выполнялись при разных начальных температурах печи. В связи с этим, перед загрузкой образцов печь нагревалась до необходимой температуры. После чего образцы, заранее помещенные в металлический контейнер, погружались в печь.

Исследования процесса сушки угля проводились при постоянной температуре греющей среды, но на разных температурных уровнях и при различной длительности выдержки. Эксперименты по карбонизации включали в себя стадию сушки и стадию нагрева с определенной скоростью до конечной температуры.

Образующаяся в процессе эксперимента парогазовая смесь выводилась в систему аспирации.

После окончания эксперимента контейнер извлекался из печи и в герметичном состоянии, во избежание воспламенения образцов, охлаждался до комнатной температуры. После охлаждения металлического контейнера образцы вынимались и испытывались на прочность.

Проведение испытаний на прочность

Определение механической прочности образцов исходного угля и полукокса производилось методом раздавливания по ГОСТ 21289-75 [97]. Для испытаний использовался лабораторный пресс ИП-100.

Определение теплотехнических характеристик образцов

После определения прочности на лабораторном прессе определялись теплотехнические характеристики раздробленных частиц. Технический анализ проб выполнялся в лаборатории ООО «ЭТК ТЕРМОКОКС». Влажность образцов определялась на аналитическом приборе A&N MX-50. Это современный прибор для определения влажности образцов с точностью до 0,01%. Все анализы выполнены строго по ГОСТ Р 52917-2008 [98].

Определение остаточного выхода летучих веществ и зольности проводилось согласно ГОСТ Р 55660-2013 и ГОСТ Р 55661-2013 [99, 100]. Все пробы готовились в соответствии с ГОСТ 10742-71 [101]. Прокалка проб проводилась в садочной электропечи шахтного типа СНОЛ, а взвешивание на лабораторных весах A&D GR-120. Технические характеристики приборов представлены в приложении А.

Необходимо отметить, что в ключевых экспериментах выполнялись анализы в аккредитованной испытательной лаборатории АО «Сибирский ЭНТЦ». Для получения более полной информации об исследуемых образцах проводился элементный и технический анализ проб. Протоколы испытаний представлены в приложении Б.

2.3 Исследование процесса сушки одиночных образцов угля

В качестве исходного сырья использовался бурый уголь марки ЗБ разреза Большесырский (Красноярский край, ООО «Сибуголь»), который является характерным представителем углей низкой степени метаморфизма. С одной стороны, этот уголь имеет максимальную степень углефикации в классе бурых углей, с другой стороны, он является переходным углем, приближающимся по свойствам к самым молодым каменным углям марки Д.

С целью приведения исследуемых частиц угля к единообразной форме в качестве одиночных образцов использовались образцы кубической формы со стороной 20 мм, которые вырезались из монолитных кусков угля.

До начала экспериментов по термообработке была определена прочность исходного угля на раздавливание. На основании данных по раздавливанию 10-ти образцов средняя прочность составила 16,7 МПа.

Аккредитованной испытательной лабораторией АО «Сибирский ЭНТЦ» был проведен технический анализ исходного угля. Эти данные представлены в разделе 2.1.

При механической обработке кусков угля с целью получения формы кубика они незначительно нагревались, что приводило к снижению влаги. Поэтому была также определена средняя влажность готовых образцов (кубиков), которая составила 16%. Заблаговременно подготовленные для экспериментов образцы герметично упаковывались во избежание дальнейшей потери (или набора) влаги.

Исследование процесса сушки

Первым этапом поисковых экспериментов было определение температуры греющей среды, при которой влага (а также незначительная часть летучих веществ) выходит из угля с сохранением наибольшей прочности образцов после термообработки. Было принято решение вести поисковые эксперименты в области температур 250–400°C с шагом 50°C. Данный температурный интервал был выбран не случайно, поскольку отвод влаги при высоких температурах (чем выше начальная температура, тем выше скорость нагрева) критически сказывается на прочности угля – вода превращается в пар по мере повышения её давления в порах и куски угля разрушаются. Этот эффект известен под название «термодробление бурых углей». Параллельно с выходом из угля пара при высоких температурах начинается процесс выхода летучих веществ, который усиливает эффект. Использование низких температур для сушки угля не представляет практического интереса, поскольку в этом случае процесс имеет очень большую длительность.

Для исследования процесса сушки угля были выбраны четыре температурных уровня: 250°C, 300°C, 350°C, 400°C. Продолжительность выдержки при постоянной температуре составляла 60 минут. При этом каждые 10

минут посредством весов с подвесной системой фиксировалась масса образцов. После термообработки контейнер с образцами вынимался из печи и погружался в воду до полного остывания.

На каждом температурном уровне производилась термообработка семи образцов для последующего усреднения измеряемых показателей. У всех термообработанных образцов после охлаждения измерялась прочность на раздавливание.

Поскольку масса у исходных образцов различалась, экспериментальные результаты были приведены к безразмерной относительной массе.

На рисунке 2.2 представлены зависимости потери относительной массы от времени выдержки для четырех температурных уровней.

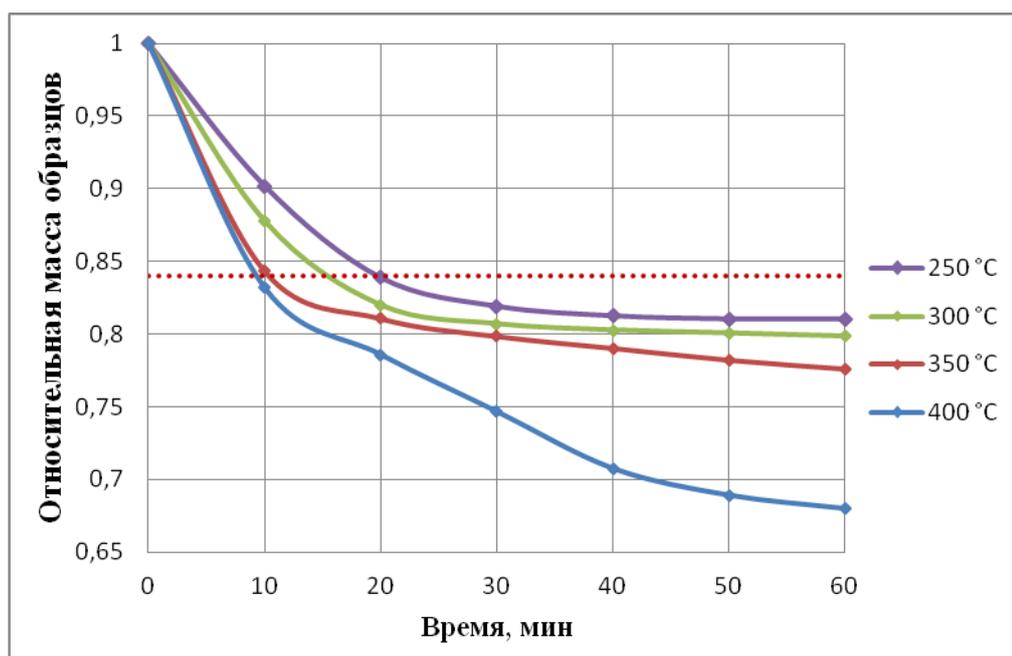


Рисунок 2.2 – Зависимость изменения относительной массы образцов от времени термообработки при различных температурах греющей среды

Согласно представленным результатам основная потеря массы происходит в течение первых 20 минут нагрева образца. При этом необходимо отметить, что более 50% теряемой массы удаляется в течение первых 10-ти минут термообработки и это применительно ко всем температурным режимам.

Поскольку влага выходит в первую очередь, располагая данными по исходной влажности образцов (16%), можно оценить, когда заканчивается выход влаги и начинается выход летучих веществ. На рисунке 2.2 этот пограничный уровень относительной массы отображен пунктирной линией. Считаем, что выше этого уровня из образцов удаляется влага, а ниже – летучие вещества. Однако необходимо отметить, что это – оценочная расчетная характеристика, а не аналитический результат.

В процессе термообработки при температурах греющей среды 250°C, 300°C выход влаги происходит в течение 15–20 минут после начала термообработки. На графиках для режимов с температурами 350°C и 400°C наблюдается продолжение тренда на снижение массы испытываемых образцов. Особенно хорошо это заметно на графике для температуры 400°C. Здесь интересно отметить, что после определенного замедления процесса потери массы в интервале 10–20 минут, далее начинается ускоренное выделение летучих веществ. Этот эффект можно объяснить следующим образом: при повышенной температуре греющей среды увеличивается градиент температуры по толщине образца. И в то время, когда в приповерхностных слоях уже отсутствует влага и начинается выделение летучих веществ, в глубинных слоях все еще идет испарение воды и соответственно температура в этой зоне не превышает 100°C. По-видимому, с того момента, как в центре образца завершается процесс испарения влаги, начинается более быстрый прогрев образца, сопровождающийся активизацией процесса потери массы. Исходя из этих соображений, процесс испарения влаги завершается в точке перегиба графика, т.е. в момент времени равный 20 минутам. Далее имеет место потеря массы только за счет пиролиза органической массы угля.

В таблице 2.2 представлены сравнительные характеристики по средней прочности образцов для каждого температурного уровня, а на рисунках 2.3 и 2.4 представлены, соответственно, абсолютные и относительные значения прочности образцов в зависимости от температуры термообработки.

Таблица 2.2 – Зависимость средней прочности образцов от температуры термообработки (выдержка 60 минут)

Температура, °С	Средняя прочность, МПа	% от прочности исходного угля
250	15,1	90
300	14,4	86
350	8,1	49
400	3,6	22

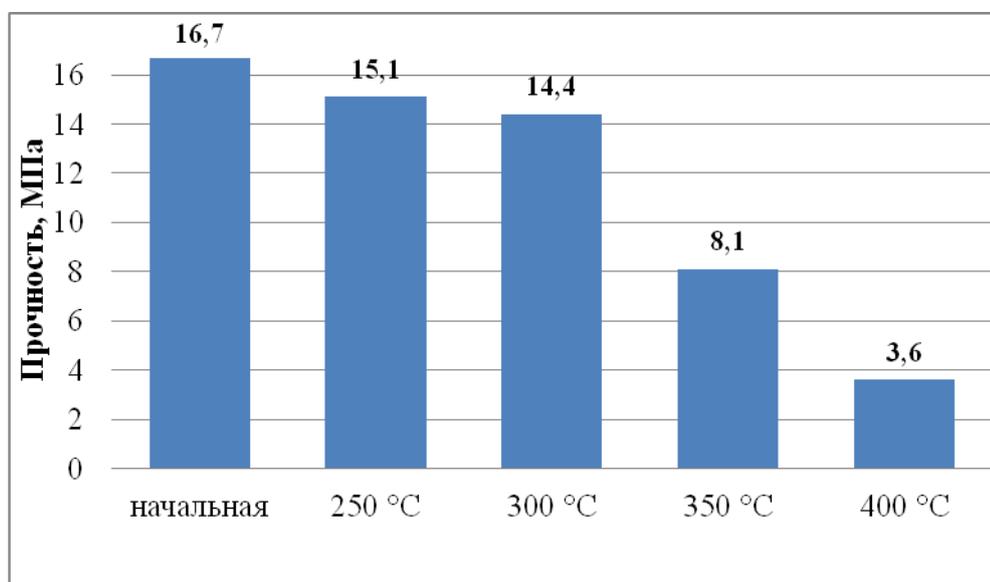


Рисунок 2.3 – Абсолютные значения прочности образцов в зависимости от температуры термообработки

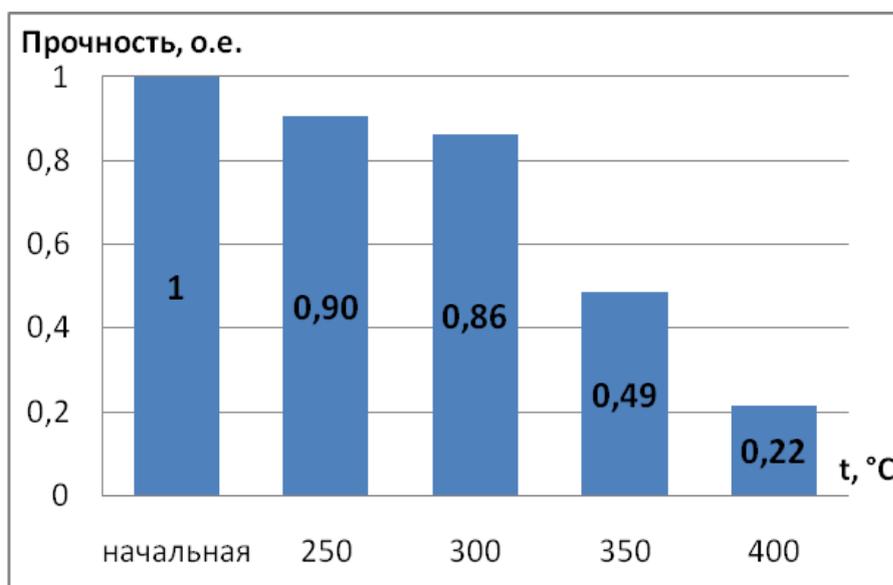


Рисунок 2.4 – Относительные значения прочности образцов в зависимости от температуры термообработки

Из таблицы и рисунков видно, что наибольшая прочность сохраняется при температуре обработки 250°C, а также не значительно отличается прочность при температуре обработки 300°C. При температуре греющей среды 350°C и 400°C средняя прочность значительно уменьшается. При этих температурах существенно возрастает скорость потери массы. Можно предполагать, что возрастает и давление в порах угля. Это приводит к росту напряжения в матрице угля и соответственно к снижению прочности образца.

Для оценки динамики изменения прочности при температуре греющей среды 400°C были проведены эксперименты со временем выдержки 20 и 40 минут. График изменения прочности от времени для данной температуры представлен на рисунке 2.5.

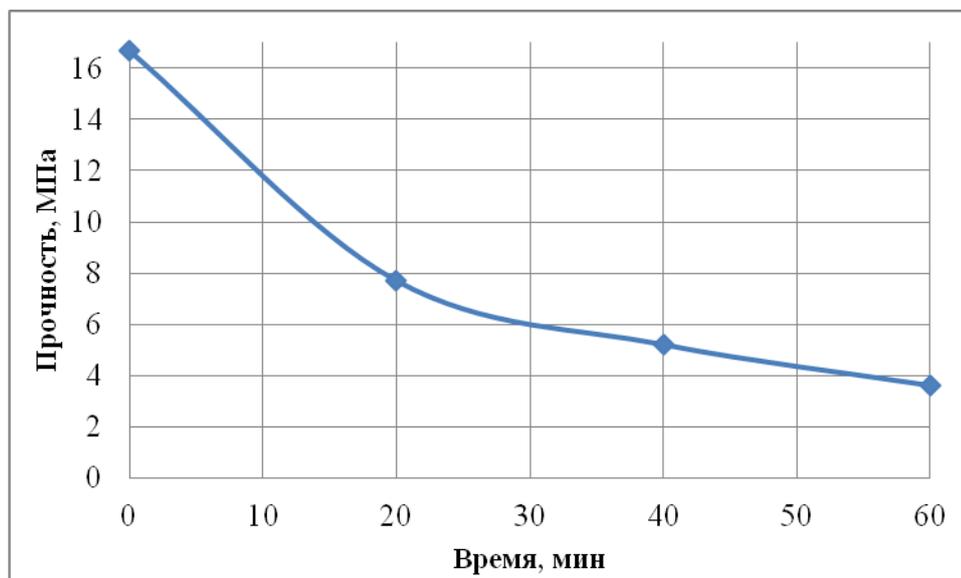


Рисунок 2.5 – Динамика изменения прочности в зависимости от времени выдержки при температуре греющей среды 400°C

При времени выдержки 20 минут прочность сохраняется на уровне 7,7 МПа, после 40 минут термообработки средняя прочность образцов падает до значения 5,2 МПа. Наименьшая прочность образцов по результатам эксперимента зафиксирована на 60-ти минутах выдержки и составила 3,6 МПа. Эти дополнительные эксперименты демонстрируют негативное влияние скорости нагрева (вследствие увеличения температурных градиентов) на прочностные характеристики образцов во время термообработки.

Исходя из полученных результатов следует, что наиболее приемлемыми, с точки зрения сохранения прочности, температурными уровнями являются 250°C и 300°C. Однако при почти одинаковой прочности испытанных образцов, температура греющей среды 300°C является более предпочтительной с точки зрения затрат времени на переработку угля. Также в дальнейших экспериментах время сушки при постоянной температуре было решено ограничить 10-ю минутами, поскольку за это время удаляется большая часть влаги из образцов.

2.4 Исследование процесса карбонизации одиночных образцов углей марки ЗБ (разрез Большесырский) и Д (разрез Моховский)

При исследовании процесса карбонизации одиночных образцов помимо угля марки ЗБ (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»), также был использован уголь марки Д (разрез Моховский, Кемеровская область, ОАО «Угольная компания Кузбассразрезуголь»). Моховский уголь, как и большесырский, относится к молодым маркам угля и его выбор обусловлен возможностью проверки и воспроизведения результатов, полученных на буром угле. Характеристики этих углей приведены в разделе 2.1.

Исходя из задач, поставленных в начале главы, на данном этапе экспериментов необходимо снизить содержание летучих веществ до уровня примерно 15%, обеспечив тем самым теплоту сгорания выше 25 МДж/кг (6000 ккал/кг), т.е. получить топливо с характеристиками, примерно соответствующими характеристикам бездымного топлива [4].

На основании результатов ранее проведенных экспериментов для сушки угля был выбран температурный уровень 300°C и определено время выдержки 10 минут. Данная температура была принята как начальная в дальнейших экспериментах. В качестве конечных температур экспериментально протестированы 400°C, 500°C, 600°C.

В результате серии поисковых экспериментов было определено, что достижение целевого уровня летучих веществ (15%) возможно только при температуре греющей среды 500°C. Однако если использовать данные температуры и времена выдержки в технологическом процессе производства продукта, то можно заранее предположить, что время прохождения обоих этапов термообработки должно существенно увеличиться, вследствие увеличения массы угля. Учитывая это обстоятельство, было принято решение отказаться от данной конечной температуры в дальнейших экспериментах и сразу перейти к режимам с конечной температурой среды 600°C. Тем более, что температура 600°C

фигурирует в литературных источниках указанных ранее. Сохранение прочности планируется достигать путем снижения темпа нагрева.

Результаты экспериментов

В результате серии выполненных экспериментов была определена предельная температура стадии термообработки подсушенного угля, а также предельно допустимый по условию сохранения прочности темп нагрева. Требуемое качество продукта по остаточному содержанию летучих и прочности обеспечивается при линейном изменении температуры печи 300–600°C в течение 3-х часов, т.е. при темпе нагрева 0,028 град/с. Далее этот режим термообработки считается **базовым режимом**. Для контроля изменения прочности образцы отбирались через каждые 30 минут после начала стадии термообработки при достижении 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C. Методика измерения прочности описана в разделе 2.2.

График зависимости прочности карбонизата из угля 3Б от температуры и времени выдержки представлен на рисунке 2.6, аналогичный график для карбонизата из угля марки Д представлен на рисунке 2.7. Из этих графиков следует, что значительная часть прочности теряется в процессе удаления летучих веществ – она снижается примерно в 2 раза по сравнению с прочностью исходного угля. В конечном итоге прочность на раздавливание у прокаленных образцов достигает уровня 8 МПа.

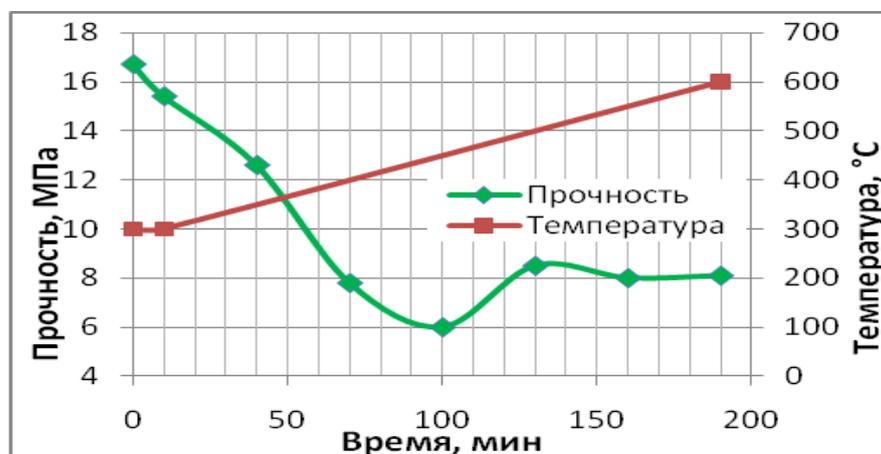


Рисунок 2.6 – Зависимость прочности карбонизата из угля марки 3Б от времени выдержки и температуры (основной режим термообработки)

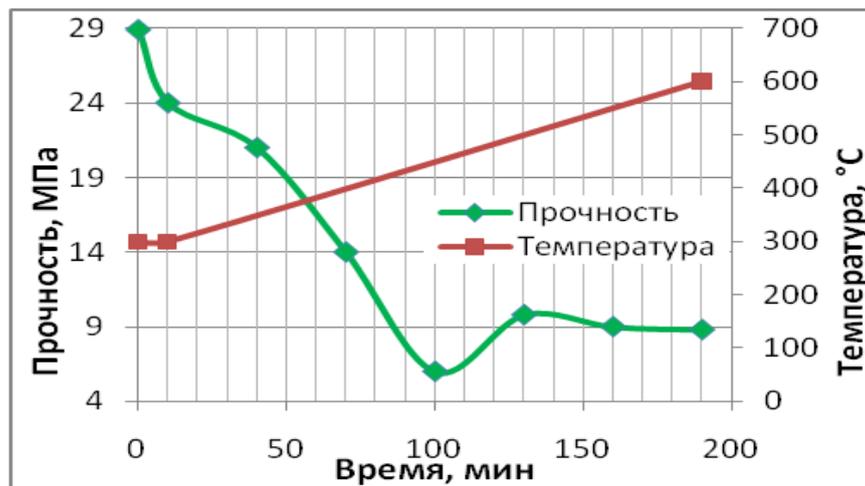


Рисунок 2.7 – Зависимость прочности карбонизата из угля марки Д от времени выдержки и температуры (основной режим термообработки)

Необходимо отметить, что в области температур 400–500°C наблюдается снижение прочности, а далее происходит её увеличение примерно на 30%. Этот эффект «восстановления прочности» наблюдался при исследовании образцов из обеих марок углей. Его достоверность была подвергнута тщательной проверке путем многократного повторения опытов, однако ошибок эксперимента обнаружено не было. Если сопоставить график зависимости прочности от температуры и времени с графиком изменения содержания летучих веществ (рисунок 2.8, 2.9), то можно предположить, что упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смол), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

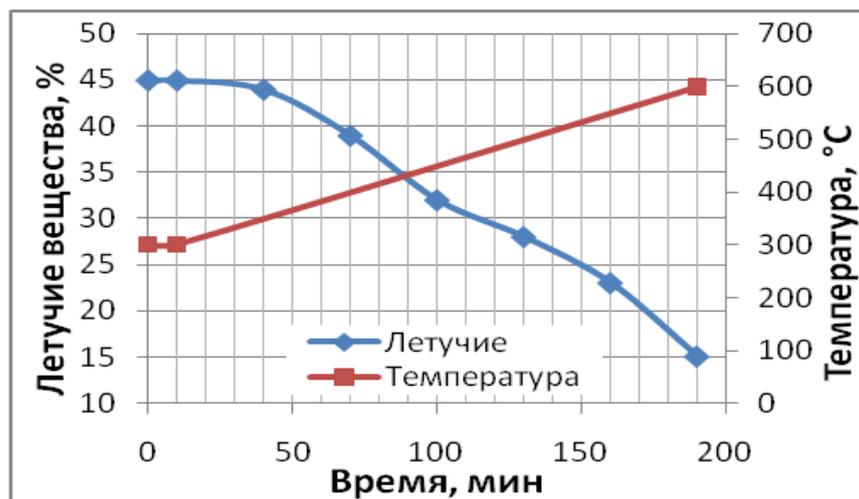


Рисунок 2.8 – Динамика удаления влаги и летучих веществ при карбонизации угля марки ЗБ (основной режим термообработки)

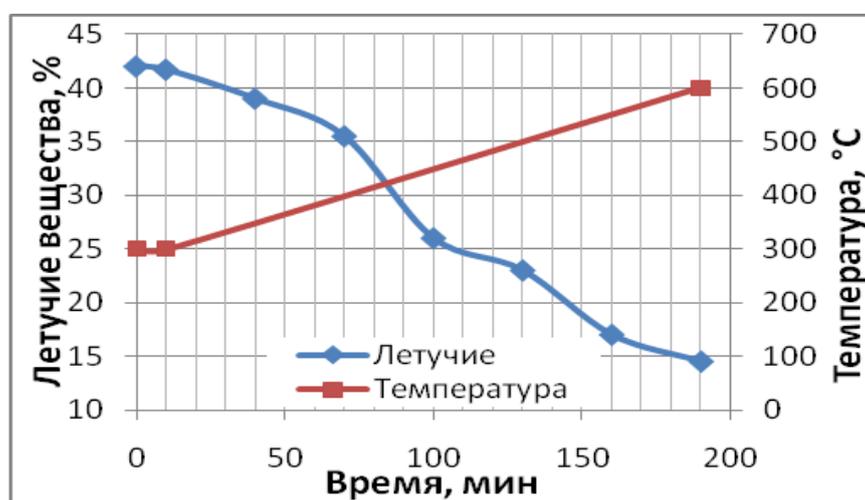


Рисунок 2.9 – Динамика удаления влаги и летучих веществ при карбонизации угля марки Д (основной режим термообработки)

В таблице 2.3 представлены характеристики конечного продукта, полученного по базовому режиму термообработки, в сравнении с характеристиками исходного угля.

Таблица 2.3 – Сравнительные характеристики исходного угля и карбонизата, полученного при термообработке по базовому режиму

	Исходный уголь 3Б	Карбонизат угля 3Б	Исходный уголь Д	Карбонизат угля Д
W^r , %	20,1	0	17,9	0
A^d , %	4,5	7,0	7,2	9,1
V^{daf} , %	45,9	15,4	42,3	14,6
Низшая теплота сгорания (рабочее состояние), МДж/кг (ккал/кг)	21,0 (5000)	30,3 (7240)	21,8 (5220)	29,5 (7060)
Сера, %	0,33	0,41	0,35	0,18
Прочность на раздавливание, МПа	16,6	8,2	28,8	8,9

Из таблицы следует, что угли обеих марок после термообработки имеют теплоту сгорания около 30 МДж/кг и выход летучих веществ на уровне 15%. Прочность карбонизата из угля 3Б снизилась приблизительно в 2 раза, а из угля марки Д – 3–3,5 раза, но осталась на уровне, удовлетворяющем ранее сформулированным требованиям. Здесь необходимо обратить внимание на различный характер изменения содержания серы: у бурогоугольного карбонизата этот показатель выше, чем у исходного угля, а у каменноугольного карбонизата – ниже. Скорее всего, это обусловлено разным характером распределения серы, как в органической, так и в минеральной массе сравниваемых углей.

Таким образом, достижение низкого содержания летучих веществ, удовлетворительной прочности и теплоты сгорания конечного продукта обеспечивается при термообработке исследуемых углей по *базовому режиму*.

На следующем этапе была исследована возможность ускорения процесса карбонизации. При этом параметры стадии сушки оставались неизменными. Сохранялся неизменным температурный интервал стадии карбонизации (от 300 до 600°C) и линейный характер роста температуры. На рисунке 2.10 представлены термограммы для 3-х режимов. Дополнительно были протестированы два режима: соответственно с темпом нагрева 0,056 град/с и 0,12 град/с (90 и 45 минут). В

обоих случаях характеристики конечного продукта по теплоте сгорания и выходу летучих веществ остались примерно на том же уровне, что и при использовании основного режима термообработки. Однако прочность карбонизата из угля марки ЗБ понизилась на 15–20% и на 30–35% соответственно (данные относительно базового режима). Прочность карбонизата из угля марки Д для режима 0,056 град/с – осталась примерно на том же уровне, а для режима 0,12 град/с – уменьшилась на 20% (данные относительно базового режима) [4].

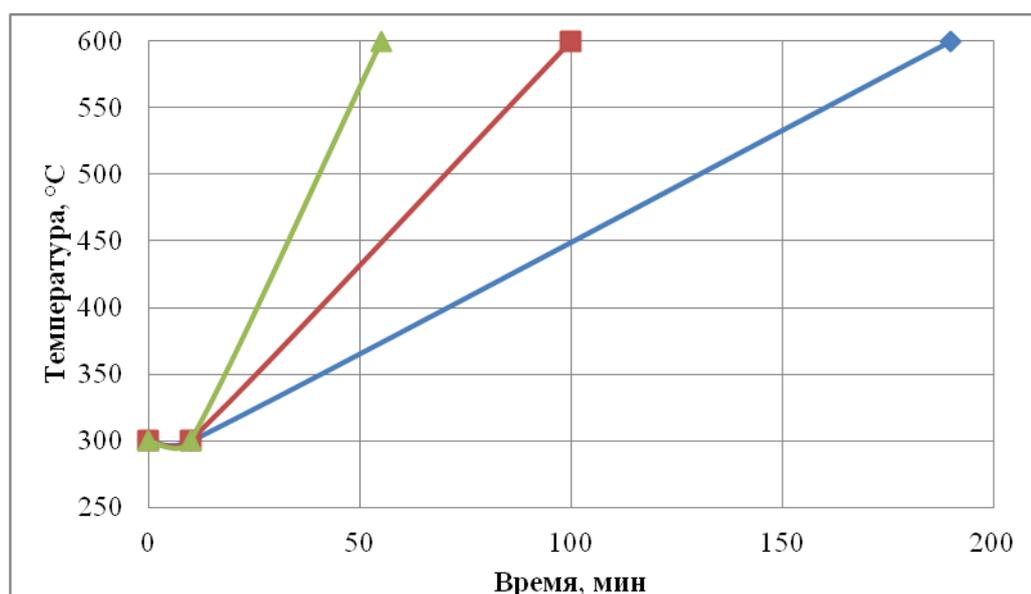


Рисунок 2.10 – Термограммы для режимов нагрева

Краткие выводы

В результате экспериментов по карбонизации одиночных образцов двух марок угля для практического использования рекомендуются следующие оптимальные режимы их термообработки:

Бурый уголь (марка ЗБ)

Выбран базовый режим термообработки: 10-минутная сушка при температуре 300°C и далее нагрев с постоянной скоростью до 600°C в течение 3 часов (что соответствует темпу нагрева 0,028 град/с).

При этом обеспечивается прочность на сжатие получаемого карбонизата около 8-10 МПа.

Каменный уголь (марка Д)

Выбран ускоренный режим термообработки: 10-минутная сушка при температуре 300°C и далее нагрев с постоянной скоростью до 600°C в течение 1,5 часов (что соответствует темпу нагрева 0,056 град/с).

При этом обеспечивается прочность на сжатие получаемого карбонизата около 8–10 МПа.

2.5 Исследование процесса карбонизации других марок угля

После детального исследования процесса термообработки углей двух марок и получения успешных результатов было принято решение расширить ассортимент углей. Дополнительно протестировано две марки угля: 2Б (разрез Березовский, Красноярский край, АО «СУЭК») и Д (разрез Караканский, Кемеровская область, ООО Каракан-Инвест).

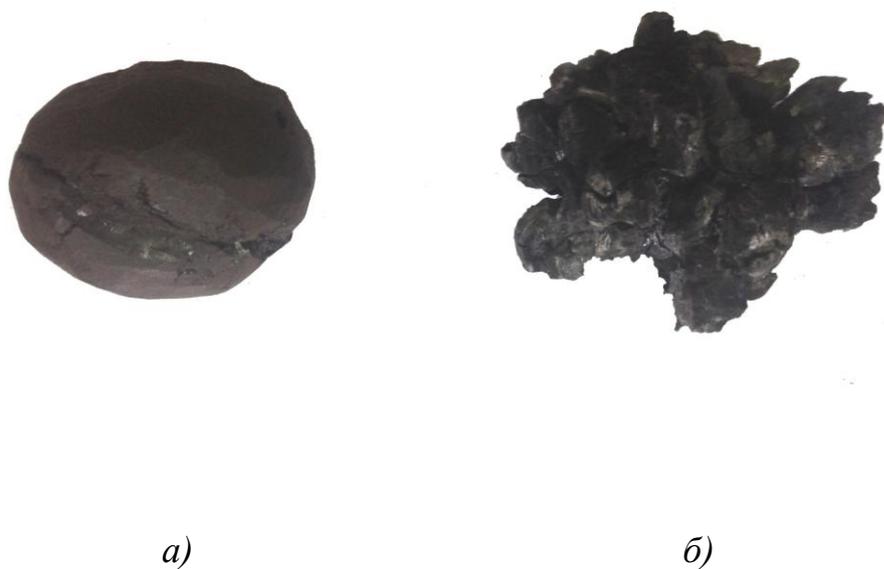
Уголь марки 2Б (разрез Березовский)

Воспроизведение режимов сушки и карбонизации, определенных ранее для угля 3Б на 2Б показало отрицательный результат. На данном угле в процессе экспериментов вообще не удалось добиться удовлетворительной прочности. Одиночные образцы после термообработки имели сравнительно низкую прочность как визуально, так и после раздавливания на лабораторном прессе. В связи с этим дальнейшие исследования на данной марке угля было решено не продолжать.

Уголь марки Д (разрез Караканский)

В результате термообработки не удалось получить объективные данные о прочности караканского угля, поскольку уголь обладает способностью к вспучиванию. В процессе эксперимента под воздействием температуры кубики угля вспучивались и изменяли форму. Для более объективного сравнения были изготовлены два образца сферической формы. Один из них был подвергнут

термообработке, после чего сравнивались формы исходного и термообработанного образца. На рисунке 2.11 представлены два образца караканского угля, полученные в результате термообработки.



a) – исходный образец; *б)* – термообработанный образец

Рисунок 2.11 – Изменение формы образца после термообработки. Уголь марки Д (разрез Караканский)

Несмотря на изменение формы, карбонизат обладал достаточно высокой прочностью и было принято решение использовать уголь марки Д разреза Караканский в качестве сырья для проведения дальнейших исследований.

2.6 Обсуждение результатов исследований и основные выводы

Исследования, выполненные в данном разделе диссертации, показали, что для сохранения прочности образцов угля необходимо обеспечивать замедленный темп нагрева образцов угля (менее 0,056 град/с). В зависимости от области применения продукции и вида исходного угля имеется возможность управления

качеством конечной продукции. Теплотехнические характеристики, прочность карбонизата, и также его количественный выход из исходного сырья, определяются двумя параметрами: верхним пределом интервала нагрева и скоростью линейного нагрева. В данной серии экспериментов выход конечного продукта составил 56–58%.

Полученный полукокс не содержит влаги, однако склонен к её поглощению из окружающей среды. Необходимо отметить, что показатели технического анализа по зольности выросли в результате термообработки для обеих марок угля приблизительно на 2–3%. Это можно объяснить тем, что масса карбонизата уменьшается, по сравнению с начальной массой угольного сырья, а зола остается в продукте, тем самым увеличивается её процентное соотношение.

Процесс термообработки углей также влияет на изменение процентного содержания серы в карбонизате. У полукокса из бурого угля этот показатель увеличился, а для карбонизата из угля марки Д его значение понизилось по сравнению с исходным углем. Этот результат объясняется различным характером распределения серы органической и минеральной части сравниваемых углей, а именно: для угля марки ЗБ содержание серы больше в минеральной части, для Д – в органической.

Один из самых важных результатов – это значительное увеличение теплоты сгорания конечных продуктов термообработки. Для карбонизата, полученного из угля марки ЗБ она составила 30,3 МДж/кг (7240 ккал/кг), а для карбонизата из длиннопламенного угля 29,5 МДж/кг (7060 ккал/кг), что соответственно на 44% и 35% выше, чем у исходного угля. Необходимо также отметить, что в процессе карбонизации угля производится второй ценный продукт – горючий газ, который также рекомендуется использоваться в качестве топлива.

На основании данных, которые были получены в результате проведенных экспериментов, сформулированы следующие выводы:

1. Необходимая температура греющей среды для стадии сушки, с точки зрения обеспечения приемлемой для практики прочности, равна 300°C. Данное

утверждение справедливо для углей 3Б (разрез Большесырский), Д (разрез Моховский).

2. Определены основные управляющие параметры процесса карбонизации: скорость нагрева и максимальная температура греющей среды. Приемлемая для практики прочность производимого полукокса обеспечивается путем нагрева высушенного угля от 300 до 600°C с темпом не более 0,056 град/с. Данное утверждение справедливо для углей 3Б (разрез Большесырский), Д (разрез Моховский).

3. Определена динамика изменения прочности образцов угля в границах температурного диапазона 300–600°C.

4. Впервые обнаружен эффект «восстановления прочности» в области температур 400–500°C, можно предположить, что упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смол), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

Глава 3. Исследование частичной газификации угля в слоевом аппарате с пульсирующим обращенным дутьем

3.1 Постановка задач экспериментального исследования и описание экспериментальной установки

5. Исходя из задачи, поставленной в пункте 1.8 необходимо: Опираясь на результаты исследований, полученных на одиночных частицах угля, обосновать выбор конструкции установки для нового процесса производства полукокса. На данной установке выполнить экспериментальные исследования по переработке углей.

Были поставлены следующие задачи исследования для данного раздела:

1. Обосновать вариант аппаратного оформления технологического процесса карбонизации угля.

2. Определить основные управляющие параметры процесса карбонизации в аппарате.

3. Определить оптимальные значения управляющих параметров процесса карбонизации по критерию прочности куска.

Ранее в результате экспериментов на одиночных частицах было показано [4], что матрица бурого угля начинает разрушаться, когда скорость нагрева превышает некоторое критическое значение. Таким образом, прочность карбонизата контролируется единственным управляющим фактором – изменяющейся по определенному графику температурой в печи.

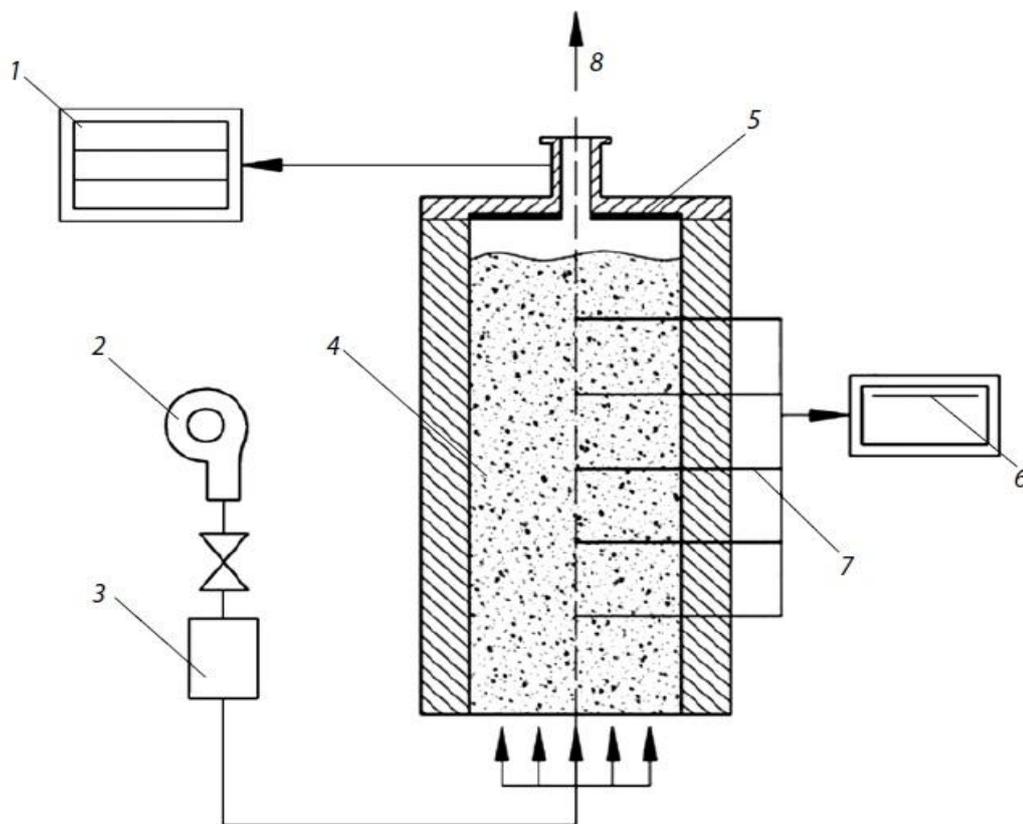
Классическая схема аллотермической переработки кускового угля с подводом тепла через стенку имеет ряд недостатков, среди которых на первом месте – низкая энергоэффективность и длительность технологического процесса, неоднородность качества продукции, попутное производство пиролизного газа, забалластированного смолами. Ситуация радикальным образом изменяется при использовании автотермической технологии частичной газификации кускового

угля в аппаратах шахтного типа с обращенным воздушным дутьем [5], которая обеспечивает равномерный по сечению аппарата нагрев угля за счет сжигания на поверхности куска выделяющегося из него пиролизного газа и паров смолы. Далее по ходу движения газового потока продукты сгорания восстанавливаются на раскаленной поверхности полукокса до CO и H_2 , образуя генераторный газ без следов смолы (рисунок 3.1). Важно отметить, что в отличие от классической слоевой газификации в данном исполнении фронт физико-химических превращений движется навстречу газовому потоку.



Рисунок 3.1 – Фотография волны физико-химических превращений при слоевой газификации угля с обращенным дутьем

Для исследования закономерностей автотермического процесса карбонизации бурого угля был использован слоевой газификатор периодического действия с обращенным воздушным дутьем (внутренний диаметр 300 мм, высота рабочей зоны 1500 мм). По высоте цилиндрического реактора с шагом 180 мм размещены семь хромель-алюмелевых термопар, термочувствительные элементы которых находятся на оси симметрии реактора. Подача воздуха осуществлялась снизу, а зажигание слоя угля – сверху. Таким образом, волна физико-химических превращений перемещалась сверху вниз, т. е. навстречу потоку воздуха (обращенное дутье). Анализ выходящего газа производили с помощью газоанализатора «ГАММА-100». На рисунке 3.2 приведена принципиальная схема экспериментальной установки.



*1 – газоанализатор; 2 – компрессор; 3 – расходомер; 4 – уголь;
5 – электронное запальное устройство; 6 – потенциометр; 7 – термопары;
8 – генераторный газ*

Рисунок 3.2 – Принципиальная схема экспериментальной установки для слоевой газификации угля с обращенным дутьем:

3.2 Поисковые эксперименты и обоснование необходимости применения пульсирующего дутья

В качестве сырья использовали уголь марки 3Б (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»). Непосредственно перед экспериментом уголь подвергали дроблению и грохочению для выделения необходимого класса крупности. Технические характеристики исходного угля приведены в разделе 2.1 (таблица 2.1).

На первом этапе были проведены поисковые исследования с углем фракции 15–40 мм. Основная цель заключалась в обеспечении умеренной скорости нагрева частиц в пределах до 0,056 град/с. Поскольку прогрев термически массивных частиц угля является внутренней тепловой задачей, скорость их нагрева зависит только от одного параметра – температуры поверхности. В свою очередь, она определяется единственным управляющим параметром – подачей воздуха в реактор.

В результате серии экспериментов было установлено, что даже при минимальном расходе воздуха, который еще в состоянии обеспечить нижний предел существования тепловой волны в слое (т.е. процесса горения), скорость нагрева угольных частиц неприемлемо высока.

Так, при уменьшении расхода воздуха ниже $0,0108\text{--}0,0111\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ тепловыделение в зоне физико-химических превращений уже не позволяет компенсировать тепловые потери и процесс газификации затухает. При расходе воздуха $0,0111\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ был получен карбонизат с низшей теплотой сгорания 27,2–29,3 МДж/кг (6500–7000 ккал/кг) и содержанием летучих веществ $V^{daf} \approx 16\%$. Однако его прочность оказалась существенно ниже того максимума, который был достигнут в экспериментах с одиночными частицами, что обусловлено высокой скоростью нагрева. В этом случае скорость перемещения тепловой волны по угольной засыпке составляла 0,066–0,078 м/ч [9].

Для того чтобы снизить скорость движения тепловой волны и тем самым обеспечить более замедленный прогрев угольных частиц, было принято решение перейти в область пульсирующих режимов с дискретной подачей воздуха. Здесь имеется в виду чередование периодов подачи окислителя и его отключения с продолжительностью порядка минут. В этом случае снижается среднеинтегральная подача воздуха в зону реагирования и, соответственно, интенсивность тепловыделения, а также уменьшается скорость движения тепловой волны по угольной засыпке.

В период отсутствия воздуха угольные частицы продолжают выделять влагу и летучие вещества, но их температура снижается. В период поступления воздуха летучие вещества воспламеняются, и продукты горения разогревают частицы угля.

Пульсирующий режим обеспечивался прерыванием потока воздуха с помощью временного реле, установленного в электрическую цепь компрессора. В этом варианте исполнения технологического процесса газификации угля, помимо расхода воздуха, к регулирующим параметрам добавились период подачи и период останова дутья.

3.3 Термическая переработка угля марки ЗБ (разрез Большесырский)

Область изменения параметров в экспериментах была определена на основе ранее полученных данных при исследовании процесса термообработки одиночных частиц (глава 2). В качестве предельно допустимой температуры нагрева частиц было принято значение $600 \pm 30^\circ\text{C}$. Расход воздушного дутья, а также продолжительности периодов подачи и останова дутья определяли эмпирически, исходя из условия, что нагрев угольных частиц от 300°C до предельной температуры должен осуществляться с темпом нагрева $0,028\text{--}0,056$ град/с. В данных экспериментах использовался уголь крупности 15–40 мм.

Управление технологическим процессом осуществлялось по показаниям первой термопары, которая находилась на расстоянии 100 мм от основания слоя

угля. После запуска процесса газификации показания выше расположенных термопар последовательно с постоянным сдвигом по времени воспроизводили практически идентичную картину. На рисунке 3.3 представлена полученная типичная термограмма режима газификации с пульсирующим дутьем.

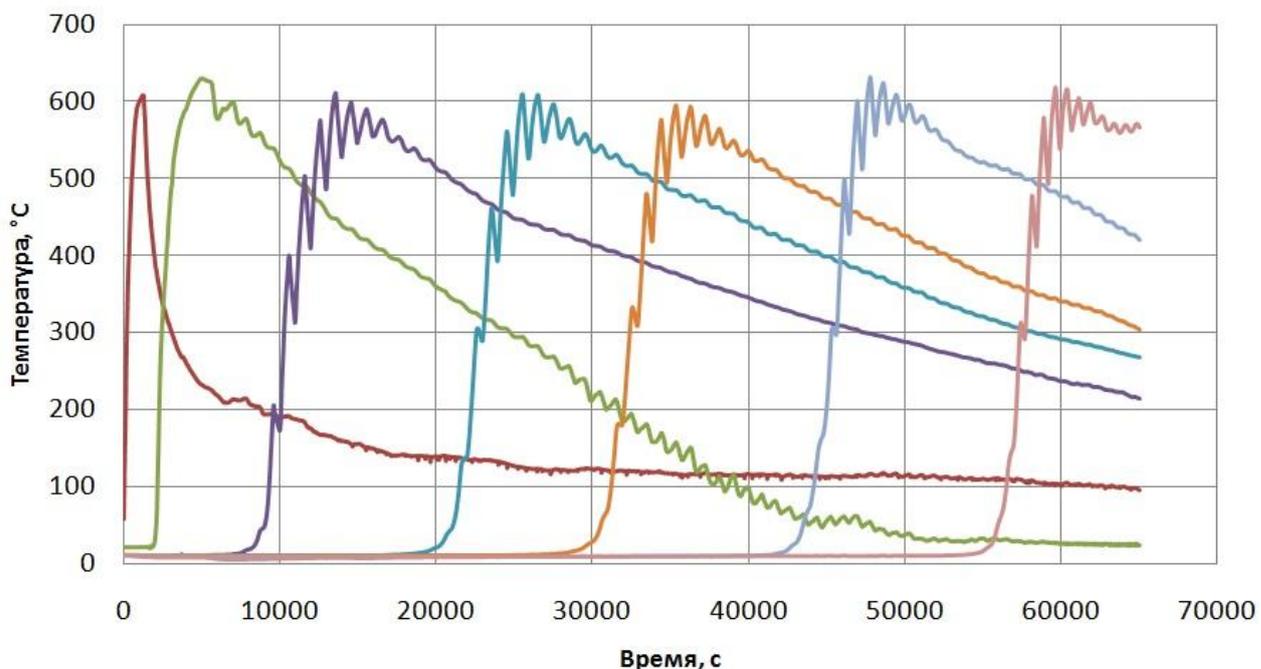


Рисунок 3.3 – Полученная типичная термограмма режима газификации угля с пульсирующим дутьем

Равномерное перемещение тепловой волны по слою угля обеспечивало стабильность процесса его частичной газификации и однородность качества образующегося карбонизата по всему объему реактора. При этом следует отметить, что в ряде экспериментов некоторые частицы угля под действием термических напряжений все-таки разламывались на несколько кусков, которые, тем не менее, сохраняли достаточно высокую прочность. Усадка карбонизата составляла $\sim 10\%$ по отношению к исходному объему угля.

В результате серии оптимизационных экспериментов с целью максимизации прочности твердого продукта были определены следующие параметры технологического процесса: расход воздуха $0,022 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; продолжительность периода дутья 25 с; период останова дутья 150 с. При этом

скорость тепловой волны снизилась более чем в два раза по сравнению с нижним пределом существования стационарного режима газификации и составила 0,027–0,033 м/ч [9]. На рисунке 3.4 представлена циклограмма подачи воздуха в реактор аппарата.

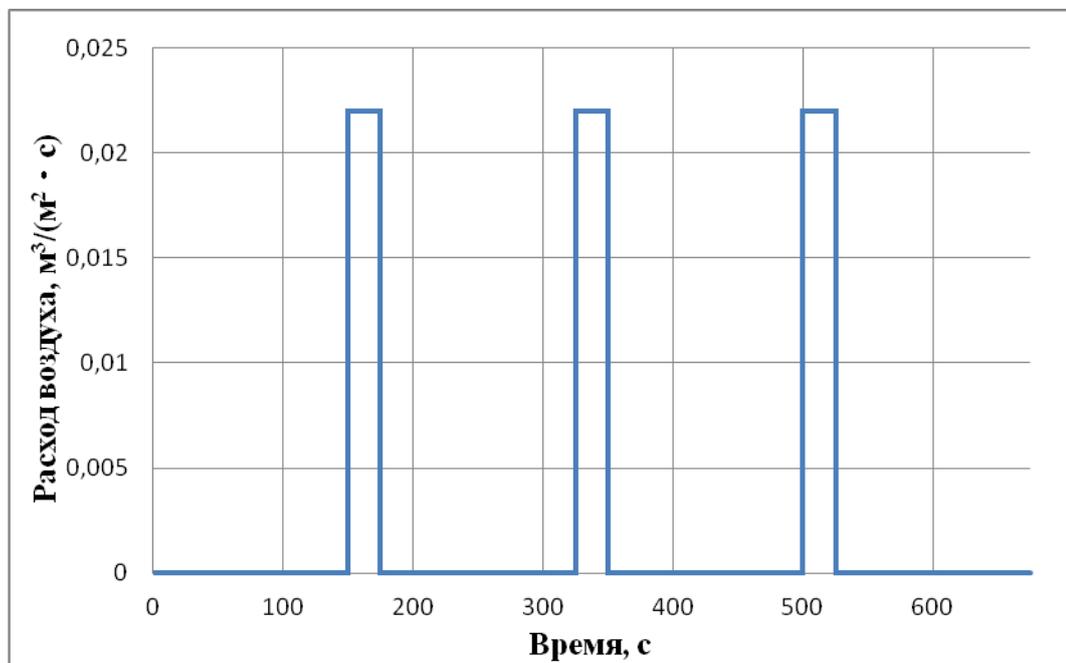


Рисунок 3.4 – Циклограмма подачи воздуха в реактор аппарата

Полученный при этих параметрах буроугольный карбонизат имел прочность на раздавливание в пределах 8–10 МПа, что соотносится с показателем, полученным на одиночных частицах. Выход продукта составил 56%. Стоит отметить, что конечные характеристики оценивались на основании исследования пяти проб, ошибка измерения не превысила 5%. Технический анализ карбонизата из угля 3Б приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики карбонизата из угля 3Б (разрез Большесырский)

Технический анализ карбонизата, %				Q_i^r МДж/кг
W_t^r	A^d	V^{daf}	Выход карбонизата, %	
3,5	6,8	14,8	56	29,3

Как можно заметить из таблицы, влажность карбонизата составила 3,5%, однако при экспериментах на частицах угля данный параметр был 0%. Это связано с тем, что после получения карбонизата из одиночных частиц угля образцы остывали и сразу паковались в герметичные полиэтиленовые пакеты для проведения дальнейших исследований. Либо же образцы сразу раздавливались и отправлялись на проведение технического анализа. В случае с карбонизатом, полученным на газификаторе, продукт оставался в реакторе до полного остывания. В результате чего атмосферная влага поглощалась остывшим карбонизатом. Стоит также отметить, что в промышленных слоевых аппаратах предусмотрена система охлаждения продукта непосредственно в реакторе.

После выгрузки готового продукта производилось грохочение. Для этих целей использовался автоматический лабораторный грохот модели КП 109/2. Применены сита с размерами ячеек: 25, 20, 10, 5. В таблице 3.2 приведены данные по классам крупности готового продукта.

Таблица 3.2 – Разделение на классы крупности карбонизата из угля марки 3Б

Класс крупности, мм	%
≥ 25	34
20	22
10	19
≤ 5	25

Из таблицы видно, что основную массу термообработанного угля составляют крупные фракции. Свыше 70% карбонизата приходится на фракцию

≥ 10 . Данное значение положительным образом влияет на экономические характеристики производства высококалорийного топлива из угля марки ЗБ.

В процессе частичной газификации угля с пульсирующим дутьем также производится горячий генераторный газ с теплотой сгорания около $2,55 \text{ МДж/м}^3$. Выход газа составляет $\sim 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$ исходного угля.

Таким образом, полученные результаты доказали возможность аппаратного производства карбонизата удовлетворительной прочности из бурого угля марки ЗБ. В качестве аппарата необходимо использовать слоевой реактор для частичной газификации угля с обращенным пульсирующим дутьем. Полученный продукт может быть рекомендован для использования в качестве высококалорийного технологического топлива, а также в качестве бытового бездымного топлива .

3.4 Термическая переработка угля марки Д (разрез Моховский)

Необходимо отметить, что основным сырьем для исследования был выбран уголь марки ЗБ (Большесырского месторождения, Красноярский край, ООО «Сибуголь»), а исследования на других марках угля проводились для составления более полной картины поведения углей с высоким содержанием летучих веществ при карбонизации в аналогичных условиях. При аналогичных режимных параметрах, использованных для карбонизации угля марки ЗБ, был проведен процесс карбонизации угля марки Д (разрез Моховский, Кемеровская область, ОАО «Угольная компания Кузбассразрезуголь») в слоевом газификаторе с обращенным воздушным дутьем. В результате чего был получен карбонизат с высокой прочностью, однако исходя из экспериментов главы 2, для моховского угля в качестве основного режима для переработки был выбран ускоренный вариант длительностью 1,5 часа. В результате серии экспериментов были найдены значения расхода воздуха и длительность периода работы и отключения компрессора: расход воздуха составил $0,022 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; продолжительность периода дутья 35 с; период останова дутья 135 с.

Как и в предыдущей серии экспериментов для термопереработки применялся уголь крупностью 15-40 мм. Исходные характеристики длиннопламенного угля разреза Моховский приведены в разделе 2.1 (таблица 2.1).

В таблице 3.3 приведены усредненные характеристики полученного карбонизата.

Таблица 3.3 – Характеристики карбонизата из угля марки Д (разреза Моховский)

Технический анализ карбонизата, %				Q_i^r МДж/кг
W_t^r	A^d	V^{daf}	Выход карбонизата, %	
2,9	8,6	14,7	58	28,3

Из данных таблицы следует, что для карбонизата из моховского угля присуще более высокое содержание золы, однако его выход оказался выше. Теплота сгорания зафиксирована на уровне значений карбонизата из угля 3Б. Другая важная характеристика конечного продукта термообработки – класс крупности. Было произведено грохочение карбонизата, в таблице 3.4 приведены усредненные значения по классам крупности.

Таблица 3.4 – Разделение на классы крупности карбонизата из угля марки Д (разрез Моховский)

Класс крупности, мм	%
≥ 25	38
20	19
10	25
≤ 5	18

Из представленной таблицы видно, что основная масса продукта приходится на крупные фракции. Крупность продукта оказалась выше, чем у

карбонизата из угля марки ЗБ. Скорее всего, это связано с бóльшей степенью метаморфизма и повышенной прочностью исходного угля.

Таким образом, результаты исследования процесса переработки угля марки Д (разрез Моховский) подтверждают возможность производства высококалорийного твердого топлива по разработанному технологическому процессу, а также правильность выбора для ее аппаратного оформления слоевого газификатора с пульсирующим обращенным воздушным дутьем.

3.5 Термическая переработка угля марки Д (разрез Караканский)

Уголь марки Д разреза Караканский отличается от аналогичного по марке угля Д разреза Моховский. В первую очередь, как указывалось в предыдущей главе, данный уголь обладает способностью к вспучиванию при сохранении относительно высоких прочностных характеристик. Это свойство угля позволило получить высококалорийный карбонизат с высокими прочностными характеристиками и с низким содержанием остаточных летучих веществ без применения пульсирующей подачи воздуха, т.е. при более высокой скорости нагрева. Результат был достигнут при расходе воздуха 0,0108–0,0111 м³/(м²·с).

Результаты технического анализа угля марки Д (разрез Караканский) приведены в разделе 2.1 (таблица 2.1).

В экспериментах применялся уголь класса крупности аналогичного с предыдущими экспериментами – 15–40 мм. В таблице 3.5 приведены усредненные характеристики конечного продукта термообработки.

Таблица 3.5 – Технический анализ карбонизата из угля марки Д (разрез Караканский)

Технический анализ карбонизата, %				Q_i^r МДж/кг
W_t^r	A^d	V^{daf}	Выход карбонизата, %	
3,2	11,2	15,3	54	28,8

Также как и в случае с предыдущими экспериментами приведены результаты грохочения готового продукта, а в таблице 3.6 приведены усредненные значения.

Таблица 3.6 – Разделение на классы крупности карбонизата из угля марки Д (разрез Караканский)

Класс крупности, мм	%
≥25	41
20	27
10	18
≤5	14

Из данных таблицы следует, что процентное содержание класса 20 и ≥25 увеличилось по сравнению с экспериментами на других марках угля. Как было отмечено ранее, данный факт обусловлен характеристиками исходного угля. Отдельно необходимо отметить, что при анализе фракции ≤5 было выявлено повышенное содержание золы, вплоть до 23%, в то время как в остальной части карбонизата зольность составляла от 8 до 14%. С экономической точки зрения, для повышения кондиции продукции целесообразно удалить эту фракцию путем отсева. Однако несмотря на этот факт полукокс из марки угля Д (разрез Караканский) является высококалорийным твердым топливом и может рекомендоваться к использованию в качестве специального технологического топлива.

3.6 Обсуждение полученных результатов

Обобщение результатов экспериментального исследования показало, что все исследованные угли пригодны для переработки в высококалорийное твердое топливо методом частичной газификации в слоевом аппарате с обращенным

воздушным дутьем. Однако, для достижения удовлетворительной прочности и технических характеристик, аналогичных характеристикам бездымного топлива, на углях марки ЗБ и Д (разрез Моховский) необходимо использовать пульсирующий режим подачи окислителя. При переработке угля марки Д (разрез Караканский) удалось добиться удовлетворительной прочности без применения пульсирующего дутья, но на минимальном расходе воздуха. Под минимальным расходом воздуха подразумевается расход, который еще в состоянии обеспечить нижний предел существования тепловой волны в слое ($0,0108-0,0111 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Данные по грохочению готового продукта показывают, что с увеличением степени метаморфизма исходного угля увеличивается выход крупной фракции карбонизата.

3.7 Краткие выводы

Таким образом, сформулированы следующие выводы:

1. Выполнено обоснование варианта аппаратного оформления технологического процесса. Для карбонизации исследованных углей рекомендуется использовать слоевой газификатор с обращенным воздушным дутьем.

2. Определены основные технологические параметры процесса карбонизации в слоевом аппарате: расход воздуха, время работы подачи и останова дутья.

3. Выполнена экспериментальная оптимизация процесса карбонизации по критерию прочности куска. Экспериментально определены значения управляющих параметров. Для углей ЗБ (разрез Большесырский) и необходимо использовать режим пульсирующей подачи воздуха при значении расхода $0,022 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ с продолжительностью периода дутья 25 с и с периодом останова дутья 150 с. Для угля марки Д (разрез Моховский): режим пульсирующей подачи воздуха при значении расхода $0,026 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ с продолжительностью периода дутья 35 с и с периодом останова дутья 135 с. Для угля марки Д (разрез

Караканский) необходимо применять режим постоянного дутья при расходе воздуха $0,0108-0,0111 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Подводя итог главы, можно констатировать выполнение задач, поставленных в начале данного раздела.

Глава 4. Подготовка результатов исследования к практическому использованию в промышленности

4.1 Постановка задач этапа

С целью подготовки результатов исследований к практическому использованию специалистами проектных организаций и промышленных предприятий в рамках данного раздела необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать решения по конструкторскому оформлению газификаторов, направленные на повышение удельной производительности.

2. Разработать технологическую схему термической переработки угля методом частичной газификации с пульсирующим обращенным дутьем.

3. Рассчитать технические показатели промышленного предприятия.

4. Рассчитать экономические показатели производства обгащенного топлива.

5. Разработать технологический регламент производства высококалорийного топлива из углей низкой степени метаморфизма.

4.2 Технические решения по аппаратурному оформлению технологического процесса

При реализации разработанного технологического процесса в типовом слоевом газификаторе с обращенным дутьем в результате замедления тепловой волны длительность полного цикла обработки составит 122 часа, что неприемлемо из экономических соображений. В связи с этим было разработано несколько новых вариантов исполнения аппарата с пульсирующим дутьем, направленных на уменьшение продолжительности цикла и соответственно – на увеличение производительности установки.

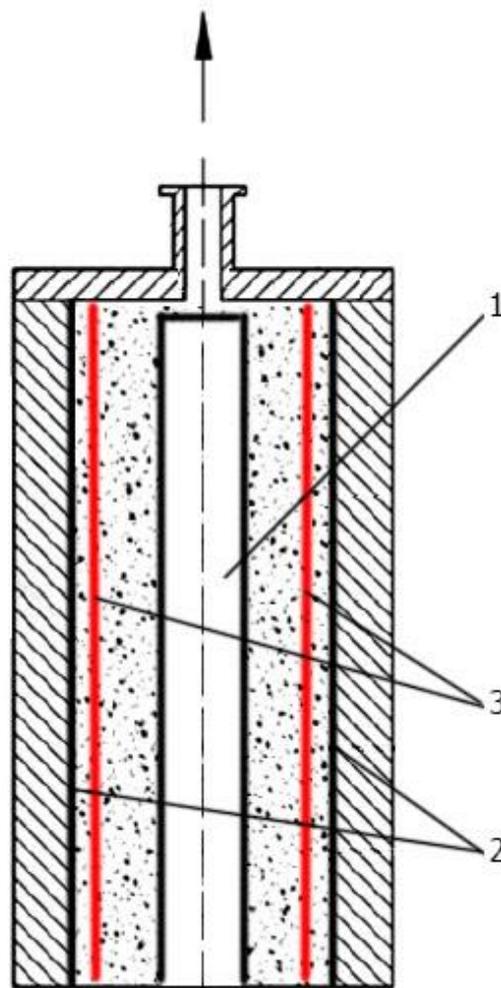
Термообработка угля в слоевом аппарате с обращенным дутьем осуществляется в узкой зоне, называемой волной физико-химических превращений (ФХП). На производительность установки, и соответственно продолжительность цикла, влияют два основных фактора:

1. Скорость движения волны ФХП.
2. Площадь волны ФХП.

Увеличить скорость волны ФХП не представляется возможным, так как это непременно приведет к увеличению скорости нагрева куска, что негативно скажется на прочности. В нашем распоряжении остается единственное решение – увеличение площади сечения аппарата. Здесь необходимо учитывать, что при большой площади волны на достаточно протяженных участках ее прохождения накапливаются и постепенно усиливаются искажения плоской формы волны, которые, в конце концов, приводят к разрушению волны и соответственно – технологического процесса. Поэтому для волны большой площади следует ограничивать длину пробега.

На основании обобщения результатов экспериментальных работ и промышленного использования реакторов с обращенным дутьем разработаны следующие решения по конструкторскому оформлению газификаторов, направленные на повышение удельной производительности.

Технологическая схема № 1. В реакторе цилиндрической формы диаметром до 3–4 м на оси симметрии устанавливается колонна для подачи дутьевого воздуха (рисунок 4.1). Розжиг угля производится с боковой поверхности засыпки. Волна представляет собой цилиндрическую поверхность, диаметр которой уменьшается в процессе движения от стенки к оси аппарата. Соответственно площадь фронта также уменьшается во времени, поэтому для сохранения идентичных условий обработки угля необходимо уменьшать расход воздуха пропорционально уменьшению площади волны, т.е. обеспечивать постоянство удельного расхода воздуха в расчете на 1 м^2 поверхности волны.



*1 – воздухораспределительная колонна; 2 – устройства для розжига;
3 – волна ФХП*

Рисунок 4.1 – Технологическая схема №1

В данной конструкции аппарата возможно изменение направления движения фронта волны, при этом розжиг будет производиться из центра, а подача воздуха со стороны стенки реактора. Недостатком технологической схемы №1 является изменение во времени производительности аппарата. По сравнению с классическим вариантом здесь площадь волны (и, соответственно, производительность) кроме диаметра, зависит еще и от высоты реактора: площадь волны = диаметр волны * высота засыпки. При умеренной высоте аппарата производительность возрастает приблизительно в 3 раза.

Технологическая схема № 2. Реактор с угольной засыпкой в виде параллелепипеда (рисунок 4.2). Розжиг угля происходит со стороны одной вертикальной стенки большего сечения, воздушное дутье подается со стороны противоположной стенки. Волна перемещается от стенки к стенке в горизонтальном направлении.

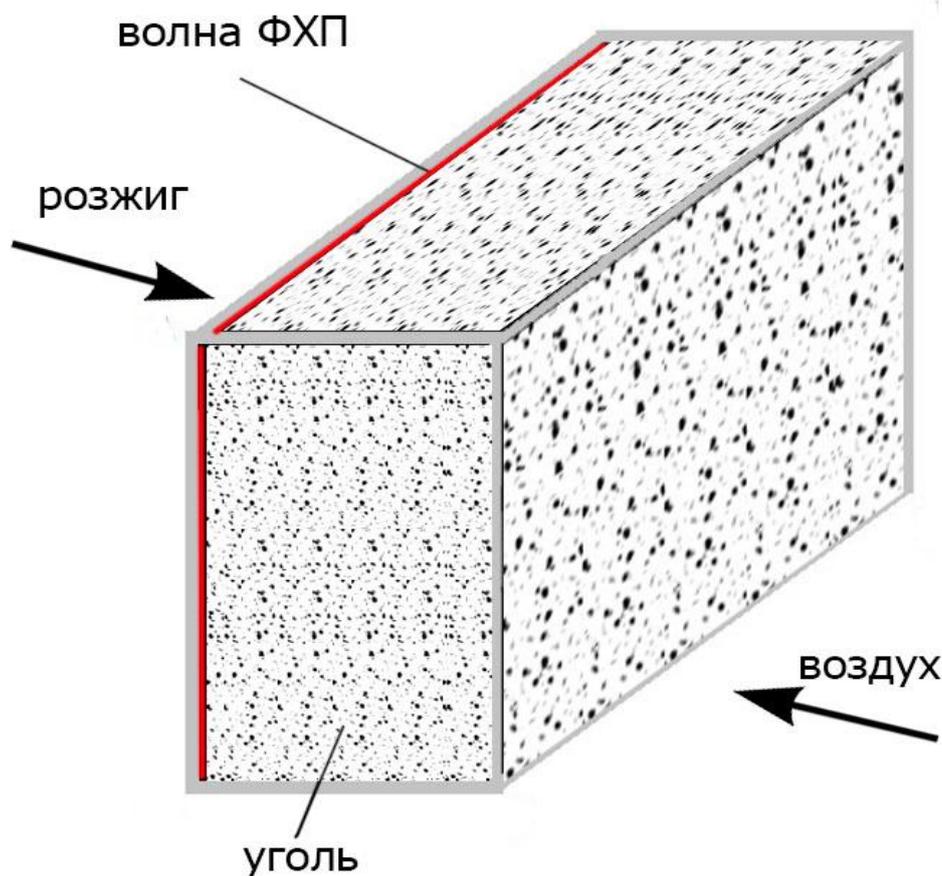


Рисунок 4.2 – Технологическая схема №2

Например, в реакторе сечением 4х1 м и высотой 3 м площадь фронта волны составит 12 м². По сравнению с классическим вариантом цилиндрического реактора диаметром 2,65 м производительность возрастает приблизительно на 50–70%.

Технологическая схема № 3. Реализация удвоенной схемы № 2, т.е. с подачей дутья с двух сторон. Розжиг производится в центре, устройством, установленным на оси сечения аппарата, там же отбирается газ. При реализации данного варианта конструктивного оформления аппарата производительность

возрастает в 2,5-3 раза (по сравнению с классическим вариантом цилиндрического реактора диаметром 2,65 м). На рисунке 4.3 представлена принципиальная схема аппарата с двумя вертикальными волнами ФХП.

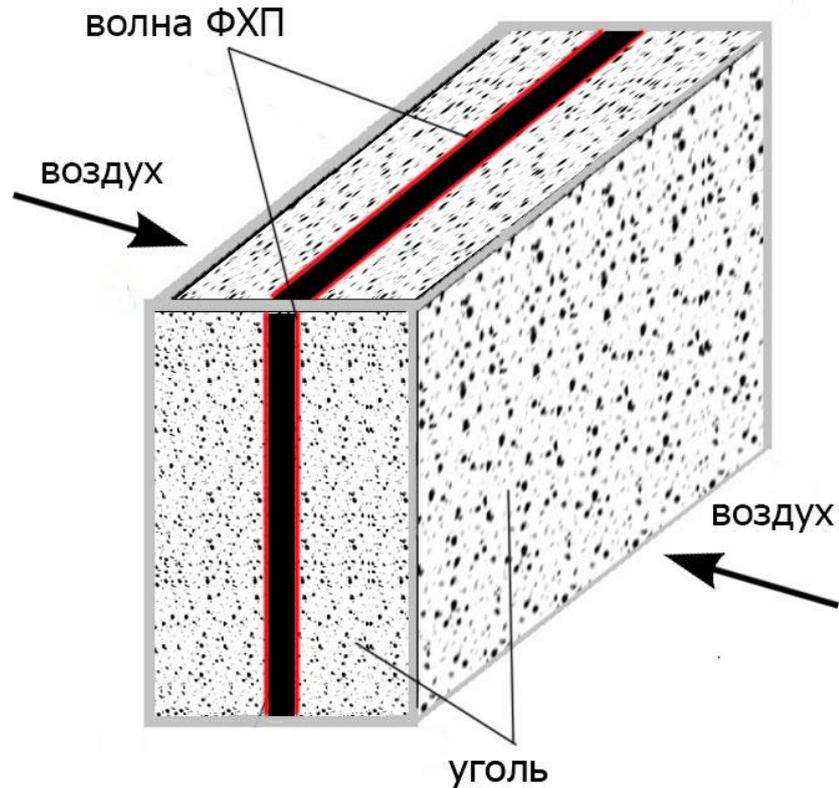


Рисунок 4.3 – Технологическая схема №3

Технологическая схема под №3 обеспечивает повышение производительности в несколько раз (как и схема под №1), при этом данная схема более проста в техническом исполнении по сравнению с предложенным вариантом под №1. Таким образом, схема под №3 была выбрана в качестве варианта аппаратного оформления процесса частичной газификации угля.

Расчет технико-экономических показателей приведен для варианта аппаратного оформления технологического процесса по схеме №3.

4.3 Технологическая схема производства обогащенного твердого топлива

Из результатов проведенного экспериментального исследования процесса слоевой газификации с пульсирующим обращенным воздушным дутьем следует, что данные, полученные в результате работы, применимы для воспроизведения в промышленном масштабе для технологической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ и получения бездымного топлива, а также попутного газа, который может быть использован для генерации энергии.

Технологическое решение является безотходным и экологически безопасным, а также имеет высокий уровень энергоэффективности. Оно заключается в частичной газификации угля в слоевом аппарате с целью получения высококалорийного полукокса и генераторного газа энергетического назначения. Газ сжигается на месте в котельной для производства тепловой энергии, а высококалорийный полукокс является дорогостоящим продуктом для широкого спектра применения.

Параллельное производство двух ценных продуктов радикальным образом изменяет экономические показатели комплексного производства, так что срок окупаемости инвестиций исчисляется несколькими годами.

Наиболее экономически выгодным вариантом представляется переработка угольного сырья на малом удалении от места добычи. В рамках диссертационной работы выполнен расчет показателей для перерабатывающего предприятия мощностью 50000 тонн бездымного топлива в год из угля марки ЗБ разреза Большесырский (Красноярский край, ООО «Сибуголь»). Здания цехов и оборудование планируется разместить на промышленной площадке в непосредственной близости от угольного разреза в ангарах быстровозводимого типа. Продукт переработки ориентирован на экспорт в Китайскую Народную Республику.

В производственную структуру предприятия по производству бездымного топлива входят следующие участки:

- 1) участок приема угля, складирования и подачи на переработку;
- 2) участок газификации угля;
- 3) участок временного складирования и отгрузки полукокса;
- 4) котельная на горючем газе из угля;
- 5) административно-бытовые помещения.

На рисунках 4.4–4.6 представлены технологические схемы производства бездымного топлива с использованием блока газификаторов.

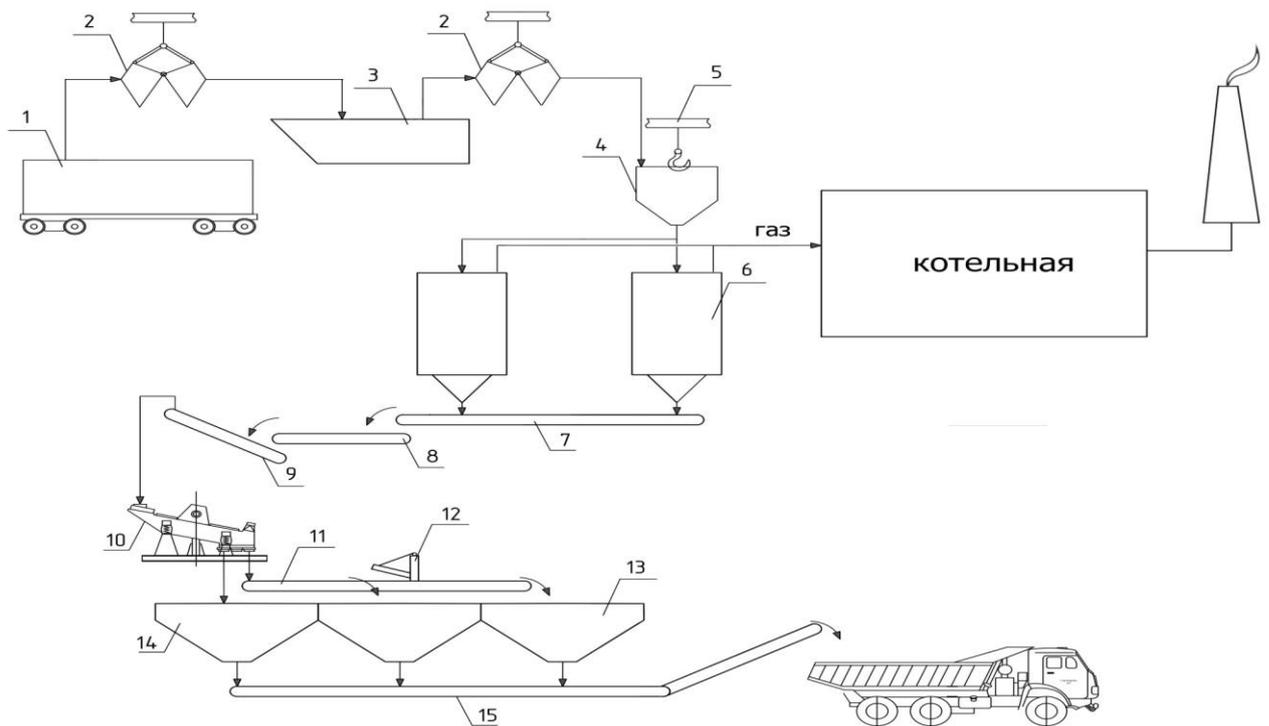


Рисунок 4.4 – Технологическая схема линии твердых продуктов

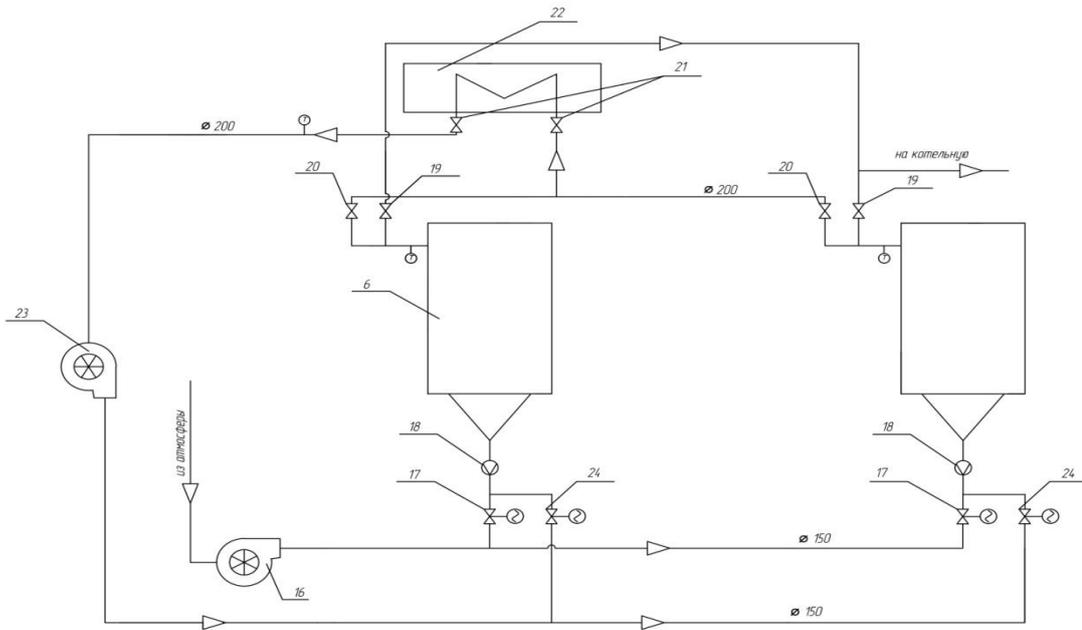


Рисунок 4.5 – Технологическая схема газовоздушной линии

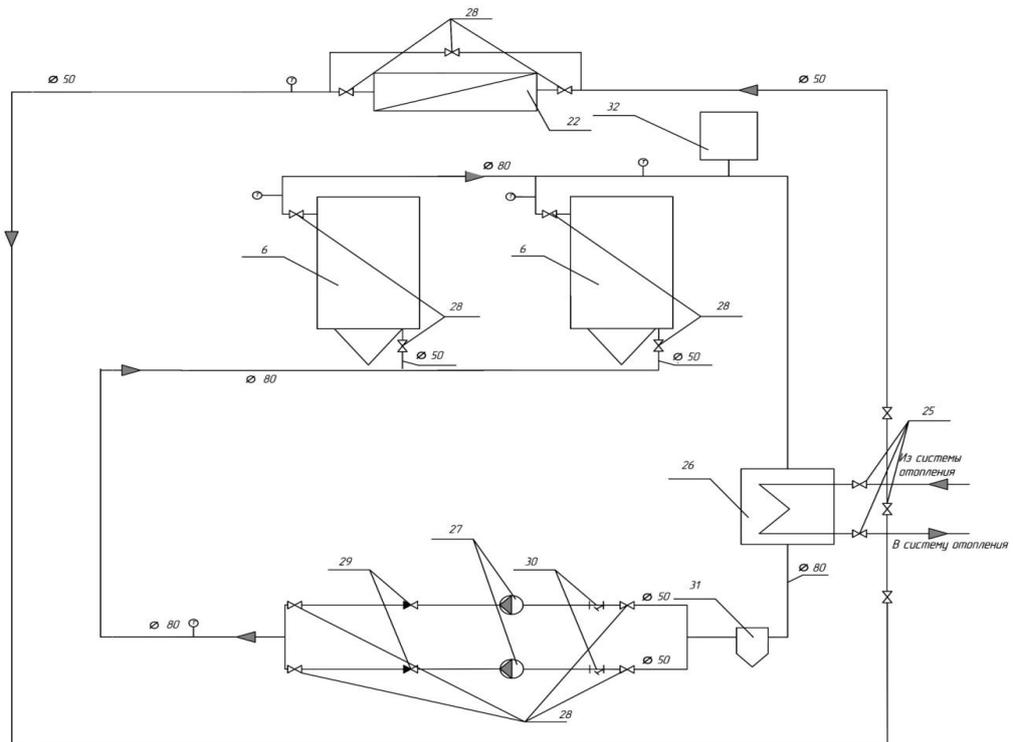


Рисунок 4.6 – Технологическая схема линии охлаждения газификаторов

Предварительно классифицированный уголь завозится полувагоном **1** в цех производства полукокса и разгружается из него грейферным ковшом **2** в

приемную емкость угля **3** (рисунок 4.4). Затем из приемной емкости уголь по мере необходимости загружается грейферным ковшом **2** в загрузочные бункера **4**. Для загрузки газификаторов грейферный ковш отсоединяется и подъемным краном **5** бункера выгружаются в газификатор **6**. По завершении в газификаторе процесса карбонизации и охлаждения полученный полукокс по цепочке транспортеров **7, 8, 9** поступает на грохот **10**, где рассеивается на классы крупности 0–10 мм и 10–40 мм. Класс крупности 10–40 мм транспортером **11** и плужковыми сбрасывателями **12** загружается в приемные бункера **13**. Класс крупности полукокса 0–10 мм ссыпается с грохота в приемный бункер **14**. Из приемных бункеров **13,14** полукокс по мере необходимости ленточным транспортером **15** загружается в автотранспорт и вывозится потребителю.

В процессе карбонизации воздух вентилятором **16** подается в газификаторы **6** (рисунок 4.5). Расход воздуха регулируется АСУТП затвором с электроприводом **17** и регистрируется расходомером **18**. Получаемый горючий газ через затворы **19** выводится в газоход и направляется в газовую котельную. При переводе газификатора в режим охлаждения полукокса сменным персоналом закрывается затвор **19**, открываются затворы **20, 21** и включается воздуходувка **23**. При этом газ проходит через теплообменник **22**, охлаждаясь в нем, и снова поступает в газификатор, нагреваясь в слое полукокса и охлаждая его. Расход газа регулируется АСУТП затвором с электроприводом **24** и регистрируется расходомером **18**.

Для охлаждения рубашек газификаторов и теплообменников систем охлаждения используется обратная вода системы отопления промышленной площадки с температурой не более 50°C. Эта вода через шаровые краны **25** (рисунок 4.6) поступает в теплообменник **26**, где нагревается до температуры 80°C и отдается в теплосеть. В системе охлаждения рубашек газификаторов вода перекачивается насосом **27**. Один из насосов является рабочим, второй – резервным. В насосную группу каждого насоса входят задвижки **28**, обратные клапаны **29**, фильтры грубой очистки **30**. На входе в насосную группу также установлен грязевик **31**. Нагретая до 90°C в рубашках газификаторов вода

поступает в теплообменник 26, где охлаждается до 70°C. Обратная вода системы охлаждения также циркулирует через газовой теплообменник 22, охлаждая генераторный газ в процессе охлаждения полукокса. Теплообменник 22 отсекается от системы отопления задвижками 28.

На схеме отсутствует стадия брикетирования. Благодаря достижению высокой прочности куска полукокса удалось избежать этой стадии.

4.4 Технические показатели производства

Выполнен расчет технических показателей производства 50000 тонн полукокса (бездымного топлива) в год с попутной генерацией тепловой энергии.

На участке газификации планируется установка 40 слоевых газификаторов по предложенной ранее технологической схеме № 3 (сечение 4х2 м, высота 3 м, объем загрузки 24 м³ (~16 т угля)).

Ниже в таблицах 4.1 и 4.2 приведен материальный и тепловой балансы процесса карбонизации угля марки ЗБ в слоевом газификаторе (расчет выполнен на 1 тонну угля).

Таблица 4.1 – Материальный баланс процесса карбонизации угля марки ЗБ в слоевом газификаторе

Наименование статей прихода и расхода	тонн	нм ³
Приход		
Уголь марки ЗБ	1	–
Воздух	0,11	86
Итого	1,11	86
Расход		
Полукокс	0,56	–
Горючий газ	0,55	524
Итого	1,11	524

Таблица 4.2 – Тепловой баланс процесса карбонизации угля марки ЗБ в слоевом газификаторе

Наименование статей прихода и расхода	ГДж	%
Приход		
Теплота сгорания угля ($Q_i^r = 21,1$ МДж/кг)	21,1	100
Расход		
Теплота сгорания полукокса ($0,56 \times 29,5$ МДж/кг)	16,6	78,7
Теплота сгорания газа ($524 \text{ нм}^3 \times 2,55$ МДж/нм ³)	1,4	6,6
Энтальпия полукокса	0,2	0,9
Энтальпия газа	0,5	2,4
Энтальпия на нагрев водяной рубашки газификатора	1,1	5,2
Теплопотери	1,3	6,2
Итого	21,1	100
Тепловой КПД процесса карбонизации, %	93,8	

На рисунке 4.7 приведена схема материальных потоков производства 50000 тонн полукокса (бездымного топлива) в год.

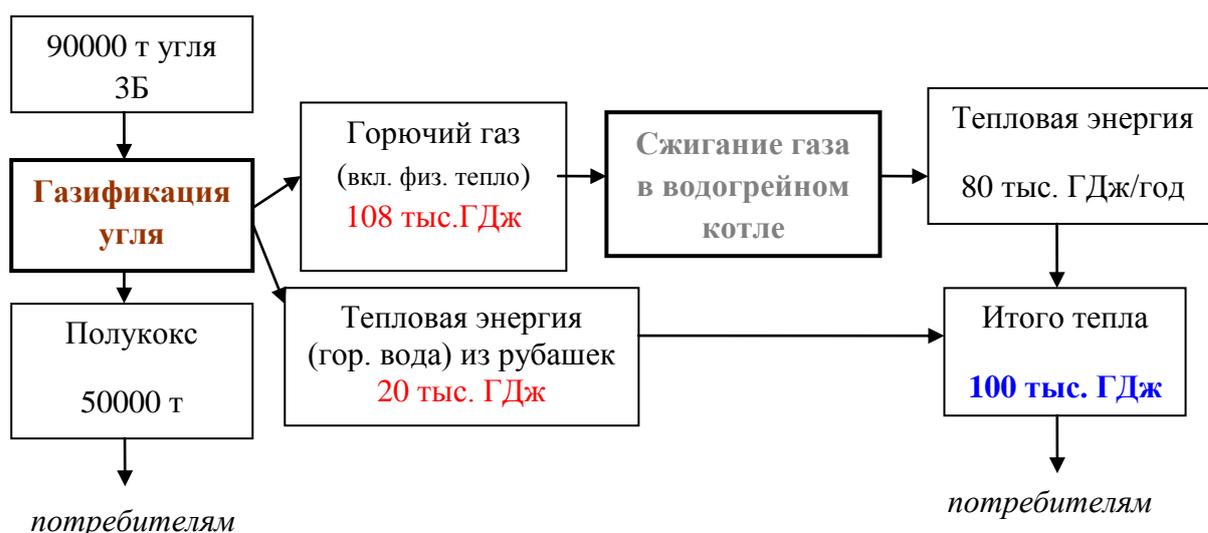


Рисунок 4.7 – Схема материальных потоков при производстве полукокса на предприятии мощностью 50000 т/год

В таблице 4.3 приведены основные показатели технологического процесса производства бездымного топлива. Полный расчет технико-экономических показателей с описанием представлен в технологическом регламенте (Приложение Г).

Таблица 4.3 – Основные показатели технологического процесса производства бездымного топлива

Параметр	Единица измерения	Величина
Максимальная температура в слое	°С	630
Максимальная скорость движения фронта газификации ("обратной тепловой волны")	м/ч	0,029
Удельный выход полукокса на 1 тонну исходного угля	т	0,56
Удельный выход газа на 1 тонну исходного угля	м ³	524
Продолжительность работы газификатора в номинальном режиме	ч	41
Продолжительность вывода газификатора в номинальный режим	ч	0,5
Продолжительность охлаждения полукокса	ч	5,0
Максимальная продолжительность загрузки и выгрузки газификатора	ч	2,0
Продолжительность полного цикла работы газификатора	ч	48,5

В таблице 4.4 приведены штаты цеха производства бездымного топлива.

Таблица 4.4 – Штаты цеха производства бездымного топлива

Наименование подразделений, должностей, профессий	Количество работающих				
	всего	в том числе, по сменам			
		1	2	3	4
<u>АУП и ИТР</u>					
Директор	1				
Главный инженер	1				
Начальник смены	4	1	1	1	1
Бухгалтер	2				
Сбытовик	2				
Итого ИТР	10				
<u>Рабочие</u>					
Оператор	8	2	2	2	2
Сменный слесарь-электрик	80	20	20	20	20
Крановщик	40	5	5	5	5
Итого рабочих	108	27	27	27	27

Общая численность персонала составляет 118 человек, учитывая режим круглосуточной работы предприятия. Основной персонал – 108 человек, административно-управленческий персонал (АУП) и инженерно-технические работники (ИТР) – 10 человек.

4.5 Экономические показатели производства

В данном разделе выполнен расчет экономических показателей производства.

В таблице 4.5 приведена укрупненная структура капитальных затрат на реализацию проекта.

Таблица 4.5 – Основные статьи капитальных затрат

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Оборудование	млн. руб.	220
Монтаж комплекса	млн. руб.	70
Разработка и экспертиза проектной документации	млн. руб.	25
Оборотные средства	млн. руб.	50
ИТОГО:	млн. руб.	365

Капитальные инвестиции на реализацию производства обгаороженного топлива включают в себя строительство здания цеха, склада угля, склада продукции, приобретение и монтаж технологического оборудования, пуско-наладочные работы и прочие расходы. Ориентировочная стоимость предприятия по переработке угольного сырья производительностью 50000 тонн полукокса в год составляет 365 млн. рублей. В эту сумму также входит разработка и экспертиза проектно-сметной документации. Основная доля инвестируемых средств приходится на приобретение оборудования, в частности газификаторов (150 млн. руб.). Затраты на монтаж комплекса включают подготовку площадки, подведение коммуникаций, монтаж сооружений. В качестве здания для размещения производственного цеха, склада угля и склада готовой продукции могут быть использованы ангары быстровозводимого типа. Преимущество такого выбора заключается в низкой цене и высокой скорости постройки данного объекта.

В расчетах использованы следующие исходные данные в виде цен и тарифов по состоянию на 01.02.2016 г.:

– уголь марки ЗБ	– 500 руб./т;
– доставка угля	– 100 руб.т;
– бездымное топливо	– 7500 руб./т;
– электроэнергия	– 2,5 руб./кВт·ч;
– тепловая энергия	– 300 руб./ГДж.

Цена рядового угля марки ЗБ по состоянию на 01.02.2016 составляет 385 рублей за тонну, однако в расчетах используется цена 500 руб./т – это цена уже фракционированного угля класса крупности 15–40 мм (по данным угольной компании «Сибуголь») [102]. Цена бездымного топлива на складе предприятия составляет 7500 рублей за тонну (основываясь на мировых ценах на бездымное топливо [103] по состоянию на 01.02.2016).

В таблице 4.6 представлен расчет производства и реализации готовой продукции.

Таблица 4.6 – Производство и реализация продукции

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Производство и реализация в натуральном выражении		
Производство полукокса	т/год	50000
Производство тепловой энергии	ГДж/год	100000
Цена реализации за единицу продукции		
Производство полукокса	руб./т	7500
Производство тепловой энергии	руб./ГДж	300
Объем реализации в стоимостном выражении		
Производство полукокса	тыс. руб./год	375000
Производство тепловой энергии	тыс. руб./год	30000
ИТОГО:	тыс. руб./год	405000

В таблице 4.7 приведен расчет годовых эксплуатационных затрат в текущих ценах.

Таблица 4.7 – Сводная таблица годовых эксплуатационных затрат в ценах и тарифах на 01.02.2016

Наименование статей затрат	Единица измерения	Цена за единицу, руб. или норма, %	Годовые затраты	
			количество	сумма, тыс. руб.
<i>Материальные расходы</i>				
уголь 3Б (с доставкой)	т	600	90000	54000
электроэнергия на технологические нужды	кВт	2,50	1000000	2500
вода на подпитку	м ³	40	50000	2000
<i>Итого материальные расходы</i>				<i>58500</i>
<i>Расходы на оплату труда</i>				
АУП и ИТР		<i>65000</i>	<i>10</i>	<i>7800</i>
Рабочие		<i>27000</i>	<i>108</i>	<i>34992</i>
<i>Социальные отчисления</i>	<i>тыс. руб.</i>	<i>30,2%</i>		<i>13000</i>
<i>Амортизация, в том числе</i>				
здания и сооружения	тыс. руб.	2,0%	50 000	1000
оборудование	тыс. руб.	6,6%	200 000	13200
<i>Итого амортизационных отчислений</i>				<i>14200</i>
Полная себестоимость производства				128492

В таблице 4.8 приведены основные показатели эффективности инвестиций в проект при цене сбыта продукции 7500 руб./т.

Таблица 4.8 – Основные показатели экономической эффективности инвестиций

Показатели	Единица измерения	Значение
Продолжительность инвестиционной стадии проекта	мес.	24
Период расчета	лет	10
Чистый дисконтированный доход (NPV)	тыс.руб.	690 362
Внутренняя норма доходности (IRR), в год	%	47
Ставка дисконтирования, в год	%	11
Срок окупаемости без учета дисконтирования (PB)		45
Дисконтированный срок окупаемости (DPP):		
- с начала инвестирования	мес.	50
- с начала эксплуатации	мес.	26
Модифицированная норма доходности (MIRR)	%	25
Индекс доходности инвестиций (PI)		2,83
Общий объем инвестиций	млн. руб.	365

Проведен расчет показателей экономической эффективности на период 10 лет. При цене бездымного топлива 7500 руб./т срок окупаемости проекта составляет 26 месяцев после запуска или 50 месяцев после начала инвестирования.

Оптовая цена бездымного топлива, представленного в настоящее время на мировом рынке, составляет от 220 до 600\$/т. Учитывая себестоимость производства бездымного топлива по данному процессу (2000–2600 руб./т), а также дефицитность и постоянно растущий спрос, эффективность разработанного технологического процесса очевидна.

4.6 Краткие выводы

В рамках диссертационной работы выполнен расчет технических и экономических показателей производства для энерготехнологической переработки бурого угля с получением высококалорийного углеродного материала и одновременным производством тепловой энергии. На основании выполненного расчета сформулированы выводы об экономической целесообразности внедрения технологического процесса, который заключается в переработке угля марки ЗБ с помощью слоевых газификаторов в высококалорийное бездымное топливо.

По результатам главы можно сделать следующие заключения:

1. Разработано решение по конструкторскому оформлению газификаторов, направленное на повышение удельной производительности.
2. Разработана технологическая схема производства высококалорийного топлива.
3. Рассчитаны технические показатели производства.
4. Рассчитаны экономические показатели производства.
5. Разработан технологический регламент производства.

Таким образом, предложена и экономически обоснована технологическая схема производства, реализующая процесс автотермической переработки углей низкой степени метаморфизма в слоевом аппарате с получением высококалорийного кускового карбонизата.

Капитальные затраты в предприятие мощностью 50000 т/год по конечному продукту составляют 365 млн. руб., годовые эксплуатационные затраты – 128,5 млн.руб., доход от реализации продукции 405 млн. руб. Срок окупаемости проекта составляет 4,2 года от начала инвестирования или 2,2 года от начала эксплуатации при цене реализации продукта 7500 руб./т.

Оптовая цена бездымного топлива, представленного в настоящее время на мировом рынке, составляет от 220 до 600\$/т. Учитывая себестоимость производства бездымного топлива по данному процессу (2000–2600 руб./т), а

также дефицитность и постоянно растущий спрос, эффективность разработанного технологического процесса очевидна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены вопросы технической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ для получения высококалорийного твердого топлива повышенной прочности. Такой продукт находит применение в качестве бездымного коммунально-бытового топлива.

В результате выполненного обзора современного состояния проблемы переработки молодых углей, была сформулирована цель и поставлены задачи исследования для её достижения. Для проведения исследования на частицах угля создана экспериментальная установка и разработана методика проведения экспериментов. В результате экспериментального исследования были выявлены основные управляющие параметры процесса, критические температурные уровни для сушки и карбонизации, была получена информация по влиянию различных температурных уровней и скоростей нагрева на прочностные характеристики частицы угля. По итогам экспериментов получен высококалорийный полукокс из углей марки ЗБ и Д с теплотой сгорания свыше 27,2 МДж/кг (6500 ккал/кг) с высокими прочностными показателями, удовлетворяющими условиям хранения и транспортировки.

На основе вышеописанных результатов обоснована конструкция установки для переработки угольного сырья в промышленных масштабах. В качестве основного перерабатывающего аппарата выбран слоевой газификатор с обращенным воздушным дутьем. Предложен вариант переработки с использованием пульсирующего режима подачи воздуха. Проведено экспериментальное исследование в результате которого найдены режимы переработки, обеспечивающие высокую прочность получаемого полукокса, для углей: ЗБ (разрез Большесырский, Красноярский край, ООО «Сибуголь»), Д (разрез Моховский, Кемеровская область, ОАО «Угольная компания Кузбассразрезуголь») и Д (разрез Караканский, Кемеровская область,

ООО «Каракан-Инвест»). Подана заявка на изобретение (заявка на пат. 2015143182 от 09.10.2015).

По итогам экспериментов на слоевом газификаторе с пульсирующим обращенным воздушным дутьем, выполнена технико-экономическая оценка организации углеперерабатывающего производства на территории одного из разрезов Красноярского края.

Сформулированы основные результаты работы и выводы.

1. На основании анализа современных технологий переработки угля, направленных на получение высококалорийного твердого топлива, определена перспективность термической переработки углей с высоким содержанием летучих веществ с возможностью комбинированного производства энергоносителей исключаяющей стадию брикетирования конечного продукта и обеспечивающей экологическую безопасность производства.

2. В результате экспериментальных исследований процесса нагрева одиночных частиц бурого и длиннопламенного (каменного) углей установлены и количественно определены основные управляющие параметры процесса карбонизации (скорость нагрева, максимальная температура греющей среды), изучено их влияние на показатели процесса карбонизации и прочностные характеристики получаемого полукокса. Показано, что достаточно прочный полукокс (прочность по ГОСТ 21289-75 не менее 8 МПа) получается при соблюдении скорости нагрева не более 0,056 град/с.

3. Впервые обнаружен эффект «восстановления прочности» в области температур 400–500°C. Предположительно, упрочнение происходит за счет коксования части высокомолекулярной органики (смол), образующейся на заключительной стадии пиролиза органической части угля.

4. На основе результатов исследований, полученных на одиночных частицах угля, обоснована конструкция установки для нового процесса производства полукокса. На данной установке экспериментально определены основные технологические параметры процесса карбонизации угля: расход воздуха,

продолжительность периода подачи и останова дутья, которые обеспечивают приемлемую для практики прочность полукокса.

5. Разработан новый технологический процесс переработки бурого и длиннопламенного (каменного) углей в высококалорийный полукокс на основе частичной газификации в слое с пульсирующим обращенным дутьем.

6. Разработаны технологическая схема и технологический регламент производства, реализующие процесс автотермической переработки углей низкой степени метаморфизма в слоевом аппарате с получением высококалорийного бездымного топлива. Технологический регламент производства принят для использования при проектировании углеперерабатывающих предприятий: компанией ООО «Сибуголь» (г. Красноярск), проектным институтом СибНИИУглеобогащение (АО «СУЭК»), ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Угольная промышленность России в XXI веке [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=272
2. Проект энергетической стратегии России на период до 2035 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://minenergo.gov.ru/press/min_news/3344.html.
3. Минэнерго доработало энергостратегию до 2035 [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<https://www.vedomosti.ru/business/articles/2015/08/28/606622-minenergo-dorabotalo-energostrategiyu-do-2035-g>
4. Кулеш, М. В. Исследование возможности производства из углей марки ЗБ и Д высококалорийного топлива с низким содержанием летучих / М.В. Кулеш, С.Р. Исламов // Кокс и химия. – 2012. – № 8. – С. 12-14.
5. Исламов, С.Р. Энерготехнологическая переработка углей: монография / Исламов С.Р. – Красноярск: «Поликор», 2010. – 224 с.
6. Кузнецов, Б.Н. Новые подходы в химической переработке ископаемых углей / Б.Н Кузнецов // Химия в интересах устойчивого развития. – 1996. – №4. – С. 423.
7. Комплексное использование углей Канско-Ачинского бассейна: Межвузовский сборник научных трудов / Отв. ред. А.М. Кутепов. – Ленинград: Изд-во ЛТИ им. Ленсовета, 1990. – 137 с.

8. Буткин, В.Д. Проблемы переработки и комплексного использования канско-ачинских углей [Электронный ресурс] /В.Д.Буткин. – Горная промышленность. – 2001. – №1. – Режим доступа:

<http://www.mining-media.ru/ru/article/obogach/1907-problemy-pererabotki-i-kompleksnogo-ispolzovaniya-kansko-achinskikh-uglej>.

9. Исламов, С. Р. Частичная газификация бурого угля в слое с пульсирующим обращенным дутьем / С.Р. Исламов, М.В. Кулеш// Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 2–5.

10. Маковецкий, П.Ц. Бурые угли и продукты их термического разложения / П.С. Маковецкий. – Киев: Наукова думка, 1964. – 180 с.

11. Газ как конкурентное преимущество / Сибирский уголь в XXI веке. – 2008. – № 5 (9). – С. 26.

12. Школлер, М.Б. Полукоксование каменных и бурых углей / М.Б. Школлер. – Новокузнецк: Инженерная академия России, Кузбасский филиал, 2001. – 232 с.

13. Грязнов, Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования / Н.С. Грязнов. – Москва: Metallurgy, 1983. – 184 с.

14. Ketchum, R. et al Low temperature carbonization of Utah Coals [Электронный ресурс] // A Report of Utah Conservation & Research Foundation to the Governor & State Legislature (may 1939). Режим доступа: <http://www.rexresearch.com/ketchum/1ltcre.htm>.

15. OVERVIEW of LOW TEMPERATURE CARBONISATION, ISFTA – May 2004.

16. Тау, А. Полукоксование углей. Пер. М.К. Письмена. – Москва: Гостоптехиздат, 1948. – 212 с.

17. Сысков, К.И. Термоокислительное коксование углей / К.И. Сысков, О.Н. Мощенков, – Москва: Metallurgy, 1973. – 176 с.

18. Хоффман, Е. Энерготехнологическое использование угля / Е. Хоффман, – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.

19. Химические вещества из угля / Пер. с нем. под ред. И.В. Калечица, – Москва: Химия, 1980. – 616 с.
20. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твёрдого топлива / Б.В. Канторович, – Москва: Издательство АН СССР, 1958. – 599 с.
21. Исламов, С.Р. Энерготехнологическое использование угля на основе процесса слоевой газификации «ТЕРМОКОКС-С» / С.Р. Исламов, И.О. Михалёв // Промышленная энергетика. – 2009. – № 10. – С. 2.
22. Степанов, С.Г. Промышленные технологии переработки угля: перспективы использования в Канско-Ачинском угольном бассейне: монография / С.Г. Степанов. – Красноярск: Изд-во Красноярского государственного университета, – 2002. – 85 с.
23. Степанов, С.Г. Разработка автотермических технологий переработки угля: дис. д-ра техн. наук: 05.04.14 / Степанов Сергей Григорьевич. – Красноярск, 2003. – 389 с.
24. Липович, В.Г. Химия и переработка угля / В.Г. Липович, Г.А. Калабин, И.В. Калечиц. – Москва: Химия, 1988 г. – 336 с.
25. Гаврилов, Ю.В. Переработка твердых природных энергоносителей: учебное пособие/ Гаврилов, Ю.В., Королева Н.В., Спицин С.А.. – Москва: РХТУ им Д.И.Менделеева, 2001. – 160 с.
26. Miura, K. Mild conversion of coal for producing valuable chemicals / K. Miura // Fuel Processing Technology. – 2000. – Vol. 62, № 2. – P. 119.
27. Knudson, C. Oxidized coal provide filter material / C. Knudson // Coal and Synfuels Technology. 1994. – Vol. 15, № 26. – P. 1.
28. Mulcahy, M.F.R. Kinetics of combustion of pulverized coal: a review of theory and experiment / M.F.R. Mulcahy, I.W. Smith // Review Pure and Application Chemistry. 1969. –Vol. 19, № 1.– P. 81.
29. Swithenbank, J. Future integrated waste, energy and pollution management (WEP) systems exploit pyrotechnology / J. Swithenbank, V. Nasserzadeh, A. Wasantakorn et al. // Process Safety and Environmental Protection. – 2000. – Vol. 78, No 5. – P. 383.

30. ENCOAL Mild Gasification Plant Commercial Plant Feasibility Study. U.S. Department of Energy. September 1997. Report No. DOE/MC/27339 (Available from NTIS as DE98002005).

31. “Final Design Modifications Report.” U.S. Department of Energy. September 1997. Report No. DOE/MC/27339-5797 (Available from NTIS as DE98002006).

32. “ENCOAL Mild Gasification Project: ENCOAL Project Final Report.” Report No. DOE/ MC/27339-5798. U.S. Department of Energy. September 1997 (Available from NTIS as DE98002007).

33. Johnson, S.A., and Knottnerus, B.A. “Results of the PDF™ Test Burn at Clifty Creek Station.” U.S. Department of Energy Topical Report. October 1996. • “Clean Coal Reference Plant: Pulverized ENCOAL PDF Fired Boiler.” Gilbert Commonwealth, Inc. G/C Report No. 3010. U.S. Department of Energy, Morgantown, WV. December 1995.

34. The ENCOAL Project: Initial Commercial Shipment and Utilization of Both Solid and Liquid Products; Topical Report. Report No. DOE/MC/27339-4088. ENCOAL Corporation. March 1995 (Available from NTIS as DE95009735).

35. ENCOAL Mild Coal Gasification Demonstration Project Public Design and Construction Report. Report No. DOE/MC/27339-4065. ENCOAL Corporation. December 1994 (Available from NTIS as DE95009711).

36. Тайц, Е.М. Получение окускованного бездымного топлива и кокса / Е.М. Тайц, Б.М. Равич, Е.А. Андреева. – Москва: Недра, 1971. – 120 с.

37. 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 // Кокс и химия. – 2007. – № 5. – С. 17.

38. The First Industrial Scale, Commercially Operating Coal Upgrading Plant in the World [Электронный ресурс] Режим доступа:

http://gbce.com/en/projects_yield.php.

39. The LiMax™ Coal Process Technology (“LCP”) [Электронный ресурс] Режим доступа: http://gbce.com/en/technology_process.php.

40. Кулеш М.В. Краткий обзор современных зарубежных технологий переработки угля: сборник трудов Международной заочной научно-практической конференции "Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития". – 2015. – 170 с.

41. [Электронный ресурс] Режим доступа:

http://geocoal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=84.

42. [Электронный ресурс] Режим доступа:

http://geocoal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=59.

43. BCB COAL UPGRADING PRESENTATION June 2007.

44. BCB Test Report - SUEK 08.10.09

45. Wright, J.K. The magnitude of the scale of gas separation operations needed to achieve near zero emissions power from coal. In: Separations Technology VI: New Perspectives on Very Large-Scale Operations, Brooklyn, N.Y.: Engineering Conferences International. – 2004. – P. 6.

46. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.whiteenergyco.com/>.

47. Clark, K. BCB COAL UPGRADING A REVOLUTION IN COAL PREPARATION. Keith Clark White Energy Company Limited. Coal trans Asia Conference, 3-6 June 2007.

48. Балмасов, Н.Н. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. / Н.Н. Балмасов, В.К. Бранчугов, В.С. Быкадоров; под общ. ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – Москва: изд. Московского государственного горного университета, 1999. – 648 с. – 1 т.

49. Страхов, В.М. Буроугольный полукокс. Возможности его использования как топлива в агломерации железных руд / В.М. Страхов, И.И. Суровцева, В.А. Долинский // Кокс и химия. – 2007. – № 8. – С. 20 - 26.

50. Мизин, В.Г. Углеродистые восстановители для ферросплавов / В.Г. Мизин, Г.В. Серов. – Москва: Metallurgy, 1976. – 272 с.

51. Страхов, В.М. Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств / В.М. Страхов // Кокс и химия. – 2008. – № 9. С. 44.

52. Страхов, В.М. Технология производства кокса из углей Шубаркольского разреза. Оценка его качества как углеродистого восстановителя для выплавки ферро сплавов / В.М. Страхов, Б.А. Святлов, Н.П. Головачев // Кокс и химия. – 2004. – № 10. – С. 16.

53. Глезин, И.Л. Полукоксование длиннопламенных углей Шубаркольского месторождения в газогенераторах / И.Л. Глезин, А.Г. Шампаров, В.М. Страхов // Кокс и химия. – 2009. – № 8. – С. 25.

54. Школлер, М.Б. БПК - модификатор свойств кокса и угольных смесей / М.Б. Школлер // Кокс и химия. – 2007. – № 12. – С. 18.

55. [Электронный ресурс] Режим доступа:
http://xn--b1alfnfaapik.xn--p1ai/sites/default/files/file/B/B-4/B-4-10/M/2_1_otchet_tech_mark.doc.

56. Гаврилов, А.Ф. Энергетика на базе новых технологий использования низкосортных топлив [Электронный ресурс] / А.Ф. Гаврилов // ЭНИН им. Кржижановского, Москва: – Режим доступа: www.mtu-net.ru.

57. Андрющенко, А.И. Основы проектирования энерготехнологических установок электростанций: учебное пособие для студентов теплоэнергетических спец. вузов / А.И. Андрющенко, А.И. Попов. – Москва: Высшая школа, 1980. – 240 с.

58. Турчин, Н.Я. Инженерное оборудование тепловых электростанций и монтажные работы / Н.Я. Турчин. – Москва: Высшая школа. – 1979. – 416 с.

59. Критерии и принципиальная схема использования твердых продуктов Канско-Ачинских углей с испытанием опытных образцов : отчёт о НИР / Москва: ЭНИН, 1977. – 64 с.

60. Установка ЭТХ-175: состояние и перспективы освоения: сборник научных трудов «Новые способы использования низкосортных топлив в энергетике» / В.А. Карасев, Т.А. Сидякова. – Москва: ЭНИН, 1989. – С. 92.

61. Аникин, А.Е. Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канского-Ачинского бассейна: производство, свойства, применение / А.Е.

Аникин, Г.В. Галевский // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – № 3. – С. 52.

62. [Электронный ресурс] Режим доступа:

<http://www.ngpedia.ru/id255649p4.html>.

63. Некрич, М.И. Общая химическая технология / М.И. Некрич, М.П. Ковалев, Ю.И. Черняева. – Харьков: Изд-во Харьковского Университета, 1969. – 336 с.

64. Новик, Г.Я. Получение кусковых углеродистых восстановителей в печи вертикального типа / Г.Я. Новик, И.М. Борисова // Межвузовский сборник научных трудов: «Комплексное использование углей Канско-Ачинского бассейна». – 1990. – 137 с.

65. Пат. 2014882 РФ. МКИ В01 J20/20, С01 В31/08. Способ получения адсорбента / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов, В.С. Славин (РФ) // № 92004035/26; Заявл. 11.11.92; Оpubл. 30.06.94, Бюл. 12.

66. Пат. 2014883 РФ. МКИ В01 J20/20. Способ получения углеродного адсорбента / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов (РФ) // № 93039409/26; Заявл. 16.08.93; Оpubл. 30.06.94, Бюл. 12.

67. Исламов, С.Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «ТЕРМОКОКС»: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.04.14 / Исламов Сергей Романович. – Красноярск, 2010. – 37 с.

68. Исламов, С.Р. Степанов С.Г. Глубокая переработка угля: введение в проблему выбора технологии / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов // Уголь. – 2007. – № 10. – С. 55.

69. Исламов, С. Р. Экономический кризис как побуждение к глубокой переработке угля / С.Р. Исламов // Уголь. – 2013. – № 2. – С. 46.

70. Исламов, С.Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо / С.Р. Исламов // Уголь. – 2012. – № 3. – С. 64.

71. Исламов, С.Р. О новой концепции использования угля // Уголь. – 2007. № 5. – С. 67.

72. Гринько, Н.К. Использование чистых угольных технологий в России // Уголь. 2006. № 1. С. 6 - 8. 25.

73. Исламов, С.Р. Переработка бурого угля по схеме энерготехнологического кластера / С.Р. Исламов // Уголь. – 2009. – № 3. – С. 65.

74. Пат. 2359006 РФ. МПК С10В 49/10 Способ переработки угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов (РФ). – № 2008117266; Заявлено 05.05.2008; Оpubл. 20.06.2009, Бюл. 17.

75. Евразийский патент 007801. МПК С10В 49/10 Способ получения металлургического среднетемпературного кокса / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов (РФ). – № 200801917; Заявлено 25.10.2005; Оpubл. 27.02.2007; Бюл. ЕАПО 1.

76. Михалев, И.О Энерготехнологическое производство на основе частичной газификации углей низкой степени метаморфизма: сборник научных трудов VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН / И.О. Михалев, С.Р. Исламов // Новосибирск: Изд-во Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. – 215 с.

77. [Электронный ресурс] Режим доступа:

<http://www.carbonica.ru/technologia.html>.

78. Евразийский патент 007798. МПК С10В 49/10 Способ слоевой газификации угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов (РФ). – № 200801920; Заявлено 25.10.2005; Оpubл. 27.02.2007, Бюл. ЕАПО 1.

79. Евразийский патент 008111 МПК С10В 47/04, С10В 53/08, С10J 3/20 Устройство для переработки твердого топлива / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов (РФ). – № 200501921; Заявлено 25.10.2005; Оpubл. 27.04.2007, Бюл. ЕАПО 2.

80. Пат. 2345116 РФ. МПК С10В 57/00, С10J 3.02 Способ получения кокса и синтез-газа при переработке угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, И.О. Михалев (РФ). – № 2007131530; Заявлено 21.08.2007; Оpubл. 27.01.2009, Бюл. 3.

81. Степанов, С.Г. Экологическая оценка энерготехнологического использования угля / С.Г. Степанов, А.Б. Морозов, А.А. Гроо // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. научных трудов Красноярской государственной академии цветных металлов и золота. – 2003. – С. 186.

82. Михалев, И.О. О способах повышения экологической безопасности использования углеводородных топлив / И.О. Михалев // 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 // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности. – 2009. – Т. 14, № 6. – С. 185–189.

84. Степанов, С.Г. Технология совмещенного производства полукокса и горючего газа из угля / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов, А.Б. Морозов // Уголь. – 2002. – № 6. – С. 27-29.

85. Пат. 2288937 РФ. МПК С10В 47/04, С10В 53/08, С10J 3/20 Способ получения металлургического среднетемпературного кокса / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов (РФ) // № 2005132548; Заявл. 24.10.2005; Оpubл. 10.12.2006, Бюл. 34.

86. Пат. 2287011 РФ. МКИ С10J 3/68 Способ слоевой газификации угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, А.Б. Морозов (РФ) // № 2005124137/04; Заявлено 29.07.2005; Оpubл. 10.11.2006, Бюл. 31.

87. Гроо, А.А, Интенсификация процессов теплообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья / А.А. Гроо, Д.А. Логинов // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всероссийская конференция – ИТ СО РАН, 2006. – Ч. 3. – С. 29–35.

88. Гроо, А.А, Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации с обратным дутьем / А.А. Гроо, Д.А. Логинов // XVI Школа-семинар молодых ученых и специалистов "Проблемы газодинамики и

тепломассообмена в энергетических установках": Сборник докладов. – 2007. – С. 395.

89. Грязнов, Н.С. Основы теории коксования / Н.С. Грязнов. – Москва: Metallургия, – 1976. – 312 с.

90. Тайц, Е.М. Окускованное топливо и адсорбенты на основе бурых углей / Е.М. Тайц, И.А. Андреева, Л.И. Антонова. Москва: Недра, 1985. – 160 с.

91. Краткая химическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. И. Л. Кнунянца. Москва: Советская энциклопедия, – 1964. – 1112 с. – 3 т.

92. Маковецкий, П.С. Паливовикористання / П.С. Маковецкий, АН УРСР: Вид-во АН УРСР, – 1960. – 93 с.

93. Грязнов, Н.С. / Н.С. Грязнов, А.Н. Решетко, Н.К. Ермолаева. Химия твердого топлива. – 1968. – № 5. – С. 33.

94. Бочкарева К.И. / К.И. Бочкарева, И.А. Матасова, Б.К. Тюнюков. – Химия твердого топлива. – 1973. – №3. – С. 3.

95. Van Krevelen D.W. Coal. / Van Krevelen D.W. – Amsterdam: Elsevier publication Company – 1961. – 514 p.

96. Агроскин, А.А. Физика угля / А.А. Агроскин. – Москва: Недра, – 1964. – 352 с.

97. ГОСТ 21289–75 Брикетты угольные. Метод определения прочности. – Москва: Издательство стандартов, 1986. – 6 с.

98. ГОСТ Р 52917–2008 Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. Москва: Стандартинформ, 2008. – 10 с.

99. ГОСТ Р 55660–2013 Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. Москва: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

100. ГОСТ Р 55661-2013 Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. Москва: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

101. ГОСТ 10742–71 Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикетты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 19 с.

102. [Электронный ресурс] Режим доступа:
<http://www.sibugol.com/index.php/ru/ugol/tseny-na-ugol>.
103. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://coalex.ru>.

Приложение А

Экспериментальное оборудование

Таблица А.1 – Список экспериментального оборудования

Прибор	Функция
Лабораторная печь СНОЛ 10/10	Термообработка образцов угля
Лабораторные весы CASBEE MW-1200	Взвешивание образцов угля во время термообработки
Грохот КП-109/2	Рассевка готового полукокса после термообработки в газификаторе
Щековая дробилка ДГ 100x200	Измельчение и подготовка угля нужной фракции для термообработки в слоевом газификаторе
Анализатор влажности термогравиметрический A&D MX-50	Определение влажности образцов
Лабораторные весы A&D GR-120	Взвешивание образцов (для определения технических характеристик образцов)
Товарные весы МИДЛ МП 150 ВДА Ф-2 (50;600x800) "Гулливвер 12"	Взвешивание угля перед загрузкой в слоевой газификатор
Газоанализатор ГАММА-100	Определение состава газа
Компрессор КП-12	Подача воздуха
Лабораторная печь СНОЛ 7,2/1200	Для определения технических характеристик образцов
Опытно-промышленный слоевой газификатор	Для проведения испытаний угля

Таблица А.2 – Дополнительное оборудование, использованное в экспериментах

Оборудование	Функция
Ротаметр РМФ ГУЗ – 16	Замер расхода воздуха
Термопара ТХА-9425-08	Замер температуры в реакторе газификатора
Аналого-цифровой преобразователь ADAM-4018 с преобразователем интерфейса ADAM-4520	Преобразование сигналов термопар
Компьютер	Обработка и отображение информации с измерительного оборудования

Таблица А.3 – Технические характеристики печи СНОЛ 10/10

Мощность, кВт	4
Диапазон температур	0-1100
Размеры рабочей камеры, мм	
ширина	200
длина	300
высота	180
Габаритные размеры, мм	
ширина	470
длина	620
высота	595
Масса, кг	50

Таблица А.4 – Характеристики лабораторных весов CASBEE MW-1200

Основные функции и технические характеристики	
Масса	1,25 кг
Наибольший предел взвешивания (НПВ)	1200 г
Дискретность	0,1 г
Размер грузоприемной платформы	Ø150
Диапазон рабочих температур	от 5 до 35°C
Питание	от сети переменного тока 110 ~ 240 В, 49 ~ 51 Гц
Дополнительные функции и технические характеристики	
Тип измерения	тензометрический
Число разрядов индикатора	6
Габаритные размеры (ШхДхВ)	180x233x85 мм
Наименьший предел взвешивания НмПВ	5 г
Тип дисплея	светодиодный
Потребляемая мощность	0,25 Вт
Выборка массы тары	до 0,999 кг
Материал весоприемной платформы	нержавеющая сталь

Таблица А.5 – Технические характеристики прессы ИП-100

Параметры	Значение
Наибольшая предельная нагрузка, кН	100
Диапазоны измерения нагрузки, кН - основной - дополнительный	2 - 100 1 - 2
Цена единицы наименьшего разряда поддиапазоном, кН	0,01
Пределы допускаемой погрешности измерения нагрузки, % - в основном диапазоне от измеряемой нагрузки - в дополнительном диапазоне от верхнего предела измеряемой нагрузки	± 1 ± 2
Предел допускаемой погрешности поддержания скорости нагружения начиная с 0,2 наибольшей предельной нагрузки машины до разрушающей нагрузки образца, %	± 20
Высота рабочего пространства, мм	350
Ширина рабочего пространства, мм	230
Ход поршня рабочего цилиндра, мм	100
Наибольшая скорость перемещения поршня рабочего цилиндра вверх без нагрузки, мм/мин	600
Размер опорных плит, мм	210 x 210
Диапазон скоростей нагружения, кН	от 0,25 до 25
Емкость масляного бака, л	50
Габаритные размеры, не более, мм: -длина -ширина -высота	1000 605 1620
Параметры питания	380 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более, кВт	1,1
Масса, не более, кг	380

Таблица А.6 – Технические характеристики лабораторного грохота КП-109/2

Грузоподъемность, кг	до 100
Частота колебаний стола, кол./мин	3000
Амплитуда колебаний стола (регулируется вручную), мм	0,32...0,55
Амплитуда колебаний рабочего стола (первоначально установленная), мм	0,53
Масса подпружиненной плиты, кг	48
Привод-вибратор	ИВ-99 Б
Мощность привода, кВт	0,5
Питание, В/Гц	380/50
Регулировка времени работы	1 сек...10 мин
Габаритные размеры, мм (ДхШхВ)	750×500×450
Масса, кг, не менее	65

Таблица А.7 – Технические характеристики щековой дробилки ДГ 100х200

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	ДЩ 100х200
Размеры приемного отверстия, мм (ширина x длина)	100 x 200
Крупность исходного питания, мм, не более	90
Размер разгрузочной щели, мм	2...15
Крупность дробленого продукта, мм	5...20
Мощность двигателя, кВт	2,2
Производительность (в зависимости от свойств и крупности перерабатываемого материала), кг/ч, не более	300
Габаритные размеры, мм	
длина	860
ширина	500
высота	1300
Масса, кг	250

Таблица А.8 – Технические характеристики термогравиметрического анализатора влажности термогравиметрический A&D MX-50

Метод измерения	400 Вт направленная галогеновая лампа с фильтром SRA и технологией взвешивания SHS, термогравиметрический анализ
Диапазон веса образца	0,1... 51 г
Разрешение при определении веса	0,001 г
Разрешение при определении содержания влаги	0,01% / 0,1%
Воспроизводимость при определении содержания влаги	0,02% (образец > 5 г); 0,10% (образец > 1 г)
Диапазон температуры сушки на чашке для образца	50... 200°C с шагом 1 °C
Объем памяти программ измерения	20 программ
Количество результатов измерения в памяти	100
Программы измерения	стандартная, автоматическая, ускоренная, по таймеру, ручная
Способ измерения	влажная основа, сухая основа, твердое содержание, коэффициент
Диаметр чашки весов	85 мм
Питание	сеть (АС-адаптер)
Номер в Госреестре средств измерений	40496-09
Тип калибровки	внешняя
Калибровочный вес, г*	20 50
Условия эксплуатации	температура 10... 40°C; относительная влажность не более 85%
Габаритные размеры	215x320x173 мм
Масса	6 кг

Таблица А.9 – Технические характеристики лабораторных весов A&D GR-120

Тип:	Аналитические весы
Максимальный вес (НПВ):	120 г
Минимальный вес (НмПВ):	0,01 г
Дискретность (шаг измерения):	0,0001 г
Размер платформы:	85 мм
Калибровка:	встроенная
Класс точности	Специальный – ГОСТ 24104-01
Потребляемая мощность:	11 Вт
Функции и режимы:	быстрый режим, возможность подключения к РС (интерфейс RS-232), гидростатическое взвешивание, запись в память результатов взвешивания, процентный режим, счетный режим
Время стабилизации:	3,5 сек
Габариты:	249x330x327 мм
Масса весов:	6 кг

Таблица А.10 – Технические характеристики товарных весов МИДЛ МП 150 ВДА Ф-2 (50;600x800) "Гулливвер 12"

Производитель	МИДЛ, Россия
Наибольший предел взвешивания	150 кг
Наименьший предел взвешивания	1000 г
Точность	50 г
Предел выборки веса тары	50 кг
Класс точности	средний III
Тип дисплея	светодиодный
Количество разрядов индикатора	6
Интерфейс	RS-232
Источник питания	аккумулятор, сеть
Время работы от аккумулятора	80 ч
Диапазон рабочих температур	от -10°C до +40°C
Относительная влажность	до 85%
Размер платформы	600x800 мм
Вес	33 кг

Таблица А.11 – Технические характеристики газоанализатора ГАММА-100

Характеристики	Значения
Измеряемые газоанализатором ГАММА-100 компоненты	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄
Температура окружающей среды, °С	от +5 до +45
	от -40 до +45
Выходные сигналы	RS-232, RS-485, Ethernet, (0 - 5) или (4 - 20) мА, «сухие» контакты реле 250 В × 2,5 А, звуковая сигнализация
Параметры анализируемой газовой смеси:	
- температура, °С	от +5 до +45
- влага, не более, г/м ³	5
- пыль, не более, мг/м ³	1
Напряжение питания, В	220
Время прогрева газоанализатора, мин, не более	180
Степень защиты корпуса	IP20
	IP54
Габаритные размеры, мм	450×440×280
Масса ГАММА-100, не более, кг	20

Таблица А.12 – Технические характеристики компрессора К-12

Модель	К-12
Давление, атм	8
Объем ресивера, л	60
Производительность м ³ /мин	0,28/0,16
Мощность, кВт	2,2
Напряжение сети, В	380
Габариты ДхШхВ, см	100х47х80
Вес, кг	95

Таблица А.13 – Технические характеристики печи СНОЛ 7,2/1200

Мощность, кВт	4
Диапазон температур	0-1200
Размеры рабочей камеры, мм	
ширина	200
длина	300
высота	130
Габаритные размеры, мм	
ширина	570
длина	700
высота	600
Масса, кг	105



Рисунок А.1 – Внешний вид опытно-промышленного газификатора

Приложение Б

Протоколы испытаний

ЗАО «Сибирский ЭНТЦ»
Аккредитованная испытательная Топливная лаборатория

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 66А
тел./факс (3912) 44-92-80

Аттестат аккредитации
РОСС RU.0001.21ТУ50 от 30 июля 2010 г.
действителен до 30 июля 2015 г.

Протокол испытаний № 272 от «22» августа 2011 г. (на 1-ом листе)

Организация – заказчик	ООО «Энерготехнологические системы», договор 5-61.9/321 от 20.08.2009г.
Наименование образца	Проба, «НП-1»
Дата поступления образца	12.08.2011г.
Количество	
Код образца	Проба № 968

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Условия проведения испытаний: Т – 24°C, Р – 738мм.рт.ст., влажность 47,5%.

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	НД на метод испытания	Результаты испытаний образца (пробы)	Погрешность $\pm \Delta_x$
1	2	3	4	5
Влага общая, W^t	%	ГОСТ Р 52911-08	20.0	
Зола, сухое состояние, A^d	%	ГОСТ 11022-95	5.0	0,2
Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние, V^{daf}	%	ГОСТ 6382-91	45.9	1,8
Содержание серы, сухое состояние, S^d	%	ГОСТ 8606-93	0.33	0,06
Содержание водорода, сухое беззольное состояние, H^{daf}	%	ГОСТ 2408.1-95	5.2	0,15
Высшая теплота сгорания, сухое состояние, Q_s^d	ккал/кг	ГОСТ 147-95	6740	25
Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q_s^{daf}	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7090	25
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, Q_i^r	ккал/кг	ГОСТ 147-95	5050	25

Протокол испытаний содержит показатели только представленных образцов.
Погрешности измерений соответствуют погрешностям применяемых НД на методы испытаний.
Протокол не может быть воспроизведен полностью или частично без письменного разрешения ИТЛ ЗАО "Сибирский ЭНТЦ".

Ответственный за оформление протокола:


 Н.В. Суркова
 А.И. Мотехина

Заведующий ИТЛ

Рисунок Б.1 – Протокол анализа карбонизата из угля ЗБ (разрез Большесырский)

ЗАО «Сибирский ЭНТЦ»
Аккредитованная испытательная Топливная лаборатория

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 66А
тел./факс (3912) 44-92-80

Аттестат аккредитации
РОСС RU.0001.21ТУ50 от 30 июля 2010 г.
действителен до 30 июля 2015 г.

Протокол испытаний № 271 от «22» августа 2011 г. (на 1-ом листе)

Организация – заказчик	ООО «Энерготехнологические системы», договор 5-61.9/321 от 20.08.2009г.
Наименование образца	Проба, «НП-2»
Дата поступления образца	12.08.2011г.
Количество	
Код образца	Проба № 967

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Условия проведения испытаний: Т – 24^oС, Р – 738мм.рт.ст., влажность 47,5%.

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	НД на метод испытания	Результаты испытаний образца (пробы)	Погрешность ±Δ _л
1	2	3	4	5
Влага общая, W^l	%	ГОСТ Р 52911-08	0.5	
Зола, сухое состояние, A^d	%	ГОСТ 11022-95	7.0	0,2
Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние, V^{daf}	%	ГОСТ 6382-91	14.6	1,8
Содержание серы, сухое состояние, S^d	%	ГОСТ 8606-93	0.41	0,06
Содержание водорода, сухое беззольное состояние, H^{daf}	%	ГОСТ 2408.1-95	3.5	0,15
Высшая теплота сгорания, сухое состояние, Q_s^d	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7470	25
Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q_s^{daf}	ккал/кг	ГОСТ 147-95	8030	25
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, Q_i^r	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7260	25

*Протокол испытаний содержит показатели только представленных образцов.
Погрешности измерений соответствуют погрешностям применяемых НД на методы испытаний.
Протокол не может быть воспроизведен полностью или частично без письменного разрешения ИТЛ ЗАО "Сибирский ЭНТЦ".*

Ответственный за оформление протокола:

Заведующий ИТЛ



Д.Е.Суркова
Т.А.Потехина

Рисунок Б.2 – Протокол анализа карбонизата из угля 3Б (разрез Большесырский)

ЗАО «Сибирский ЭНТЦ»
Аккредитованная испытательная Топливная лаборатория

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 66А
тел./факс (3912) 44-92-80

Аттестат аккредитации
РОСС RU.0001.21ТУ50 от 14 октября 2011 г.
действителен до 30 июля 2015 г.

Протокол испытаний № 25 от «31» января 2012 г. (на 1-ом листе)

Организация – заказчик	ООО «Сибтермо», договор 11-13/321-П от 20.01.2011г.
Наименование образца	Проба, уголь, «Уголь Д – исходный».
Дата поступления образца	23.01.2012г.
Количество	
Код образца	Проба № 1309

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Условия проведения испытаний: Т – 25⁰С, Р – 765мм.рт.ст., влажность 47,5%.

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	НД на метод испытания	Результаты испытаний образца (пробы)	Погрешность ±Δ _г
1	2	3	4	5
<i>Влага общая, W^t</i>	%	ГОСТ Р 52911-08	17,9	
<i>Зола, сухое состояние, A^d</i>	%	ГОСТ 11022-95	6,6	0,2
<i>Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние, V^{daf}</i>	%	ГОСТ 6382-91	42,3	1,8
<i>Содержание серы, сухое состояние, S^d</i>	%	ГОСТ 8606-93	0,35	0,06
<i>Содержание водорода, сухое беззольное состояние, H^{daf}</i>	%	ГОСТ 2408.1-95	4,8	0,15
<i>Высшая теплота сгорания, сухое состояние, Q^s</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	6660	25
<i>Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q^{s,daf}</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7130	
<i>Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, Qⁱ</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	5220	

Протокол испытаний содержит показатели только представленных образцов.

Отбор проб производился Заказчиком.

Погрешности измерений соответствуют погрешностям применяемых НД на методы испытаний.

Протокол не может быть воспроизведен полностью или частично без письменного разрешения ИТЛ ЗАО "Сибирский ЭНТЦ".

Ответственный за оформление протокола:

Л.Е.Суркова

Заведующий ИТЛ

Т.А.Потехина



Рисунок Б.3 – Протокол анализа исходного угля марки Д (разрез Моховский)

ЗАО «Сибирский ЭНТЦ»
Аккредитованная испытательная Топливная лаборатория

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 66А
тел./факс (3912) 44-92-80

Аттестат аккредитации
РОСС RU.0001.21ТУ50 от 14 октября 2011 г.
действителен до 30 июля 2015 г.

Протокол испытаний № 26 от «31» января 2012 г. (на 1-ом листе)

Организация – заказчик	ООО «Сибтермо», договор 11-13/321-П от 20.01.2011г.
Наименование образца	Проба, уголь, «Уголь Д – прокалка».
Дата поступления образца	23.01.2012г.
Количество	
Код образца	Проба № 1310

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Условия проведения испытаний: Т – 25⁰С, Р – 765мм.рт.ст., влажность 47,5%.

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	НД на метод испытания	Результаты испытаний образца (пробы)	Погрешность ±Δ _г
1	2	3	4	5
<i>Влага общая, W_f</i>	%	ГОСТ Р 52911-08	0,4	
<i>Зола, сухое состояние, A^d</i>	%	ГОСТ 11022-95	9,4	0,2
<i>Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние, V^{daf}</i>	%	ГОСТ 6382-91	14,4	1,8
<i>Содержание серы, сухое состояние, S^d</i>	%	ГОСТ 8606-93	0,18	0,06
<i>Содержание водорода, сухое беззольное состояние, H^{daf}</i>	%	ГОСТ 2408.1-95	3,0	0,15
<i>Высшая теплота сгорания, сухое состояние, Q_s^d</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7230	25
<i>Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, Q_s^{daf}</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7980	
<i>Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, Q_i^r</i>	ккал/кг	ГОСТ 147-95	7060	

Протокол испытаний содержит показатели только представленных образцов.

Отбор проб производился Заказчиком.

Погрешности измерений соответствуют погрешностям применяемых НД на методы испытаний.

Протокол не может быть воспроизведен полностью или частично без письменного разрешения ИТЛ ЗАО «Сибирский ЭНТЦ».

Ответственный за оформление протокола:



П.Е.Суркова

Заведующий ИТЛ

Т.А.Потехина

Рисунок Б.4 – Протокол анализа карбонизата из угля марки Д (разреза Моховский)

Приложение В

Технологический регламент

1. Общая характеристика производства

Настоящий технологический регламент распространяется на процесс производства кускового высококалорийного топлива (далее по тексту – полукокс).

Полукокс получают в аппаратах шахтного типа периодического действия из бурого угля 3Б Большесырского месторождения Канско-Ачинского угольного бассейна методом слоевой газификации угля на пульсирующем воздушном дутье в режиме «обратной тепловой волны».

Производство непрерывное круглосуточное. Производительность установки из 100 газификаторов составляет 50 тыс. т полукокса в год.

Для зданий и сооружений организаций, технологические процессы которых являются источниками вредных производственных выбросов в окружающую среду, следует предусматривать санитарные защитные зоны с обоснованием их границ в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.567-96.

Производственные здания и сооружения должны соответствовать требованиям СНиП 2.09.02. Производственные помещения должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей поддержание норм ПДК на рабочем месте (в воздухе рабочей зоны), общеобменной и местной вытяжной вентиляцией в соответствии с требованиями СНиП 2.04.05, системами центрального отопления, горячего и холодного водоснабжения (Таблица В.1).

Таблица В.1 – Рекомендуемые температурно-влажностные режимы в производственных помещениях

	Температура, °С				Влажность, %		
1.Производственный участок	+	15	...	+ 25	40	...	75
2.Склад готовой продукции	-	50	...	+ 50	40	...	75
3. Склад хранения сырья	-	50	...	+ 50	40	...	75

2. Характеристика производимой продукции

Полукокс – твёрдый углеродсодержащий материал, получаемый из ископаемых углей термической обработкой при температуре 773-973 К. Для него характерны: низкий выход летучих веществ (~15%), высокие калорийность и реакционная способность, низкая электропроводность.

Полукокс применяется как энергетическое, металлургическое, агломерационное и технологическое топливо, карбюризатор, бездымное бытовое топливо, углеродистый восстановитель для электротермических производств – получения кремния, ферросплавов, фосфора и др.

Полукокс изготавливают двух марок:

ПК-О – полукокс орех – класс 10-40 мм;

ПК-М – полукокс мелкий – класс 0-10 мм.

Полукокс должен отвечать требованиям, указанным в табл. В.2.

Таблица В.2 – Требования к полукоксу

Наименование показателя	Норма для марок		Метод испытания
	ПК-О	ПК-М	
Внешний вид	Частицы не- правильной формы, серо- черного цвета	Зерна непра- вильной формы, серо- черного цвета	Визуально
Зольность на рабочую массу, %, не более	14	18	ГОСТ Р 55661-2013
Массовая доля летучих веществ на сухую без- зольную массу, %, не более	20	20	ГОСТ Р 52917-2008
Массовая доля общей влаги, %, не более*	5	5	ГОСТ Р 52917-2008
Остаток на сите 10 мм, % не менее	85	–	ГОСТ 16187-70
Остаток на сите 10 мм, % не более	–	10	ГОСТ 16187-70
Массовая доля серы, %, не более	0,5	0,5	ГОСТ 8606-93
Структурная прочность, %, не менее	65	–	Метод ВУХИН
Насыпная плотность, г/дм ³	фиксируется	фиксируется	ГОСТ 16190-70
Низшая теплота сгорания на рабочую массу, МДж/кг (ккал/кг), не менее	27,2 (6500)	26,4 (6300)	ГОСТ 147-2013

* По согласованию с потребителями допускается бо́льшая массовая доля воды в полукоксе с пересчетом фактической массы на 5%-ную влажность.

3. Характеристика исходного сырья

В качестве исходного сырья используют дробленый уголь класса 15-40 мм 3Б Большесырского месторождения Канско-Ачинского угольного бассейна, характеристики которого приведены в таблице 2.

Таблица В.3 – Характеристики угля

Наименование сырья	Государственный или отраслевой стандарт	Показатели, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели с допустимыми отклонениями
Бурый уголь 3Б	ГОСТ Р 51591-2000	Зольность на сухую массу, % не более	7,0
		Массовая доля влаги, % не более	25,0
		Массовая доля серы, % не более	0,5

4. Описание технологического процесса и схемы

Предварительно классифицированный уголь завозится полувагоном **1** в цех производства полукокса и разгружается из него грейферным ковшом **2** в приёмную ёмкость угля **3** (рисунок В.1). Затем из приемной емкости уголь по мере необходимости загружается грейферным ковшом **2** в загрузочные бункера **4**. Для загрузки газификаторов грейферный ковш отсоединяется и подъемным краном **5** бункера выгружаются в газификатор **6**. По завершении в газификаторе процесса карбонизации и охлаждения полученный полукокс по цепочке транспортеров **7, 8, 9** поступает на грохот **10**, где рассеивается на классы крупности 0-10 мм и 10-40 мм. Класс крупности 10-40 мм транспортером **11** и плужковыми сбрасывателями **12** загружается в приемные бункеры **13**. Класс крупности полукокса 0-10 мм ссыпается с грохота в приемный бункер **14**. Из приемных бункеров **13,14** полукокс по мере необходимости ленточным транспортером **15** загружается в автотранспорт и вывозится потребителю. Горючий газ, получаемый в процессе переработки угля, подается на котельную и сжигается.

В процессе карбонизации воздух вентилятором **16** подается в газификаторы **6** (рисунок В.2). Расход воздуха регулируется АСУТП затвором с электроприводом **17** и регистрируется расходомером **18**. Получаемый горючий газ через затворы **19** выводится в газопровод и направляется в газовую котельную. При переводе газификатора в режим охлаждения полукокса сменным персоналом закрывается затвор **19**, открываются затворы **20, 21** и включается воздухоподогреватель **23**. При этом газ проходит через теплообменник **22**, охлаждаясь в нем, и снова поступает в газификатор, нагреваясь в слое полукокса и охлаждая его. Расход газа регулируется АСУТП затвором с электроприводом **24** и регистрируется расходомером **18**.

Для охлаждения рубашек газификаторов и теплообменников систем охлаждения используется обратная вода системы отопления промышленной площадки с температурой не более 50°C. Эта вода через шаровые краны **25** (рисунок В.3) поступает в теплообменник **26**, где нагревается до температуры

80°C и отдается в теплосеть. В системе охлаждения рубашек газификаторов вода перекачивается насосом 27. Один из насосов является рабочим, второй – резервным. В насосную группу каждого насоса входят задвижки 28, обратные клапаны 29, фильтры грубой очистки 30. На входе в насосную группу также установлен грязевик 31. Нагретая до 90°C в рубашках газификаторов вода поступает в теплообменник 26, где охлаждается до 70°C. Обратная вода системы охлаждения также циркулирует через газоводяной теплообменник 22, охлаждая генераторный газ в процессе охлаждения полукокса. Теплообменник 22 отсекается от системы отопления задвижками 28.

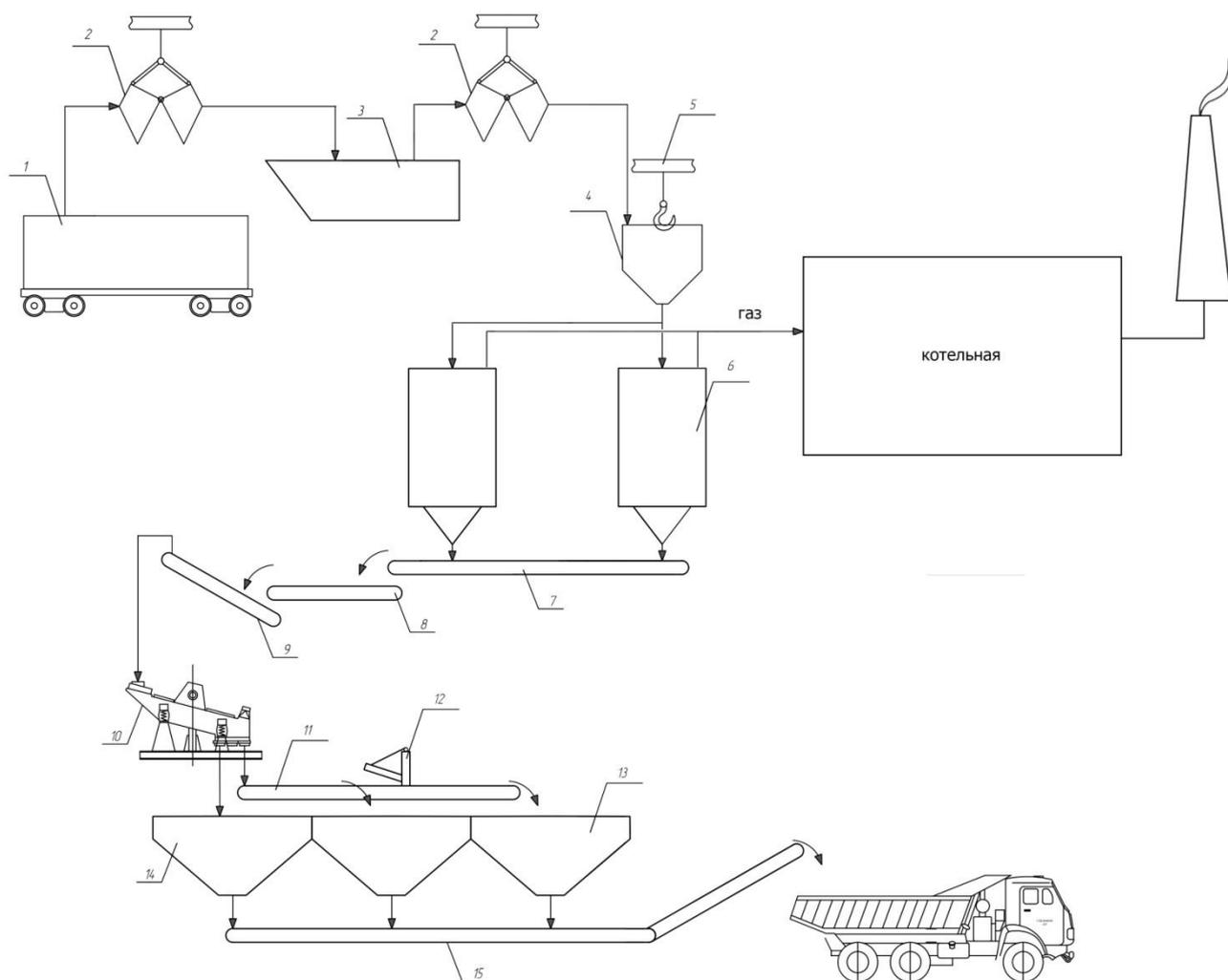


Рисунок В.1 – Технологическая схема линии твердых продуктов

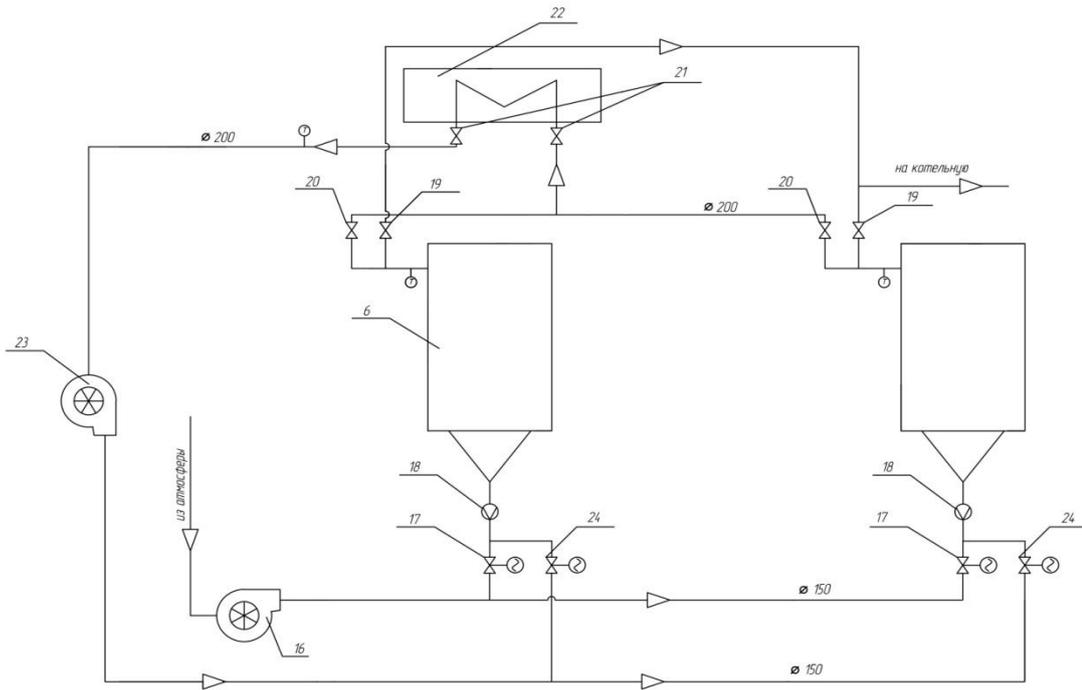


Рисунок 2 – Технологическая схема газовойоздушной линии

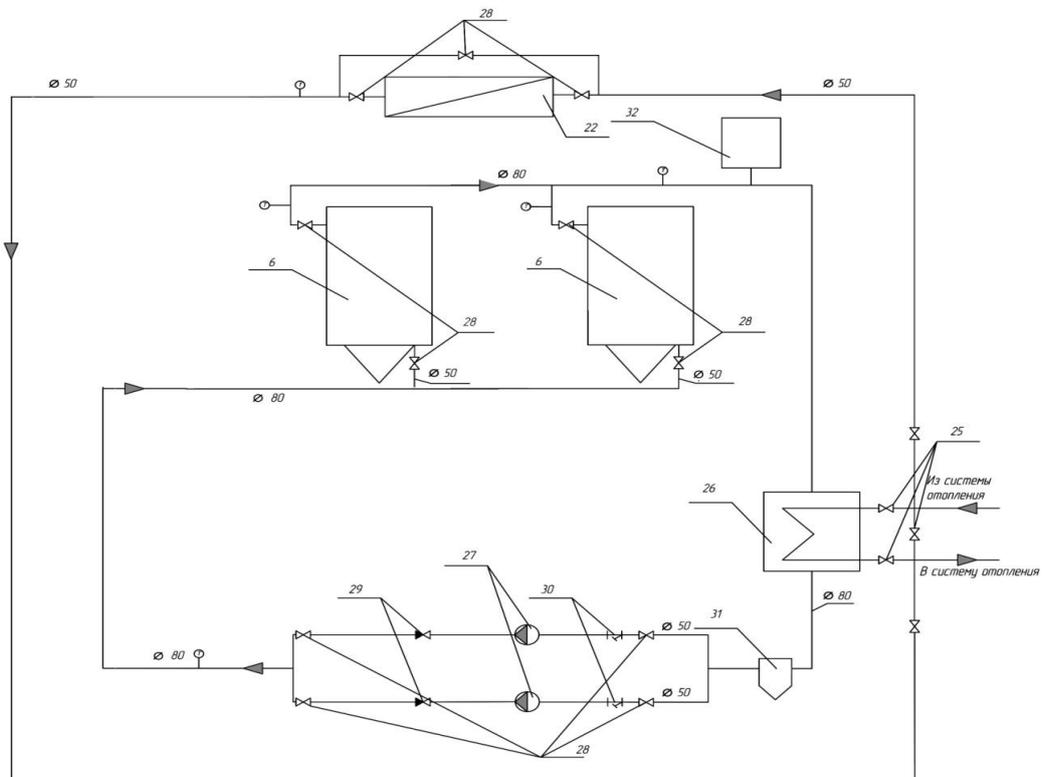


Рисунок 3 – Технологическая схема линии охлаждения газификаторов

Газификатор работает следующим образом. В шахту через загрузочное устройство подается уголь (класс 15-40 мм), под газораспределительную решетку внизу шахты через патрубок подают воздушное дутье и поджигают слой угля электротермическим устройством со стороны, противоположной подаче дутья, с целью образования обратной тепловой волны. По истечении 30-ти минут после запуска газификатора воздушное дутье переводят на пульсирующий режим подачи. Таким образом, тепловая волна смещается навстречу потоку воздуха, оставляя за собой слой горячего полукокса. Уголь при прохождении тепловой волны последовательно подвергается нагреву, сушке и пиролизу. Горючие продукты пиролиза полностью сгорают в кислороде воздуха с образованием диоксида углерода и водяного пара, которые затем восстанавливаются на горячей поверхности полукокса до оксида углерода и водорода, образуя, таким образом, горючий газ. Газ отводится через патрубок с гидрозатвором. После достижения тепловой волной уровня газораспределительной решетки процесс карбонизации завершается. По завершении процесса производится охлаждение полукокса

Работа газификатора включает выполнение следующих технологических операций:

- загрузка угля в газификатор;
- запуск (розжиг) газификатора;
- газификация угля;
- охлаждение полукокса;
- выгрузка полукокса.

Последовательность действий при запуске газификатора следующая.

После загрузки угля люк загрузочного устройства закрывается, сливается вода из гидрозатвора. Контроль воды в гидрозатворе осуществляется поплавковым датчиком. Аппаратчик включает соответствующий рубильник и нажимает кнопку «Аппарат к разогреву готов» на местном щите сигнализации (ЩС). На щите ЩС и щите управления (ЩУ) в помещении оператора загораются индикаторы «Аппарат к разогреву готов».

Начальный разогрев верхнего слоя угля осуществляется электротермическим устройством (далее – ЭТУ) косвенного нагрева, состоящим из шести независимых нагревателей сопротивления, включенных в электрическую цепь и передающих выделяющееся в них тепло слою угля излучением. Каждый нагреватель представляет собой проволочную спираль, выполненную из нихромовой проволоки. Нагреватели закреплены на съемных крышках аппарата и подключены к сети переменного тока напряжением 380 В. Суммарная мощность нагревателей – 2500 кВт.

Розжиг газификатора осуществляется в следующем порядке.

Открывается задвижка газового коллектора, открывается задвижка воздушного коллектора, подается напряжение на нагреватели. Перевод аппарата в режим розжига производится оператором нажатием кнопки «Пуск разогрева». При этом подается напряжение на ЭТУ и включается автоматическая система управления. Автоматическая система управления (АСУ) работает следующим образом. Через 10 минут после начала разогрева (включения электротермического устройства) подается воздух на дутье. Расход воздуха в течение 20 минут равномерно увеличивается от начального значения ($150 \text{ м}^3/\text{ч}$) до номинального ($560 \text{ м}^3/\text{ч}$). По достижении номинального расхода воздуха включается пульсирующий режим подачи воздуха с продолжительностью периода дутья 25 с и периода останова 150 секунд. Через 30 минут после начала разогрева электротермическое устройство отключается от электрической сети. Предусмотрено автоматическое отключение ЭТУ от электросети при перегрузке и вручную со щита управления.

После установления номинального расхода воздуха индикатор «Разогрев» автоматически выключается, включаются световые индикаторы «Рабочий режим» на местном щите и щите управления. Далее процесс идет в рабочем *автотермическом* режиме. Номинальный расход воздуха задается оператором и поддерживается АСУ до прихода опорного сигнала с термопары, расположенной у колосниковой решетки. По приходу опорного сигнала с термопары отсечной клапан закрывается, подача воздуха автоматически прекращается, выключаются

световые индикаторы «Рабочий режим», включаются индикаторы «Конец рабочего режима» на ЩС и ЩУ.

Расход воздуха контролируется дифманометром по перепаду давления на стандартном сужающем устройстве, изменение расхода воздуха осуществляется задвижкой с электроприводом от автоматической системы управления, температура угля в аппарате контролируется термоэлектрическими датчиками. Расход воздуха поддерживается автоматически с учетом изменения перепада давления на слое. Горючий газ направляется на котельную для сжигания. Состав газа контролируется автоматическим газоанализатором.

После окончания рабочего режима средняя остаточная температура полукокса достигает 400°C. Для снижения температуры ниже 70°C аппарат переводится в режим охлаждения.

Разрешение на ведение операции «Охлаждение» дает оператор. Охлаждение полукокса контролируется по термоэлектрическим датчикам. По достижении температуры слоя 70°C охлаждение заканчивается.

Продолжительность цикла работы аппарата 48,5 часов. Продолжительность операций:

- разогрев – 0,5 часа;
- газификация – 41 часов;
- охлаждение полукокса – 6 часов;
- загрузка и выгрузка – 2 часа.

Рассев и отгрузка готового продукта

По требованию заказчика может быть произведена упаковка продукта в контейнеры для сыпучих материалов типа МКР. На каждое упакованное место приклеивают ярлык со следующими надписями:

- наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак;
- наименование продукта;
- номер партии;
- масса брутто и нетто;
- дата изготовления партии;

– обозначение настоящих технических условий.

Транспортная маркировка наносится по ГОСТ 14192-77 с указанием основных, дополнительных и информационных надписей, предупредительной надписи «Не бросать» и манипуляционного знака «Беречь от влаги».

Утилизация отходов

Пыль со стадии рассева полукокса подается в бункер полукокса марки ПК-М.

В отличие от полукоксования в шахтной печи, где используется внешний газообразный теплоноситель, скорость фильтрации газа в газификаторе невелика, а сам слой полукокса служит зернистым фильтром. Поэтому содержание твердых примесей (уноса) в газе не превышает 5 мг/м^3 .

Горючий газ без предварительной очистки через систему газопроводов подается на котельную.

Содержание вредных примесей в дымовых газах при сжигании горючего газа (NO_x – 150 мг/нм^3 , SO_x – 200 мг/нм^3 , CO – 90 мг/нм^3 , пыль – менее 5 мг/нм^3) существенно ниже как установленных нормативов, так и показателей действующих котельных, ТЭС и ТЭЦ, даже оснащенных современными многоступенчатыми системами газоочистки, включающими электрофильтры.

5. Материальный и тепловой балансы

Материальный и тепловой балансы приведены в таблицах 3-4 на 1 т угля (Таблица В.3, Таблица В.4).

Таблица В.4 – Материальный баланс

Наименование статей прихода и расхода	тонн	нм ³
Приход		
Уголь ЗБ	1	–
Воздух	0,11	86
Итого	1,11	86
Расход		
Полукокс	0,56	–
Горючий газ	0,55	524
Итого	1,11	524

Таблица В.5 – Тепловой баланс

Наименование статей прихода и расхода	ГДж	%
Приход		
Теплота сгорания угля ($Q_i^r = 21,1$ МДж/кг)	21,1	100
Расход		
Теплота сгорания полукокса ($0,56 \times 29,5$ МДж/кг)	16,6	78,7
Теплота сгорания газа ($524 \text{ нм}^3 \times 2,55$ МДж/нм ³)	1,4	6,6
Энтальпия полукокса	0,2	0,9
Энтальпия газа	0,5	2,4
Энтальпия на нагрев водяной рубашки газификатора	1,1	5,2
Теплопотери	1,3	6,2
Итого	21,1	100
Тепловой КПД процесса карбонизации, %	93,8	

6. Нормы расхода основных видов сырья, материалов и энергоресурсов

Таблица В.6 – Нормы расхода основных видов сырья, материалов и энергоресурсов

Наименование сырья, материалов, энергоресурсов	Нормы расхода на 1 т полукокса	
	Единица измерения	
1. Уголь 3Б (15-40 мм)	т	1,79
2. Электроэнергия	кВт·ч	50

7. Нормы образования отходов производства по готовому продукту

Таблица В.7 – Нормы образования отходов производства по готовому продукту

Наименование отхода, характеристика, состав, аппарат или стадия образования	Направление использования, метод очистки или уничтожения	Нормы образования отходов, кг/т полукокса
Пыль со всех стадий производства, уловленная вентсистемами	Угольная пыль используется как топливная добавка в производстве кирпича, пыль полукокса добавляется в полукокс ПК-М.	30

8. Параметры и нормы технологического процесса

Режимные параметры технологического процесса приведены в таблице В.8, а регламентируемые технологические показатели – в таблице В.9.

Таблица В.8 – Режимные параметры технологического процесса

Параметр	Единица измерения	Величина
Максимальная температура в слое	°С	700
Максимальная скорость движения фронта газификации («обратной тепловой волны»)	м/ч	0,029
Удельный выход полукокса на 1 тонну исходного угля	т	0,56
Удельный выход газа на 1 тонну исходного угля	м ³	524
Продолжительность полного цикла работы газификатора	ч	48,5
Продолжительность работы газификатора в номинальном режиме	ч	41
Продолжительность вывода газификатора в номинальный режим	ч	0,5
Продолжительность охлаждения полукокса	ч	6,0
Максимальная продолжительность загрузки и выгрузки газификатора	ч	2,0

Таблица В.9 – регламентируемые технологические показатели

Наименование стадий и потоков реагентов	Наименование технологических показателей и их регламентируемые величины
1. Дробление и рассев угля	Размер частиц после дробления должен быть 15-40 (± 3) мм
2. Газификация угля	<p>Расход воздуха на стадии предварительного разогрева – 150-560 $\text{нм}^3/\text{ч}$.</p> <p>Расход воды на охлаждение водяной рубашки – 0-4 $\text{м}^3/\text{ч}$.</p> <p>Температура воды на входе в водяную рубашку – не более 70°C.</p> <p>Температура в зоне карбонизации – 450-630°C.</p> <p>Температура газа на выходе из аппарата – до 300°C.</p> <p>Температура газа по высоте аппарата – до 700°C.</p> <p>Содержание кислорода в газовом коллекторе – не более 1%.</p> <p>Содержание $\text{CO}+\text{H}_2$ в газовом коллекторе – не менее 20%.</p> <p>Давление воздуха в магистральном трубопроводе – $1,5 \cdot 10^5$ Па.</p> <p>Абсолютное давление в газовом коллекторе – $1,1-1,3 \cdot 10^5$ Па.</p> <p>Температура полукокса при выгрузке – 70°C.</p>
3. Рассев готового продукта	<p>Номера сетки – 10 (ячейка – 10 мм)</p> <p>Содержание класса крупности (10-40 мм) – не менее 75%</p>
5. Упаковка и комплектация партии готового продукта	<p>Отгружается в открытом полувагоне или упаковывается в мягкие контейнеры МКР (по желанию потребителя).</p> <p>Формируется партия массой не более 500 т с документом о качестве готового продукта</p>

9. Контроль производства и управление технологическим процессом

Таблица В.10 – Контроль производства

Наименование стадий процесса или места измерения параметров	Контролируемые параметры	Частота и способ контроля	Нормы и технические показатели	Методы испытания и средства контроля	Кто контролирует
1	2	3	4	5	6
1. Поступление сырья Уголь 3Б	Массовая доля золы на сухую массу Массовая доля серы на сухую массу	Каждое поступление Каждое поступление	не более 7% не более 0,5%	ГОСТ Р 55661-2013 ГОСТ 8606-93	Цеховая лаборатория —//—
2. Подготовка и подача угля в производство Уголь 3Б класс 15-40 мм перед подачей в накопительный бункер	Остаток на сите 15 мм Остаток на сите 40 мм	1 раз в смену 1 раз в смену	не менее 95% не более 5%	ГОСТ 16187-70 —//—	Цеховая лаборатория —//—

Продолжение таблицы В.10

1	2	3	4	5	6
3. Газификация угля					
3.1 Параметры процесса газификации	Расход воздуха на предварительный разогрев	Непрерывно	150-560 нм ³ /ч	Расходомер	Оператор
	Расход воздуха на стадии газификации	Через 1 час	560 нм ³ /ч	--	--
	Расход воды на охлаждение водяной рубашки	--	0-4 м ³ /ч	ССУ	--
	Мощность, потребляемая электронагре- вателями		2500 кВт	Ваттметр	--
	Температура воды на входе в водяную ру- башку	Через 1 час	40-70°С	Термопара	--
	Температура воды на выходе из водяной рубашки	--	не более 90°С	--	--
	Давление воды на выходе из водяной рубашки	--	не более 3 МПа	--	--

Продолжение таблицы В.10

1	2	3	4	5	6
	Температура газа на выходе из аппарата	Через 2 часа	50-300°C	Термопара	Оператор
	Температура газа по высоте аппарата	Через 2 часа	0-600°C	--/	--/
	Состав горючего газа в газовом коллекторе	Через 1 час	20-30% CO+H ₂	Газоанализатор ГАУ-Д	--/
	Содержание кислорода в газовом коллекторе	--/	не более 1%	Анализатор кислорода ГИАМ-310-02 или АКВТ-01	--/
	Содержание кислорода в магистральной охлаждающего газа	--/	не более 1%	--/	--/
	Давление воздуха в магистральном трубопроводе	--/	1,3–1,5·10 ⁵ Па	Манометр	--/
	Давление газа в газовом коллекторе	--/	1,1-1,3·10 ⁵ Па.	Манометр	--/
	Температура полукокса перед выгрузкой	--/	не более 70°C	Термопара	--/

Продолжение таблицы В.10

1	2	3	4	5	6
4.Рассев полукокса и подача его в накопи- тельные бункера Полукок ПК-О	Остаток на сите 10 мм	Средне- сменная проба --/--	Не менее 85%	ГОСТ 16187-70	Цеховая лаборат ория --/--
	Зольность на рабочую массу	--/--	Не более 14%	ГОСТ Р 55661-2013	--/--
	Массовая доля общей влаги	--/--	Не более 5%	ГОСТ Р 52917-2008	--/--
	Массовая доля летучих веществ на сухую беззольную массу	--/--	Не более 6%	ГОСТ Р 55660-2013	--/--
	Массовая доля серы	--/--	Не более 0,5%	ГОСТ 8606-93	--/--
	Низшая теплота сго- рания на рабочую массу	--/--	Не менее 27,2 МДж/кг (6500 ккал/кг)	ГОСТ 147-2013	--/--
	Насыпная плотность	--/--	Фиксируется	ГОСТ 16190-70	--/--

Окончание таблицы В.10

Полукокс ПК-М	Остаток на сите 10 мм	Среднесменная проба	Не более 10%	ГОСТ 16187-70	Цеховая лаборатория
	Зольность на рабочую массу	--	Не более 18%	ГОСТ Р 55661-2013	--
	Массовая доля общей влаги	--	Не более 5%	ГОСТ Р 52917-2008	--
	Массовая доля летучих веществ на сухую беззольную массу	--	Не более 6%	ГОСТ Р 55660-2013	--
	Массовая доля серы	--	Не более 0,5%	ГОСТ 8606-93	--
	Низшая теплота сгорания на рабочую массу	--	Не менее 26,4 МДж/кг (6300 ккал/кг)	ГОСТ 147-2013	--
	Насыпная плотность	--	Фиксируется	ГОСТ 16190-70	--
5. Отгрузка полукокса в полувагонах навалом	Масса нетто каждого вагона	При загрузке каждого вагона	45-48 т	Весы вагонные	Приемосдатчик

10. Санитарный контроль

Таблица В.11 – Санитарный контроль

Наименование стадий процесса, места измерения параметров или отбора проб	Контролируемый параметр	Частота и способ контроля	Нормы и технические показатели	Методы испытания и средства контроля	Кто контролирует
Помещение газификаторов	Содержание СО в воздухе	Периодически при работе	Не более 20 мг/м ³	ТУ на метод определения вредных веществ в воздухе (М., Химия, 1972)	Лаборатория
	Содержание угольной пыли в воздухе	Периодически при работе	Не более 10 мг/м ³	ТУ на метод определения пыли в воздухе промышленных предприятий	Лаборатория

11. Пожаровзрывоопасные, токсичные свойства сырья, полупродуктов, готовой продукции и отходов производства

Таблица В.12 – Пожаровзрывоопасные, токсичные свойства сырья, полупродуктов, готовой продукции и отходов производства

Наименование сырья, готовой продукции, отходов производства	Класс опасности ГОСТ 12.1.007 -76	Температура, °С			Концентрационный предел воспламенения, г/м ³		Характеристика токсичности (воздействия на организм человека)	ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны
		вспышки	воспламенение	самовоспл.	нижний	верхний		
Угольная пыль	4 класс	–	600	–	70	–	Задерживается в легких, может привести к заболеваниям	10 мг/м ³
Полукокс	3 класс	–	450	–	300	–	Задерживается в легких, может привести к заболеваниям	10 мг/м ³
Горючий газ	4 класс	–	600	–	30	70	Оксид углерода при утечке вызывает отравление	20 мг/м ³

12. Основные правила безопасного ведения технологического процесса

12.1 Основные правила безопасного ведения технологического процесса получения полукокса, возможные неполадки, аварийные ситуации и способы их ликвидации изложены в рабочих инструкциях цеха получения полукокса. К работе допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие обучение безопасным методам труда и инструктаж по технике безопасности, проводимый не реже одного раза в квартал с отметкой в специальном журнале инструктажа.

12.2 Полукоксы не обладают вредными для организма человека свойствами, но пыль угля при концентрациях, превышающих предельно-допустимые концентрации (ПДК) в воздухе рабочих помещений, попадая в легкие человека, со временем может вызвать заболевания пневмокониоз или антракоз.

12.3 ПДК полукоксосодержащей пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений – 10 мг/м³. По степени воздействия на организм человека в соответствии с ГОСТ 12.1.007 полукокс относится к третьему классу опасности.

12.4 Все работы по производству полукокса должны проводиться в помещениях, снабженных механической обще-обменной приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей состояние воздуха рабочей зоны и атмосферного воздуха в соответствии с ГОСТ 12.1.005, ГН 2.2.5.1313, ГН 2.1.6.1314, СанПиН 2.2.3.757-99, СанПиН 2.2.3.1385-03.

12.5 Все работники, занятые в производстве, должны проходить регулярные медицинские осмотры в соответствии с требованиями ПР МЗ и МП №90.

12.6 Контроль уровней шума и вибрации осуществляются согласно требованиям "Допустимые уровни шума на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки" ГН 2.2.4/2.1.8.562-96 и "Допустимые уровни вибрации на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий" ГН 2.2.4/2.1.566-96.

12.7 Контроль содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны и атмосферного воздуха должен осуществляться в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005, ГН 2.2.5.1313, ГН 2.2.5.1314 и производиться лабораториями по

методикам, утвержденными органами здравоохранения, в сроки и в объемах, согласованными с территориальными органами Госсанэпиднадзора.

12.8 Лица, связанные с изготовлением продукции, должны быть обеспечены специальной одеждой, обувью по ГОСТ 12.4.011 и средствами защиты рук, глаз, органов слуха по ГОСТ 12.4.103.

Допускается применение средств защиты работающих, изготовленных по другим нормативным документам.

12.9 В производственных помещениях запрещается принимать пищу, пить и курить.

12.10 Контроль соблюдения предельно-допустимых выбросов (ПДВ) в атмосферу, утвержденных в установленном порядке, должен проводиться в соответствии с ГОСТ 17.2.3.02, ГН 2.1.6.1338, ГН 2.1.6.1339.

12.11 Мероприятия по охране окружающей среды осуществляются в соответствии с ГОСТ 17.2.3.02.

12.12 Производственные сточные воды утилизируются по существующей на предприятии схеме.

12.13 Полукокс – горючее вещество. Температура самовоспламенения полукоксовой пыли – 398°С. Нижний концентрированный предел воспламенения пыли – 165 г/м³. Продукт не склонен к тепловому и химическому самовозгоранию. При загорании полукоксовой пыли следует тушить ее водой со смачивателями, пеной, порошком ПД.

12.14 Места пересыпания полукокса должны быть оборудованы в соответствии с нормами противопожарной безопасности (отсутствие источников открытого огня, наличие вытяжной вентиляции, а также пылегазоулавливающих установок для предотвращения выбросов пыли в атмосферу).

Таблица В.13 – Ссылочные нормативно-технические документы

Обозначение на который дана ссылка	НТД,	Номер пункта, подпункта
ГОСТ Р 55661-2013		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ Р 51591-2000		2 (табл. 2)
ГОСТ 12.1.005-88		12.4, 12.7
ГОСТ 12.1.007-76		12.3, 11 (табл. 11)
ГОСТ 12.4.011-89		12.8
ГОСТ 12.4.103-83		12.8
ГОСТ 14192-96		4.3
ГОСТ 147-2013		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ 16187-70		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ 16190-70		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ 17.2.3.02		12.10, 12.11
ГОСТ Р 52917-2008		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ Р 55660-2013		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГОСТ 8606-93		3 (табл. 1), 5 (табл. 9)
ГН 2.1.6.1314		12.4, 12.7
ГН 2.1.6.1338		12.10
ГН 2.1.6.1339		12.10
ГН 2.2.4/2.1.566-96		12.6
ГН 2.2.4/2.1.8.562-96		12.6
ГН 2.2.5.1313		12.4, 12.7
ГН 2.2.5.1314		12.4, 12.7
СанПиН 2.2.1/2.1.1.567-96		1
СанПиН 2.2.3.1385-03		12.4
СанПиН 2.2.3.757-99		12.4
СНиП 2.04.05		1
СНиП 2.09.02		1

Приложение Г

Акты внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«СИБУГОЛЬ»660001, Россия
Красноярск,
ул. Менжинского,
д. 12 «Г»Тел: (391) 202-34-04
(391) 243-29-38
Факс: (391) 243-64-50
e-mail: sib-coal1@yandex.ru

« 4 » 05 2016 г.

г. Красноярск

АКТ

*об использовании результатов кандидатской диссертации**Кулеша Михаила Владимировича**«Автотермическая переработка углей методом частичной газификации в слое с пульсирующим дутьем»*

1. Настоящий акт составлен о том, что компания «Сибуголь» приняла разработанный Кулешом М.В. «Временный технологический регламент. Производство кускового высококалорийного топлива» для использования при проектировании промышленного предприятия по производству высококалорийного топлива из бурого угля Большесырского месторождения.

2. Документ передан в 3-х экземплярах.

Генеральный директор



А.А.Концевой

Рисунок Г.1 – Акт внедрения от ООО «Сибуголь» (г.Красноярск)



г. Красноярск

от « 16 » 05 2016 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации

Кулеша Михаила Владимировича

«Автотермическая переработка углей методом частичной газификации в слое с пульсирующим дутьем»

1. Настоящий акт составлен о том, что ООО «СибНИИУглеобогашение» (АО «СУ-ЭК» г.Прокопьевск) приняла разработанный Кулешом М.В. «Временный технологический регламент. Производство кускового высококалорийного топлива» для использования при проектировании промышленного предприятия по производству высококалорийного топлива из бурых и длиннопламенных углей.

2. Документ передан в 3-х экземплярах.

Генеральный директор



А.Ю. Ермаков

Рисунок Г.2 – Акт внедрения от проектного института СибНИИУглеобогашение (АО «СУЭК»)



ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«СУЭК-ХАКАСИЯ»

РОССИЯ, 655162, РЕСПУБЛИКА ХАКАСИЯ,
Г. ЧЕРНОГОРСК, УЛ. СОВЕТСКАЯ, Д. 40
ТЕЛ. (39031) 5-58-70, 5-58-71
ФАКС (39031) 5-58-76, 5-58-77
E-MAIL: SemimoruO.A@suek.ru

WWW.SUEK.RU

19. 05. 2016 № _____

на № _____ от _____

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации

Кулеша Михаила Владимировича

«Автотермическая переработка углей методом частичной газификации в слое с пульсирующим дутьем»

1. Настоящий акт составлен о том, что ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск) приняла разработанный Кулешом М.В. «Временный технологический регламент. Производство кускового высококалорийного топлива» для использования при проектировании промышленного предприятия по производству высококалорийного топлива из бурых и длиннопламенных углей.

2. Документ передан в 3-х экземплярах.

Заместитель Генерального директора –
Технический директор



В.А. Азев

Рисунок Г.3 – Акт внедрения от ООО «СУЭК-Хакасия» (г. Черногорск)