

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи



Сверчков Иван Павлович

**СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология
(в горно-перерабатывающей промышленности)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор **М.А. Пашкевич**

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, СЛОЖИВШЕЙСЯ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	11
1.1 Угольная промышленность России.....	11
1.1.1 Добыча углей.....	12
1.1.2 Обогащение углей.....	15
1.2 Воздействие отходов углеобогащения на гидросферу	19
1.3 Воздействие отходов обогащения угля на почвенно-растительный покров.....	21
1.4 Воздействие отходов углеобогащения на атмосферный воздух.....	23
1.5 Анализ существующих способов утилизации отходов углеобогащения	26
1.5.1 Брикетирование.....	28
1.5.2 Газификация	30
1.5.3 Получение водоугольных и органоводоугольных суспензий с дальнейшим сжиганием.....	32
Выводы по первой главе.....	39
ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ.....	40
2.1 Характеристика предприятия АО «Междуречье».....	40
2.1.1 Добыча угля	41
2.1.2 Обогащение угля	44
2.2 Воздействие отходов углеобогащения АО «Междуречье» на компоненты окружающей природной среды	47
2.2.1 Влияние отходов на поверхностные воды	47
2.2.2 Отбор проб сточных вод из шламонакопителя.....	50
2.2.3 Определение состава сточных вод шламонакопителя.....	51
2.2.4 Влияние отходов на атмосферный воздух	55
2.3 Оценка возможности использования отходов углеобогащения в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий.....	58
2.3.1 Отбор проб отходов углеобогащения.....	58
2.3.2 Гранулометрический анализ.....	60
2.3.3 Термогравиметрический анализ	62

2.3.4 Калориметрический анализ.....	65
2.3.5 Определение содержания топливных элементов в составе отходов обогащения угля.....	67
2.3.6 Определение состава зольного остатка	71
2.4 Проведение предварительных лабораторных испытаний по сжиганию водоугольных суспензии	77
2.4.1. Термический анализ водоугольных суспензий.....	77
2.4.2 Определение состава отходящих газов.....	79
Выводы по второй главе.....	90
ГЛАВА 3 СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ВЫБРОСОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	91
3.1 Влияние параметров подготовки и сжигания топлива на энергетические и экологические характеристики утилизации отходов углеобогащения.....	91
3.1.1 Способы сжигания твердого топлива	91
3.1.2 Влияние параметров приготовления и распыла топливных суспензий на экологические и энергетические характеристики их сжигания.....	96
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	104
3.2.1 Экспериментальный стенд для проведения испытаний	104
3.2.2 Методика приготовления топливных суспензий.....	108
3.2.3 Определение седиментационной стабильности топливных суспензий	109
3.2.4 Определение параметров распыла топливных суспензий.....	112
3.2.5 Методика определения состава отходящих газов	115
3.3 Результаты экспериментальных исследований состава продуктов сгорания при термической утилизации отходов углеобогащения	118
3.3.1 Влияние параметров приготовления топливных суспензий	118
3.3.1.1 Гранулометрический состав	118
3.3.1.2 Соотношения твердой и жидкой фаз в составе суспензии.....	119
3.3.1.3 Влияние добавок горючего компонента.....	121
3.3.2 Влияние параметров сжигания топливных суспензий.....	124
3.3.2.1 Температура сжигания	124
3.3.2.2 Коэффициент избытка воздуха.....	127
3.3.2.3 Размер капель суспензии.....	129
3.3.3 Сравнение количества выбросов загрязняющих веществ при водоугольном, органоводоугольном и пылеугольном сжигании отходов обогащения угля.....	131

Выводы по третьей главе	136
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ	137
4.1 Тепловой расчет котельного агрегата при изменении типа сжигаемого топлива	137
4.1.1 Описание котла типа ДКВр-10-13.....	137
4.1.2 Состав и теплота сгорания водоугольного топлива	139
4.1.3 Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания	140
4.1.3.1 Определение коэффициентов избытка воздуха и присосов по отдельным газоходам.....	140
4.1.3.2 Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания	141
4.1.3.3 Расчет энтальпии воздуха и продуктов сгорания	146
4.1.4 Расчет коэффициента полезного действия котлоагрегата и расхода топлива	152
4.2 Утилизация отходов углеобогащения.....	154
4.2.1 Приготовление топливных суспензий	156
4.2.2 Сжигание топливных суспензий	162
4.3 Расчет затрат на внедрение предлагаемых мероприятий	165
4.3.1 Капитальные затраты.....	165
4.3.2 Эксплуатационные затраты	166
4.3.3 Расчет экономического эффекта	170
Выводы по четвертой главе	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ А	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ В	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	197

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

На мировом рынке ежегодно растет спрос на угли с повышенной калорийностью. Это приводит к увеличению производительности существующих обогатительных фабрик, вводу в эксплуатацию новых объектов по обогащению угля и, как следствие, к росту объемов образования отходов. В настоящее время количество накопленных отходов обогащения угольного сырья сопоставимо с запасами разрабатываемых месторождений, а ежегодный прирост достигает десятков процентов от общего объема добычи. По своим качественным характеристикам такие отходы часто не уступают добываемому твердому минеральному топливу. На сегодняшний день отходы углеобогащения, как правило, размещаются в отвалах, что приводит к изъятию земель сельскохозяйственного, лесохозяйственного и других целевых назначений для их размещения. Сформированные таким образом пожароопасные техногенные объекты, содержащие тонкодисперсные угольные частицы, являются источниками загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, почв, поверхностных и подземных вод, а также причиной ухудшения здоровья населения и повышения смертности в отдельных регионах.

В связи с этим, в настоящее время наблюдается повышенный интерес к переработке углеродсодержащих материалов техногенного происхождения. Эффективное решение утилизации накопленных и ежегодно образующихся отходов углеобогащения позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду в зоне воздействия углеперерабатывающих предприятий, уменьшить потери топливно-энергетического сырья и сократить затраты предприятий на производство тепловой энергии.

Одним из наиболее перспективных способов утилизации отходов обогащения угля является их использование в качестве сырья для получения топливных суспензий. В работах В.И. Мурко, Г.Н. Делягина, В.А. Кулагина, Ю.А. Сенчуровой, Г.С. Няшиной, Л.А. Ермаковой, J. Li, X. Zhang, W. Yang и др.

рассмотрены вопросы подготовки, транспортировки и сжигания топливных водоугольных суспензий, в том числе полученных из низкосортного углесодержащего сырья. В работах приведенных авторов отмечается, что характеристики процесса сжигания топливных суспензий существенно зависят от схемы организации процесса и свойств топливной смеси. Тем не менее, несмотря на большой опыт использования топливных водоугольных суспензий в Российской Федерации и за рубежом (Китай, Япония, США и др.), нерешенным остается ряд проблем, связанных с разработкой экологически эффективной и экономически выгодной технологии утилизации отходов углеобогащения.

Цель работы

Снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду от объектов размещения отходов обогащения угля путем внедрения комплекса технологических решений, направленных на их утилизацию.

Идея работы

Утилизацию отходов углеобогащения следует осуществлять путем получения из них топливных суспензий с дальнейшим сжиганием на энергогенерирующих объектах.

Основные задачи исследований

1. Анализ экологической обстановки, сложившейся под воздействием антропогенной нагрузки, в районах расположения объектов размещения отходов углеобогащения;
2. Оценка возможности использования отходов углеобогащения в качестве сырья для получения топливных суспензий;
3. Разработка испытательного стенда для проведения экспериментальных исследований по оценке концентраций компонентов газовых выбросов, образующихся при сжигании суспензионных топлив в зависимости от параметров процесса термической утилизации;
4. Разработка технологической схемы утилизации отходов углеобогащения в виде сырья для получения топливных суспензий.

Научная новизна

1. Установлены зависимости качественного и количественного состава отходящих газов от условий факельного сжигания и характеристик топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля;

2. Определены диапазоны технологических параметров процесса термической утилизации отходов углеобогащения по температуре сжигания, коэффициенту избытка воздуха и степени распыления топливных суспензий, позволяющие снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Основные защищаемые положения:

1. Снижение антропогенной нагрузки на компоненты окружающей природной среды от углесодержащих отходов зольностью не более 40 %, низшей удельной теплотой сгорания не менее 14 МДж/кг и содержанием летучих компонентов не менее 20 % обеспечивается путем их переработки в топливные водоугольные суспензии с дальнейшей термической утилизацией.

2. Процесс термической утилизации отходов углеобогащения обеспечивается за счет распыления топливных суспензий с содержанием твердого компонента 55 – 60 масс. % в топку котельного агрегата при помощи форсунки до капель размером менее 300 мкм с дальнейшим факельным сжиганием при температуре в зоне активного горения 950°C – 1050 °C и коэффициенте избытка воздуха 1,2 – 1,3.

3. Повышение теплотворной способности топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля до 11,0 МДж/кг без значительного снижения КПД котельного агрегата и экологических параметров термической утилизации, обеспечивается добавлением к ним 5 масс. % отработанного моторного масла.

Методы исследований

В качестве основных методов исследований применялись:

1. Системный анализ источников и факторов техногенного воздействия отходов углеобогащения на компоненты окружающей природной среды;

2. Аналитические и экспериментальные работы в лабораторных и полевых условиях с использованием базы научного оборудования Центра коллективного пользования Горного университета;

3. Изучение процессов горения топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля, на испытательном стенде при различных режимах.

Практическая значимость работы:

1. Разработке технологии утилизации отходов углеобогащения в виде топливных суспензий с получением наилучших энергетических и экологических характеристик при их сжигании;

2. Разработке комплекса инженерно-технических решений по утилизации отходов углеобогащения, обеспечивающий снижение техногенной нагрузки на компоненты окружающей природной среды;

3. Обосновании эколого-экономической эффективности метода утилизации отходов обогащения угля.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается представительным объемом экспериментальных данных и результатов лабораторных исследований образцов отходов углеобогащения в аккредитованных лабораториях с применением современного высокотехнологичного оборудования. Результаты исследований демонстрируют воспроизводимость и удовлетворительную сходимость с теоретическими исследованиями, а также согласуются и дополняют данные по снижению количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании топливных суспензий.

Апробация работы

Основные и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: ученых «Наука XXI века: новый подход» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), на научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), на международном симпозиуме студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова (г. Томск,

2016 г.; 2018 г.), на международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (г. Тула, 2017 г.), на X научно-практическом семинаре «Проблемы калориметрии сгорания твердых, жидких и газообразных топлив» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.), на 11-ой Российско-Германской сырьевой конференция «Rohstoff-Forum» (г. Потсдам, 2018 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач и разработке методик исследований; отборе проб отходов обогащения угля; проведении экспериментальных исследований по изучению влияния параметров приготовления и сжигания топливных суспензий на энергетические и экологические характеристики процесса термической утилизации отходов обогащения угля в лабораторных условиях; обосновании параметров термической утилизации; разработке технологической схемы использования отходов углеобогащения; оценке эколого-экономической эффективности предлагаемого мероприятия по утилизации отходов углеобогащения.

Реализация работы:

– разработанный комплекс инженерно-технических решений по утилизации отходов обогащения угля может быть использован при проектировании природоохранных мероприятий предприятия АО «Междуречье»;

– результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении лабораторных занятий по дисциплинам «Отходы горного производства» и «Горнопромышленная экология».

Публикации.

По теме работы опубликовано 10 печатных трудов, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 4 входящих в базу данных Scopus.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 197 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 40 таблиц, 64 формулы и список литературы из 183 наименований.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность профессору, д.т.н. М.А. Пашкевич за научное руководство работой. За помощь в проведении исследований автор благодарен заведующей лабораторией экологического мониторинга Санкт-Петербургского горного университета, к.т.н. М.А. Чукаевой. Искреннюю благодарность автор приносит сотрудникам кафедры геоэкологии и Центра коллективного пользования Горного университета.

Предполагаемое внедрение.

Разработанный способ утилизации отходов углеобогащения предназначен для предприятий по добыче и обогащению угля. Сжигание полученных водоугольных суспензий может осуществляться на энергогенерирующих объектах.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, СЛОЖИВШЕЙСЯ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

1.1 Угольная промышленность России

Угольная промышленность занимает одно из ведущих мест в экономике России и является важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса и сырьевой базой металлургии. Россия сегодня является одним из мировых лидеров по добыче и объемам доказанных запасов угля. На территории страны расположено 160,4 млрд тонн бурых и каменных углей (15,5 % от мировых запасов) [1].

Основная часть угольной промышленности России сосредоточена на территории следующих угольных бассейнов: Кузнецкий, Канско-Ачинский, Печорский и Донецкий (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Основные угольные бассейны России

Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 года, планируется снижение доли нефти и газа в потреблении топливно-энергетических

ресурсов и диверсификации энергетического баланса в направлении увеличения доли угля [2]. В связи с этим, тенденция к увеличению объемов добычи и производства угольного сырья будет сохраняться в ближайшем будущем.

Ежегодно в Российской Федерации возрастает количество добываемого угля. На рисунке 1.2 представлена добыча угля в России по основным месторождениям с 2013 по 2017 годы.

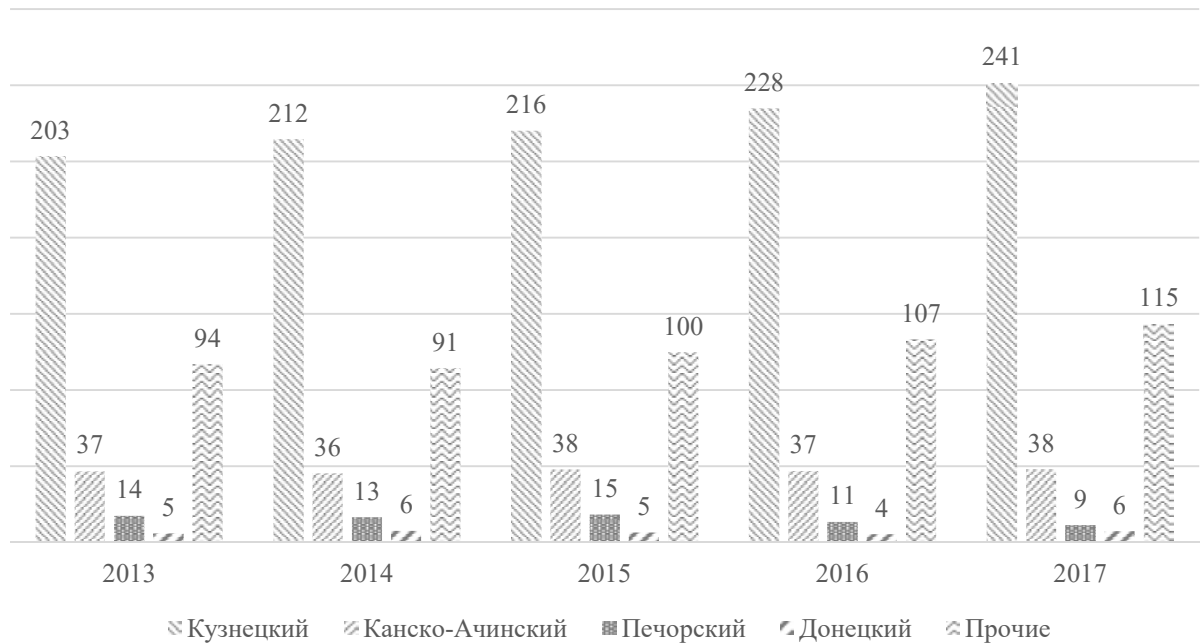


Рисунок 1.2 – Добыча угля по основным бассейнам России, млн тонн [3]

Наибольшим по добыче угля в России является Кузнецкий бассейн (рисунок 1.2), расположенный на территории Кемеровской области. С 2013 по 2017 годы объемы добычи угля в этом регионе увеличились более чем на 15 % (рисунок 1.2). Доля обогащаемого угля в России в 2017 году составила 69 % [3].

1.1.1 Добыча углей

Для добычи углей используются два основных способа, открытый и подземный. Оба способа приводят к изменению поверхности планеты путем образования техногенных форм рельефа: валов, выемок, карьеров, котлованов, насыпей, терриконов и т.д.

На сегодняшний день в России значительно преобладает разработка угольных месторождений открытым способом (рисунок 1.3). Это связано с более высокой скоростью добычи, экономичностью и относительной безопасностью для рабочих. Однако такой способ оказывает ощутимый вред компонентам окружающей природной среды. При открытой разработке месторождений, уголь содержит большое количество примесей и требует проведения дополнительных операций по его обогащению. Как видно из рисунка 1.3, в России количество угля, добываемого открытым способом, ежегодно возрастает. Такая тенденция сохранится и в ближайшей перспективе.

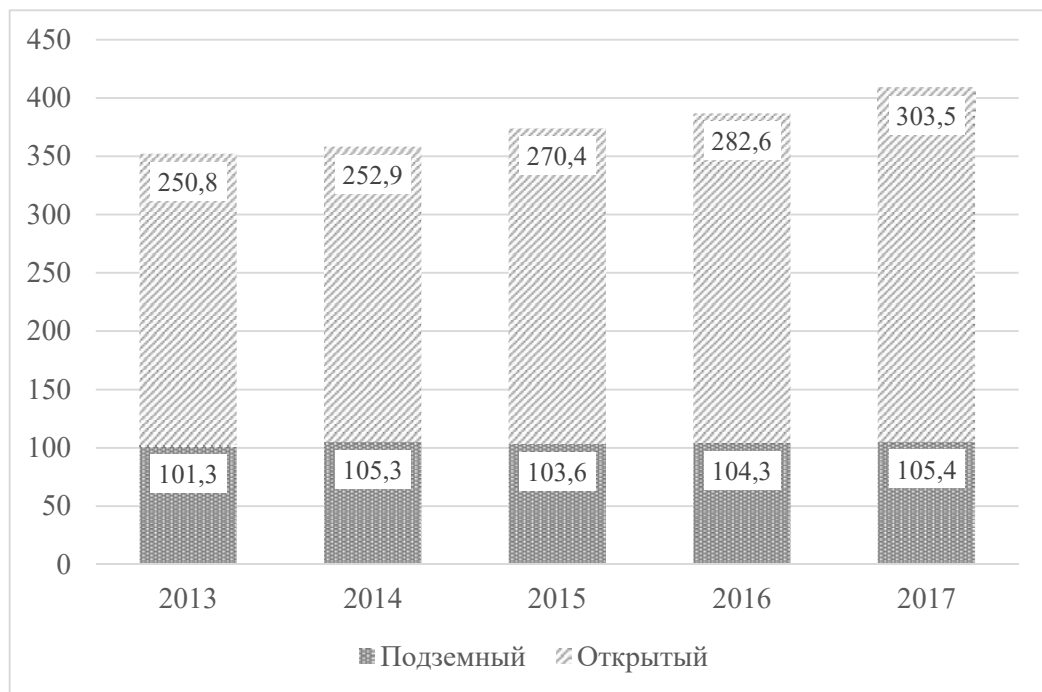


Рисунок 1.3 – Добыча угля в России открытым и подземным способами, млн тонн [3]

Значительное воздействие на состояние окружающей природной среды оказывают отходы, образующиеся при добыче и обогащении углей. К основным отходам производства при добыче углей относятся: отходы, полученные при проведении подготовительных выработок шахт, вскрышная порода разрезов и шахтная вода, а при обогащении – различные отходы обогащения, а также попутные продукты.

Порода, получаемая при проведении вскрышных работ, является самым объемным продуктом. Отвалы, образовавшиеся из вскрышной породы на угольных разрезах соизмеримы с природными горными структурами. Этот вид отходов с одной стороны засоряет земельные участки и водоемы под действием эрозии и занимает большие площади земель, а с другой стороны, как правило, не содержит в своем составе опасных компонентов.

Уголь, добываемый открытым способом, загрязнен частицами пустой породы и требует предварительного увеличения концентрации полезного компонента. Поэтому одним из основных видов отходов при производстве угля, являются отходы от обогащения, содержащие в своем составе мелкодисперсные частицы угля, пустой породы, а также флотационные реагенты.

Сегодня быстрыми темпами растет спрос высококалорийные угли. Это приводит не только к увеличению производительности существующих мощностей и ввод в строй новых предприятий по обогащению угля, но и образование большого количества отходов обогащения. Накопленный объем отходов углеобогащения в России на сегодняшний день оценивается в 120 млн тонн [5]. В связи с ухудшением условий добычи и качества углей, систематически увеличивается количество отходов, причем эта тенденция будет наблюдаться и в ближайшем будущем.

При переработке углей образуются обводненные шламы, кеки, флотхвосты и тонкие илы, в твердой части которых, кроме органического вещества, содержится от 20 до 80 масс. % минеральной части. Они также характеризуются высоким содержанием воды – до 95 масс. %, что затрудняет дальнейшее их использование [6].

Тонкодисперсные углесодержащие отходы, образующиеся на предприятиях по переработке угля, представлены шламами обогащения, отсевами, штыбами и т.д. Для улавливания и накопления таких отходов на обогатительных фабриках сооружаются земляные шламонакопители. Они занимают большие территории вокруг угольных предприятий и наносят вред компонентам

окружающей природной среды. Выход твердых отходов при обогащении углей составляет 0,15 – 0,35 тонн на одну тонну получаемого продукта [7].

Запасы отходов углеобогащения в настоящее время сопоставимы с запасами действующих месторождений, а их ежегодный прирост составляет десятки процентов от общего объёма добычи угля. По своим топливным характеристикам такие отходы часто не уступают добываемому минеральному топливу и могут использоваться для недорогой замены традиционных видов горючего. По этой причине в настоящее время наблюдается повышенный интерес к утилизации и переработке тонкодисперсных углеродсодержащих отходов [6, 8, 9,]. Эффективное решение утилизации уже накопленных и переработки ежегодно образующихся отходов углеобогащения позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду в зоне воздействия углеперерабатывающих предприятий и повысить ресурсосбережение на действующих обогатительных фабриках.

1.1.2 Обогащение углей

Уголь подразделяется на различные марки, ценность которых сильно отличается. По области применения все угли делятся на две большие группы, энергетические и коксующиеся. Также для различных углей будет отличаться и технологический процесс их обогащения.

К энергетическим углям относятся марки: Д (длиннопламенные), ДГ (длиннопламенные газовые), Г (газовые), СС (слабоспекающиеся), Т (тощие), Б (бурые) и А (антрациты). Как правило они используются в качестве энергетического топлива. Для слоевого коксования применяют угли следующих марок: К (коксовые), КЖ (коксовые жирные), Ж (жирные), ГЖ (газовые жирные), ОС (отощено-спекающиеся), Г (газовые), КС (коксовые слабоспекающиеся), КСН (коксовые слабоспекающиеся низкометаморфизованные), ДГ (длиннопламенные газовые), ТС (тощие спекающиеся) и СС (слабоспекающиеся). Они преимущественно используются в металлургии [10].

Помимо марок угля, на технологию и параметры обогащения будет оказывать существенное влияние степень его обогатимости. Обогатимостью угля называют его способность разделяться на продукты обогащения по заданным показателям качества. К продуктам обогащения относят: концентрат, промежуточный продукт и отходы обогащения. Показатель обогатимости исходного сырья вычисляют как отношение выхода промежуточных фракций к беспородной массе. В зависимости от величины показателя обогатимости, уголь относят к одной из четырех категорий (легкой обогатимости, средней, трудной или очень трудной) [11].

В настоящее время в мире существует большое количество способов обогащения полезных ископаемых. На рисунке 1.4 представлены существующие способы увеличения концентрации полезного компонента в исходном сырье.



Рисунок 1.4 – Способы обогащения полезных ископаемых [12]

Несмотря на высокое разнообразие представленных способов, широкое распространение для обогащения углей получили только некоторые из них, это методы гравитационного обогащения (обогащение в тяжелых средах и сухие методы), а также группа флотационных методов:

– Сухое обогащение. Отделение угля от пустой породы происходит посредством потока воздуха. С его помощью отделяются более лёгкие частицы примесей и остаётся более тяжёлые частицы угля. Этот способ получил распространение для обогащения бурых углей, однако в последнее время его начинают применять и для обогащения энергетических и коксующихся углей, поскольку данный способ обладает рядом достоинств: простота технологических схем, отсутствие водно-шламового хозяйства, а также небольшие капитальные и эксплуатационные затраты (примерно в 2 раза ниже чем при использовании мокрых способов) [13]. Сухое обогащение применяется нечасто, поскольку данный способ пригоден лишь при обогащении легкообогатимого угля с крупностью кусков не более 80 мм, при этом образуются большие объемы пыли, которую необходимо улавливать;

– Флотация углей является наиболее эффективным методом обогащения угольных шламов. Пенная флотация заключается в том, что в аэрированной пульпе при непрерывном подъеме пузырьков воздуха наверх, происходит избирательное прилипание к ним угольных частиц и их вынос на поверхность, где образуется флотационная пена. Частицы породы, смоченные водой, к пузырькам воздуха не прилипают. Они остаются в пульпе и опускаются вниз. Пенная флотация применяется для обогащения шлама с размером частиц менее 0,5 мм [14];

– Обогащение в тяжелых средах основано на том, что уголь и минеральные примеси имеют разную плотность. Если погрузить их в среду имеющую промежуточное значение плотности (наиболее часто применяются водные суспензии с мелкодисперсной фракцией магнетита), то уголь всплывет наверх, а пустая порода осядет на дне. Также нередко угли обогащают в специальных аппаратах с тяжелыми средами [14].

На большинстве обогатительных фабрик комбинируют разные способы обогащения. На рисунке 1.5 представлена упрощенная типичная схема обогащения каменных углей.

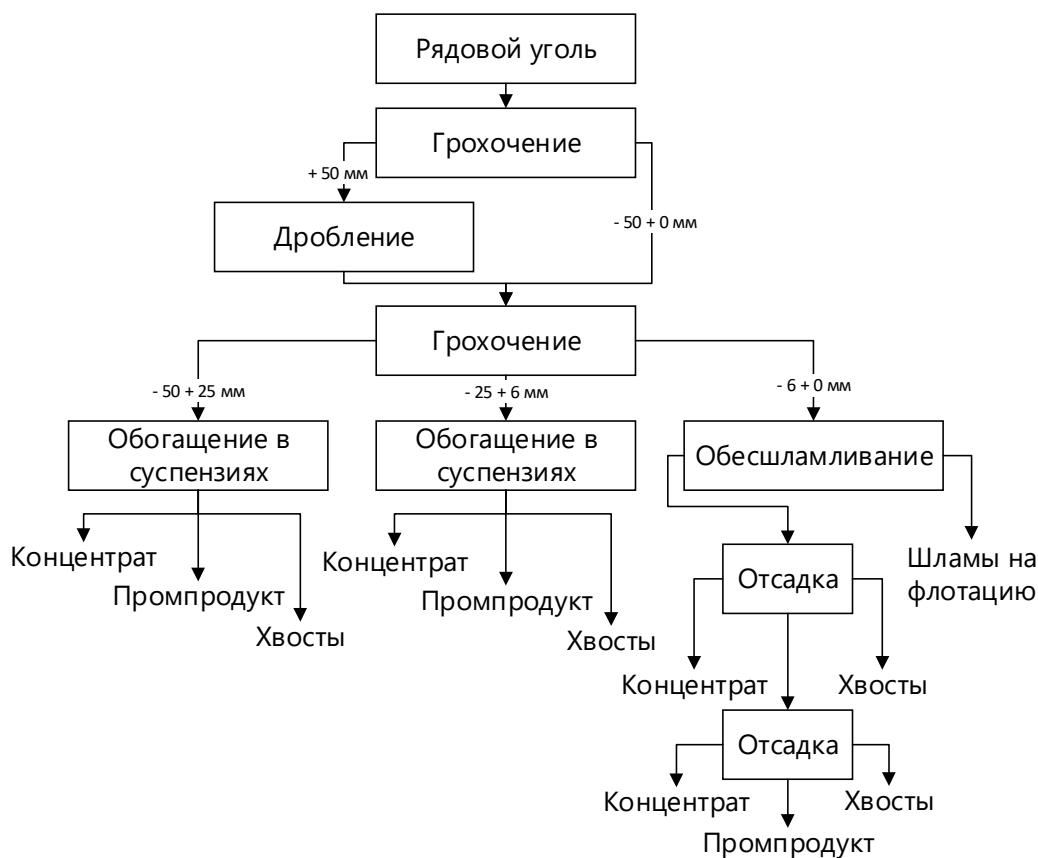


Рисунок 1.5 – Упрощенная типичная схема обогащения углей

Обычно на обогатительных фабриках в России комбинируют обогащение в тяжелых средах и флотацию. Например, технологическая схема обогатительной фабрики «Междуреченская» предназначена для увеличения концентрации полезного компонента как в коксующихся, так и в энергетических углях и позволяет проводить обогащение углей марок «КС», «ОС», «Т», «А» и др. Добываемые на разрезе угли имеют разную степень обогатимости – от легкой до очень трудной. Для углей трудной и очень трудной категорий обогатимости предусмотрено обогащение в тяжелых средах в две стадии, с выделением концентрата, промпродукта и отходов. Обогащение углей легкой категории обогатимости происходит в одну стадию, с разделением на концентрат и отходы [15].

Для «тонких» шламов коксующихся углей на фабрике предусмотрена стадия флотации. При таком обогащении всего объема шламов, потери высококачественного и дорогостоящего коксового концентрата сводятся к минимуму, что позволяет улучшить экономические показатели работы.

При обогащении углей в жидких средах, предприятия имеют водно-шламовое хозяйство, отходами в котором являются сливы обезвоживающих, обесшламливающих, промывочных аппаратов, хвосты обогащения и др. [16].

Отходы углеобогащения, состав которых обычно не оценивается на предприятиях, представляют собой источники загрязнения компонентов окружающей среды. Они оказывают значительное и длительное по времени негативное воздействие на поверхностные и подземные воды, почвенно-растительный покров и на состояние атмосферного воздуха [17]. Накопление таких отходов выводит из эксплуатации значительные территории других хозяйственных назначений. Кроме того, на некоторых фабриках отходы, образующиеся при обогащении угля, складировать совместно с вскрышными и вмещающими породами от основного производства, что может привести к возгоранию отвалов.

1.2 Воздействие отходов углеобогащения на гидросферу

Во время обогащения углей на предприятиях образуется большое количество жидких отходов, это сливы обезвоживающих, обесшламливающих, промывочных аппаратов, хвосты обогащения и др. Предварительное накопление таких отходов осуществляется в земляных шламонакопителях, которые часто не защищены от инфильтрации и являются постоянным источником загрязнения грунтовых вод. Также земляные шламонакопители не защищены от переливов и загрязненные воды попадают в природные водоемы и водотоки во время таянья снега и загрязняют их частицами взвешенных веществ (угля и пустой породы), флотационными реагентами, а также ионами металлов.

Жидкая фаза отходов углеобогащения, составляющая 70 – 95 масс. %, представлена, как правило, шахтной, скважинной или речной водой, а твердая составляющая содержит в своем составе частицы минерального и органического происхождения. В твердой фазе количество частиц крупностью не более 50 мкм составляет 80 – 95 %. Такие мелкодисперсные частицы имеют малую гидравлическую крупность и, как следствие, продолжительное время остаются во взвешенном состоянии [18].

Помимо твердых частиц в сточных водах содержатся растворенные минеральные соли, которые представлены хлоридами, нитратами, нитритами, сульфатами, карбонатами и др. В сточных водах углеобогащительных фабрик минерализация находится в пределах 1600 – 4000 мг/дм³, а ионный состав (мг/дм³) характеризуется следующими концентрациями: K⁺, Na⁺ – 269,7 – 716,9; Ca²⁺ – 108,2 – 368,7; Mg²⁺ – 46,3 – 169,0; Cl⁻ – 215,4 – 444,5; SO₄²⁻ – 793,2 – 2376,0; HCO₃⁻ – 109,8 – 292,0 [19].

Угли обладают высокой сорбционной способностью и накапливают тяжелые металлы. Их концентрации в углях могут значительно превышать среднее содержание в земной коре и осадочных породах [20]. При обогащении часть этих металлов под воздействием воды и поверхностно-активных веществ десорбируется из угля в флотационные воды. По этой причине после обогащения углей в стоках может быть превышено содержание железа, меди, никеля, цинка, свинца, кобальта, кадмия, сурьмы, ртути и других тяжелых металлов [16].

Кроме того, в сточных водах после обогащения углей содержатся флотореагенты, которые частично растворены в воде и частично сорбированы на взвешенных веществах.

В качестве реагентов флотации угля применяются продукты переработки нефти (керосин, нефть, контакт Петрова, соляровое масло, керосино-газойливая фракция и т.д.), а также компоненты коксования угля, такие как каменноугольные смолы, масла коксохимического производства, фенолы, антраценовое масло и др.

Концентрации примесей, содержащихся в водах после флотации многократно, превышают предельно допустимые концентрации для водоемов культурно-бытового и хозяйственно-питьевого назначения. При попадании в водные объекты загрязняющие компоненты наносят существенный вред гидробионтам и растениям, а также негативно влияют на процессы естественного самоочищения водных объектов.

Всего при добыче и обогащении углей в 2016 году в Российской Федерации в водные объекты было сброшено 437,6 млн м³ сточных вод, что составляет 1,14 м³ на одну тонну добытого угля. Из них всего 77,3 млн. м³ было нормативно очищено, а 27,1 млн. м³ были нормативно чистыми без очистки. Остальные 333,2 млн. м³ сточных вод были загрязненными различными компонентами [10].

Согласно ежегодному государственному докладу о состоянии и об охране окружающей природной среды, качество питьевой воды в главном угледобывающем регионе, в Кемеровской области, было оценено как неудовлетворительное. Это привело к увеличению числа случаев заболеваний органов пищеварения, кроветворных органов, а также отдельных нарушений, связанных с иммунным механизмом [21].

1.3 Воздействие отходов обогащения угля на почвенно-растительный покров

Причиной негативного воздействия накопленных отходов обогащения угля на состояние окружающей природной среды в районах их расположения, является ветровая эрозия [22]. При эксплуатации отвалов происходит гравитационное разделение складированной породы, в результате которого крупные обломки накапливаются у подножья, а более мелкие куски отходов остаются в средней части и у вершины отвалов [23]. В свою очередь, эоловые процессы приводят к разрушению крупных частиц и к выдуванию тонкодисперсных частиц горных пород. Попадая на поверхность прилегающей к отвалам почвы,

мелкие частицы угля и пустой породы загрязняют и засоряют её. Они оказывают механическое воздействие, препятствуя вегетации растительности, а также под влиянием влаги, попадающей в почву с осадками, вступают в химические и физико-механические реакции. При этом в почву из отходов углеобогащения могут попадать и накапливаться в ней углеводороды, тяжелые металлы, растворенные минеральные соли и др. Негативным результатом этих процессов являются деградация растительности, а иногда и её полное уничтожение. В работе [24] отмечается значительное увеличение концентрации тяжелых металлов, таких как медь, цинк, свинец, кобальт и кадмий в почвах, находящихся в зоне влияния хранилищ отходов добычи и переработки угля в сравнении с фоновыми участками. Автор работы [25] рассматривает загрязнение почв органическими соединениями, и отмечает значительное увеличение дибензо(а,һ)антрацена, флуорантена, бенз(а)пирена и других компонентов в почвах, прилегающих к территориям земляных шламонакопителей, содержащих отходы обогащения углей.

Отходы углеобогащения подвергаются водной эрозии под воздействием атмосферных осадков. Результатом этого процесса является вынос горных пород в окружающую среду. Ежегодно с одного гектара поверхности отвалов может смываться до 900 м³ породы [22]. При водной эрозии мелкие частицы вымываются из тела объекта по размещению отходов и выносятся на близлежащие территории. Водные потоки, образующиеся на склонах отвалов, попадают на прилегающие к ним земли. При этом происходит почвенная эрозия, приводящая к их засорению и загрязнению, а иногда и к полному разрушению плодородного слоя.

Согласно данным Росреестра по состоянию на 01.01.2017, в Кемеровской области наблюдается одна из наибольших площадей нарушенных земель по РФ – 79,1 тыс. га.

1.4 Воздействие отходов углеобогащения на атмосферный воздух

После удаления избыточной влаги отходы флотации угля транспортируют и складировуют в отвалах. В Кемеровской области отвалы угольных предприятий занимают около 40 тыс. га [26].

Воздействие на поверхность породных отвалов температуры, осадков, ветра, тепла, излучаемого в результате окисления угля и углекислых пород, приводит к эрозии и разрушению крупных кусков до размеров менее 0,1 мм. В сухую погоду эти частицы сдуваются ветром с отвалов и переносятся на значительные расстояния, загрязняя атмосферный воздух. Авторами работы [27] было установлено, что концентрация пыли на расстоянии 150 м от отвалов при скорости движения ветра 3 – 3,5 м/с составляет 10 – 15 мг/м³, что превышает ПДК_{мр} для населенных мест в 100 раз [28].

Особую опасность при накоплении отходов углеобогащения представляет возгорание отвалов, поскольку в результате горения выбрасывается большое количество загрязняющих веществ, таких как оксиды серы и азота, угарный и углекислый газы, сероводород, а также летучие соединения мышьяка, кадмия, ртути, и др.

Авторами работы [29], отмечается высокое содержание в выбросах от горящих отвалов углеводородов, в том числе кислородсодержащих, таких как фенолы, алкилпроизводные бензофурана и дибензофурана. Наибольшие концентрации в выбросах зафиксированы для легких соединений – алкилнафталинов или алкилфенантронов. Авторы работы связывают это с процессами пиролиза углей, которые не были подвержены выветриванию и вымыванию.

Самовозгорание отвалов обусловлено рядом факторов, первым из которых является свободный доступ кислорода внутрь тела отвала. Для уменьшения доступа кислорода в отвал породы уплотняют, уменьшая количество межобломочного пространства. Дифференциация обломков породы в отвале происходит на первом этапе их формирования. При сбросе отходов с грузового транспорта, доставляющего их на место размещения, крупные обломки, из-за

большого веса, оказываются в нижних частях отвала. Последующее уплотнение пород не всегда позволяет устранить полости у подножья, поэтому воздух легко проходит внутрь. Часто из-за недостаточного или не повсеместного уплотнения самовозгорание возникает даже на спланированных отвалах с пологими склонами [30].

Вторым фактором, стимулирующим самовозгорание, автор работы [26], называет протекание в теле отвалов окислительных процессов, в результате которых выделяется тепло, способствующее разогреву пород. Возгорание происходит в случаях, когда скорость образования тепла при окислении вещества превышает скорость его рассеяния. Источником тепла может являться взаимодействие между углем и кислородом, процессы увлажнения и высыхания, скрытое тепло водяного пара. Однако, тепло, поступающее при окислении неорганической составляющей углей, может быть основным фактором для достижения температуры, необходимой для самовоспламенения.

В углях Кемеровской области содержится небольшое количество серы около 0,6 % [26], поэтому ее окисление не играет существенной роли в возникновении очагов самовозгорания. Основной причиной самовозгорания в данном случае автор работы называет высокую концентрацию тонкодисперсных угольных частиц в теле отвала, окисление которых происходит с выделением тепла.

Экзотермические процессы, характерные для угля, усиливаются на мелких частицах, из-за большой площади поверхности, доступной для окисления. В отвалах углистый материал находится в раздробленном и измельченном состоянии, поэтому угольные отвалы больше подвержены самовозгоранию, чем исходный уголь.

Согласно теории самовозгорания угольных отвалов, предложенной в работе [31], окисление угля происходит в несколько стадий:

– физическая сорбция кислорода с выделением тепла и последовательное увеличение температуры;

- химическая сорбция при температурах от 50 °С, продуктом которой являются в том числе кислородсодержащие углеводороды;
- разрушение кислородсодержащих углеводородов, при «температуре самонагревания» (в большинстве случаев около 70 °С). Высвобождающийся кислород окисляет еще неизменное вещество углей;
- самовозгорание происходит, при росте температуры до 150 °С. Если воспламенение произошло, то температуры могут быстро достичь 1000-1300 °С.

Тушение породных отвалов является длительным, трудозатратным и дорогостоящим мероприятием.

Объемы выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в Кемеровской области в 2017 г составили 1487,6 тыс. т. Наибольшее количество выбросов, 62 %, в этом регионе приходится на предприятия угольной промышленности.

Смертность населения от болезней органов дыхания имеет устойчивую связь с загрязнением атмосферного воздуха оксидами азота, пылью, формальдегидом, оксидами азота, фтором и его соединениями, фенолом, аммиаком и другими соединениями. В Кемеровской области в 2017 г. от болезней органов дыхания умерло 53,8 человека на 100 000 жителей. Это значение заметно выше чем в среднем по России (41,3 человека на 100 000 жителей).

В городах Кемеровской области регулярно наблюдаются превышения ПДК по органическим соединениям в атмосферном воздухе. В частности, в 2016 г. в Кемерово было зарегистрировано превышение ПДК_{мр} по бенз(а)пирену в 13,9 раз [21]. Это вещество относится к первому классу опасности, является канцерогеном и опасно даже в малых концентрациях. Смертность от новообразований по Кемеровской области составляет 236 человек на 100 000 жителей. Это также выше чем в соседних регионах и в среднем по России (196,9 человек на 100 000 жителей).

Согласно данным, представленным в отчете о состоянии окружающей природной среды, уровень загрязнения атмосферного воздуха в городах Кемеровской области, таких как Кемерово, Новокузнецк, Прокопьевск, характеризуется как высокий и очень высокий [21].

Для снижения пыления и риска возгорания отвалов и, как следствие, эмиссии большого количества загрязняющих веществ, следует сократить количество тонкодисперсных угольных частиц в объектах размещения отходов. Для решения данной проблемы следует внедрять технологии утилизации отходов углеобогащения (штыб, полукоксовую и коксовую мелочь, шламы обогащения углей и др.), поскольку именно они содержат большое количество угольных частиц малых размеров.

1.5 Анализ существующих способов утилизации отходов углеобогащения

Отходы углеобогащения значительно различаются по своему химическому составу. В наибольшей степени колеблются показатели зольности и содержание углерода. Эти колебания определяются составом исходного сырья, уровнем технологического обеспечения и схемой обогащения, используемой на обогатительной фабрике [32]. Средний состав отходов углеобогащения, а также их технические характеристики для различных предприятий представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав и основные характеристики отходов флотации угля

Основные горючие элементы, %					Основные технические характеристики		
С	О	Н	N	S	A, %	Q, МДж/кг	V _г , %
15,4 – 72,2	1,0 – 14,6	1,1 – 4,2	0,3 – 2,0	0,1 – 3,2	24,5 – 85,7	4,3 – 21,4	24,1 – 43,4

Состав отходов может колебаться даже для одного предприятия в течении суток. Это также осложняет утилизацию такого типа отходов.

Помимо этого, затрудняет утилизацию отходов углеобогащения их высокая обводнённость (80 – 95 %). Практически ни один из разработанных методов утилизации не позволяет их использовать без предварительного высушивания. Для применения большинства способов необходимо удаление избыточной влаги, что будет приводить к увеличению стоимости внедрения мероприятий по переработке отходов углеобогащения.

В настоящее время вопросами утилизации тонкодисперсных угольных частиц занимаются многие специалисты как за рубежом, так и в России. Накоплен опыт подготовки и использования тонкодисперсных угольных отходов. Разработаны различные методы их переработки, большинство из которых рассматривает использование отходов обогащения угля в качестве топлива [33 – 37].

Отходы, содержащие достаточное количество горючих компонентов, могут дополнительно проходить стадию обогащению для получения кондиционного топлива или использоваться для газификации или сжигания. Сжигание высокотеплотных отходов может осуществляться в топочных устройствах с кипящим слоем, в печах для пылеугольного сжигания, в плазменных печах и на других установках. В ряде стран применяются электростанции, где утилизируют высокотеплотные отходы углеобогащения пылеугольным сжиганием. Также весьма распространены и изучены способами дальнейшего использования таких отходов является их окучивание с дальнейшим сжиганием и утилизация на энергогенерирующих предприятиях в виде водоугольных и органоводоугольных суспензий.

При недостаточном содержании горючей массы в составе отходов, авторы работ [38, 39] предлагают их использование в качестве добавки для производства керамики, а в работах [40, 41] изучено использование таких отходов в качестве добавки к асфальтам и бетонам.

1.5.1 Брикетирование

Брикетирование – это процесс переработки исходного сырья с получением одинаковых по размерам, массе и форме кусков топлива. Брикетированию подвергаются бурые угли, торф, мелкодисперсные каменные угли и антрациты, коксовая мелочь, отходы обогащения углей и др. [42].

В сравнении с обычным топливом, брикеты имеют более высокие теплотехнические характеристики по калорийности, полноте сгорания, транспортабельности и обладают меньшей склонностью к выветриванию и окислению.

Существуют два способа брикетирования углей: с добавкой связующих веществ при малых давлениях прессования (150 – 250 кгс/см²) и без связующих, при высоком давлении прессования (свыше 800 кгс/см²). Окускованию без связующих подвергают торф и молодые (мягкие) бурые угли; со связующими брикетируют мелочь каменных и старых (твердых) бурых углей, антрацитовый штыб, коксовую и полукоксовую мелочь.

При промышленном изготовлении топливных брикетов из каменного угля, в качестве связующей добавки обычно используются следующие вещества: нефтебитум, лигносульфонаты, меласса, жидкое стекло, каменноугольная смола, а также другие органические соединения.

Отходы углеобогащения после удаления избыточной влаги, при достаточной удельной теплоте сгорания, подвергаются брикетированию с использованием связующих компонентов. На рисунке 1.6 представлена упрощенная схема брикетирования отходов обогащения угля со связующими после удаления избыточной влаги.

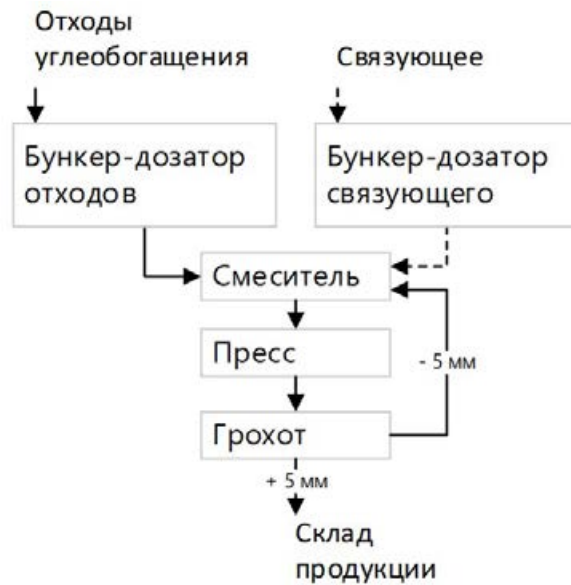


Рисунок 1.6 – Упрощенная схема брикетирования отходов углеобогащения со связующими компонентами

Основу структурообразования при брикетировании составляют процессы взаимосвязи отдельных элементов системы и их взаимного расположения. Прилипание является начальной стадией процесса склеивания и связано с образованием упорядоченной пленки связующего на поверхности твердых измельченных частиц [43]. Структурообразующие процессы брикетирования со связующими компонентами определяются физико-химическими явлениями на границе раздела твердой и жидкой фаз в момент их объединения. Они существенно зависят от давления прессования смеси и условий контактирования твердых частиц, покрытых пленкой связующего. Формирование брикетов следует рассматривать как склеивание связующими компонентами разрозненных твердых частиц. Оно протекает в несколько отдельных стадий, характерных для любого процесса склеивания. На первой стадии жидкое связующее наносят на твердые частицы. Затем, на второй стадии, их переводят в вязкотекучее состояние. На третьей стадии соединяют комплексы прессованием. И, на четвертой стадии, при охлаждении брикетов, связующие переводят в твердое состояние. Для каждой стадии процесса структурообразования характерны специфические особенности и определенные требования. Брикет, полученный с

использованием связующих компонентов можно рассматривать как дисперсную систему, где дисперсной фазой является полезное ископаемое, а средой – связующее вещество [44].

Брикетирование как способ утилизации отходов переработки угля является достаточно изученным. В работах [45 – 47] подробно рассмотрены зависимости прочности брикетов от качественного и количественного состава связующих компонентов, параметры брикетирования, а также экономические выгоды от внедрения подобных мероприятий на действующих предприятиях.

Брикетирование позволяет перерабатывать большое количество отходов обогащения угля при достаточном содержании горючей массы. Для утилизации отходов углеобогащения данный способ может применяться только после предварительного концентрирования угольных частиц и удаления избыточной влаги. Переработка отходов таким способом позволяет снизить нагрузку на окружающую среду за счёт сокращения количества образующихся отходов. Однако такой способ не позволяет существенно сократить количество выбросов загрязняющих веществ при сжигании на энергогенерирующих предприятиях.

1.5.2 Газификация

Газификация – это высокотемпературный процесс взаимодействия органической составляющей топливно-энергетических полезных ископаемых или продуктов их переработки с воздухом, водяным паром, кислородом, углекислым газом или их смесями, в результате которых органическая составляющая превращается в жидкие и газообразные продукты. При этом протекают сложные гетерогенные процессы взаимодействия углерода твёрдой фазы с газифицирующими агентами [48]. На рисунке 1.7 представлена упрощенная схема пиролиза отходов обогащения угля.

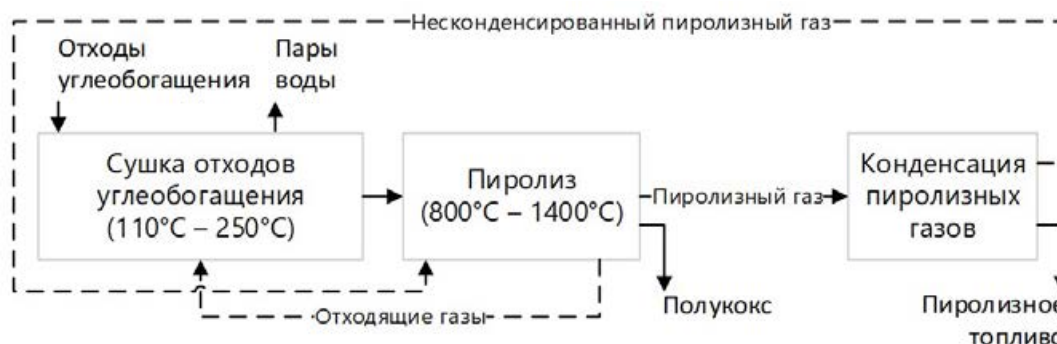


Рисунок 1.7 – Упрощенная технологическая схема переработки отходов углеобогащения способом пиролиза

Достоинствами получаемого при газификации газообразного и жидкого топлива, получаемого после переработки отходов углеобогащения способом газификации, является:

- удобство перемещения на большие расстояния;
- малое количество загрязняющих веществ, образующихся при сжигании продуктов газификации;
- возможность полной автоматизации процесса.

Помимо этого, продукты пиролиза являются сырьём для химической промышленности и могут применяться для производства искусственных жидких топлив, масел, синтеза аммиака, смазок и др. В качестве сырья для пиролиза и газификации могут быть использованы практически все углеродсодержащие материалы.

Как правило, на практике газификации и пиролизу подвергают угли с высоким содержанием гетероатомов, а именно бурые и низкометаморфизированные марки каменных углей, при температурах 1000 – 1400 °С. В таких условиях реакциям газификации предшествует пиролиз угля с выделением газообразных веществ и образованием коксового остатка. Газифицирующие агенты (воздух, водяной пар, кислород, углекислый газ или их смеси) после этого реагируют с продуктами пиролиза и частицами кокса. Состав получаемых продуктов обычно рассчитывается упрощенным методом по известному составу исходных веществ, при соответствующей температуре газификации [49].

Использование процессов газификации и пиролиза для утилизации отходов углеобогащения осложнено рядом факторов:

- высокая обводненность исходного сырья. Для реализации такого способа необходимо предварительное удаление избыточной влаги, что приведет к существенному увеличению стоимости такой переработки;
- низкая эффективность такого способа переработки, поскольку в отходах обогащения углей низкое содержание летучих веществ из-за процессов их вымывания при долгом нахождении в воде при обогащении;
- большое количество некондиционных высокосольных отходов, образующихся после пиролиза;
- сложность использования полученных продуктов пиролиза. В составе отходов содержатся угли разной степени метаморфизма, а для разных углей процессы, происходящие при одной температуре существенно различаются. Это приведет к более сложному составу получаемых продуктов, что затруднит их дальнейшее использование [50].

1.5.3 Получение водоугольных и органоводоугольных суспензий с дальнейшим сжиганием

Наиболее перспективным способом утилизации отходов обогащения угля на сегодняшний день является их переработка в водоугольные (ВУС) и органоводоугольные суспензии (ОВУС) с дальнейшим сжиганием на энергогенерирующих установках.

Исследования особенностей применения угольных суспензий в энергетике начались в конце 50-х годов двадцатого века. В период с 50-х до 70-х годов появились работы, в которых были рассмотрены вопросы трубопроводной транспортировки угля в виде водоугольных суспензий, а также эффективные условия их сжигания [51 – 56]. В период с 70-х по 90-е года исследования в области воспламенения и горения водоугольных топливных композиций раз-

вивались быстрыми темпами. Появлялись публикации, посвященные распылению, газификации, сжиганию топливных суспензий, использованию в двигателях, а также влиянию различных добавок на топливные и реологические характеристики угольных суспензий [57 – 63]. Такие исследования проводились во многих странах с развитой угольной промышленностью: в США, СССР, Германии, Японии, Италии, Китае, Канаде и др. Интерес к использованию топливных водоугольных суспензий в энергетике был вызван «нефтяным кризисом» и обострившейся ситуацией на мировом рынке энергоносителей, подтолкнувшим государства на формирование новых подходов использования энергетических ресурсов. Уголь, в отличие от других широко используемых в энергетике полезных ископаемых (нефти и газа), является наиболее распространённым и доступным. По этой причине в то время топливные суспензии рассматривались как замена нефтепродуктам [64, 65].

За последние 20 – 25 лет совершенствовались способы транспортировки и промышленного сжигания топливных суспензий. Наибольшими темпами технологии использования водоугольных суспензий в этот период развивались в Китае. Сейчас там ежегодно используется около 50 – 70 млн т. водоугольного топлива. К 2020 году ежегодное производство этого вида топлива планируется увеличить до 100 млн т. Топливные водоугольные суспензии также активно применяются для сжигания в промышленных энергоустановках на территории Японии. В последнее время там ежегодно сжигается примерно 800 тыс. тонн топливных суспензий [66].

В настоящее время, особый интерес вызывает теория горения топливных водоугольных и органоводоугольных суспензий, а также возможность управления процессом горения в широких диапазонах за счёт регулирования параметров их приготовления и сжигания и, как следствие, возможность снижения количества загрязняющих веществ в отходящих газах и получение наилучших энергетических показателей при утилизации отходов углеобогащения таким способом.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, представленным в работах [67 – 72], процесс возгорания капли суспензии включает четыре стадии: испарение влаги, термическое разложение угля, горение летучих компонентов, зажигание коксового остатка.

В работах [71, 74] установлено, что при увеличении температуры капля водоугольного топлива существенно изменяется: влага испаряется, летучие газообразные вещества выделяются в топочную камеру, часть угольных частиц диспергируется за счёт эффекта микровзрывов, а прогоревшие капли образуют агломерат. На первом этапе из приповерхностного слоя капли испаряется влага, ее размер немного уменьшается; затем капля топлива начинает быстро увеличиваться в размерах за счет выхода летучих компонентов. В соответствии с гипотезой, предложенной в работе [74], зажигание капли топлива происходит после испарения воды из поверхностного слоя. В этой работе также было установлено, что горение газовой смеси в окрестности капли прогревает углеродсодержащий остаток до температуры, при которой происходит его воспламенение. Авторы заключили, что использование углей с высоким содержанием летучих компонентов в составе топливных суспензий приводит интенсификации процесса горения газовой смеси в окрестности капли, и, как следствие, к ускорению зажигания коксового остатка.

Большое внимание в работах по теории горения водоугольного топлива уделено эффекту «микровзрывов» (рисунок 1.8), возникающему при быстром нагревании капель топливных суспензий [71, 74]. Было установлено, что при нагревании в капле образуются поры из-за резкого выброса летучих компонентов угля и паров воды.



Рисунок 1.8 – Образование «микровзрывов» при нагревании капли водоугольного топлива [75]

При возникновении эффекта «микровзрывов» площадь поверхности суспензии значительно возрастает, что интенсифицирует зажигание и дальнейшее горение капель топлива. Кроме того, согласно работам [73, 75], высокое содержание летучих компонентов в углях, входящих в состав топливных суспензий, способствует возникновению эффекта «микровзрывов», в то время как угли с низким содержанием летучих в составе суспензий усиливают агломерирование капель при их нагревании [76].

При взаимодействии разогретого окислителя с каплей суспензии, её температура быстро возрастает. Это приводит к испарению воды из поверхностного слоя, а также к выделению летучих компонентов из угля из-за чего происходит ее зажигание. Теплота, выделяющаяся при горении летучих, прогревает и воспламеняет углеродистый остаток. Выгорание углерода является наиболее длительной стадией и может занимать до 90% от времени нахождения

ния капли в топке котельного агрегата [77]. Несмотря на общий механизм горения суспензий, продолжительность отдельных стадий будет существенно отличаться для углей разной степени метаморфизма.

Теория горения топливных водоугольных суспензий, разработанная в трудах [67, 73, 75, 78] позволяет управлять процессом сжигания топливных суспензий и выбирать такие параметры, которые позволяют минимизировать опасность от выбросов загрязняющих веществ при утилизации отходов обогащения угля.

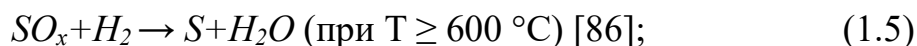
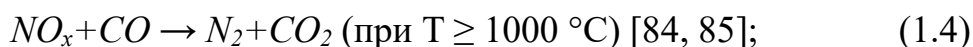
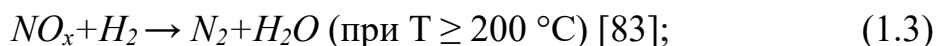
В работе [79] выявлено, что при сжигании топливных водоугольных суспензий концентрация оксидов серы и оксидов азота снижается на 20 – 75 % по сравнению со сжиганием угля. При горении водоугольных суспензий наблюдается несколько эффектов, существенно влияющих на образование оксидов серы и азота:

- благодаря присутствию в композиционном топливе воды, температура и скорость горения снижаются, что приводит к уменьшению количества выбросов NO_x и SO_x [80, 81].

- взаимодействие капель водоугольных суспензий с разогретым воздухом сопровождается процессом испарения воды. Образующиеся пары в ходе термического разложения под действием высоких температур высвобождают молекулы кислорода и водорода [82]:



Кислород, образовавшийся в ходе реакции, интенсифицирует процесс горения, а водород в качестве восстановителя способствует снижению количества оксидов азота и серы в составе отходящих газов:



Снижение выбросов NO_x и SO_x в случае сжигания водоугольных топлив обусловлено соответствующими химическими реакциями, в которых участвует вода.

В работе [79] отмечается, что присутствие водной фазы в составе суспензии является также причиной снижения недожога топлива. Наличие перегретого пара в зоне активного горения приводит к более тонкому распылению капель за счет эффекта «микровзрывов» при сжигании суспензионных топлив.

Для использования отходов углеобогащения в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий на предприятиях в работе [88] предложена система их подготовки, представленная на рисунке 1.9.

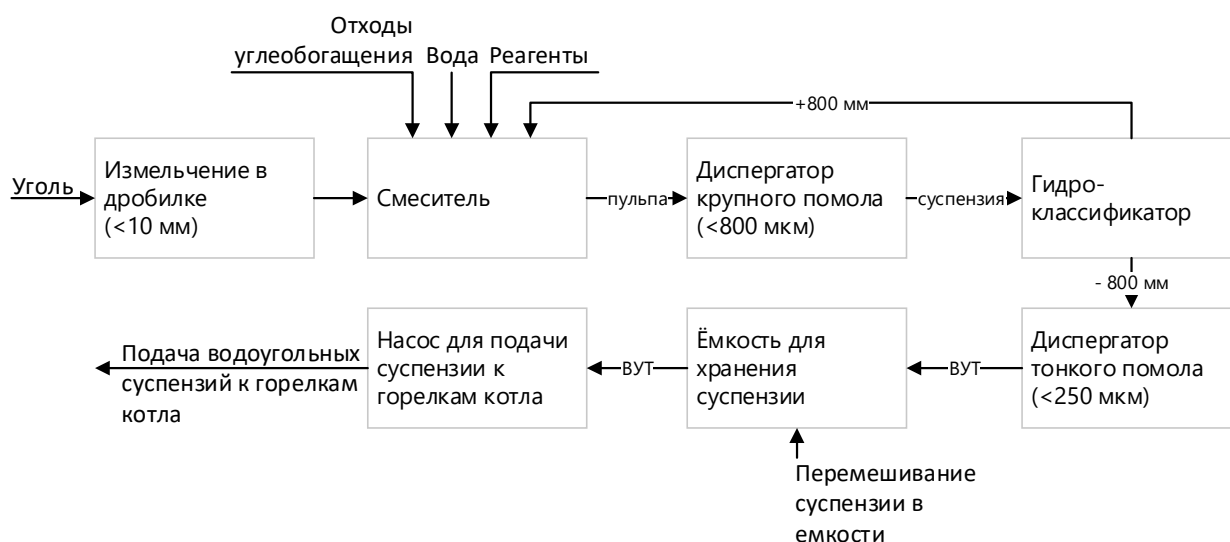


Рисунок 1.9 – Схема подготовки водоугольного топлива

Переработка отходов углеобогащения в топливные водоугольные суспензии (рисунок 1.9) включает в себя большее количество стадий в сравнении с брикетированием (рисунок 1.6) и газификацией (рисунок 1.7), однако, такой способ утилизации позволяет использовать отходы без удаления избыточной влаги, а также существенно снизить выбросы загрязняющих веществ при сжигании.

В работах [89, 90] отмечается, что технологии переработки угля и отходов углеобогащения в топливные суспензии обеспечивают высокую взрыво- и

пожаро- безопасность при их приготовлении, транспортировании, хранении и использовании.

Авторы многих работ [79, 91, 92], в которых изучаются выбросы загрязняющих веществ при сжигании водоугольных и органомоугольных топливных композиций, отмечают существенное снижение выбросов загрязняющих веществ в отходящих газах в сравнении со слоевым сжиганием угля по основным компонентам.

На основании анализа результатов рассмотренных исследований, можно сделать вывод о перспективах утилизации широкого класса углесодержащих отходов (отходы обогащения углей, золошлаковые отходы и др.) в составе водоугольных топливных композиций. Имеющиеся данные о зависимости токсичности выбросов от параметров сжигания и приготовления водоугольных и органомоугольных суспензий представлены для статических условий сжигания. Малоизученным остается влияние на качественный и количественный составы отходящих газов параметров утилизации отходов углеобогащения при факельном сжигании. Очевидна необходимость установления зависимости количества загрязнителей в выбросах от различных параметров при сжигании и приготовлении водоугольных суспензий при факельном режиме работы котельного агрегата, поскольку именно он является наиболее распространенным для сжигания топливных композиций в настоящее время.

Выводы по первой главе

1. Установлено, что в настоящее время на территории России накоплено более 120 млн тонн отходов углеобогащения. Тенденция к ежегодному увеличению объемов образования таких отходов будет сохраняться в ближайшей перспективе.
2. Выявлены основные экологические проблемы, связанные с негативным воздействием отходов обогащения угля на компоненты окружающей природной среды и здоровье населения главного угледобывающего региона России – Кемеровской области.
3. Выполнен анализ современных способов и технологий утилизации отходов углеобогащения, приведены основные достоинства и недостатки каждого из них. Установлено, что наилучшим способом переработки отходов углеобогащения с экологической точки зрения является их сжигание в виде топливных водоугольных и органоводоугольных суспензий.
4. Выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований, направленных на снижение опасности выбросов при сжигании водоугольных суспензий; установлено, что на сегодняшний день нет экспериментальной информации об энергетических и экологических характеристиках факельного сжигания суспензионных топлив для их практического применения.

ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ

2.1 Характеристика предприятия АО «Междуречье»

Кемеровская область является основным угледобывающим регионом страны. На её территории действуют 44 шахты, 51 разрез и 54 обогатительных фабрики [83].

Крупнейшими угледобывающими предприятиями в этом регионе являются компании, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные угледобывающие предприятия Кемеровской области [94]

Предприятие	Добыча за 2017 год, тыс. тонн
АО «СУЭК-Кузбасс»	38 221
Талдинский угольный разрез	13 367
ПАО «Распадская»	11 435
ОАО ОУК «Южкузбассуголь»	10 967
Бачатский угольный разрез	9 845
ПАО «Южный Кузбасс»	8 138
Краснобродский угольный разрез	7 310
Моховский угольный разрез	6 435
АО «Междуречье»	6 244
ООО «Шахтоуправление «Майское» (разрез «Первомайский»)	6 045

Одним из ведущих предприятий Кемеровской области по добыче угля является АО «Междуречье» (таблица 2.1). Компания занимается добычей угля открытым способом.

2.1.1 Добыча угля

АО «Междуречье», ведет добычу угля открытым способом в МО «Междуреченский городской округ» и в Новокузнецком районе Кузбасса на двух обособленных друг от друга участках: «Основное поле» и «Сибиргинский – 7». Основное поле разреза по горно-геологическим условиям залегания угольных пластов разделено на две зоны – Северную и Южную.

Объем добычи угля на 2017 год составил 6 244 тыс. тонн (таблица 2.1) при вскрыше 34 825 тыс. м³. Из общего объема вскрыши 70,0% размещается во внешних авто и железнодорожных отвалах, 28,3% - во внутренних, 1,7% используется на подсыпку автодорог и строительство железнодорожных насыпей.

Общая площадь земельного отвода АО «Междуречье» составляет 4266,6 га из них: 2529,6 га - МО «Междуреченский городской округ»; 1737,0 га – в Новокузнецком районе.

Транспортные связи предприятия осуществляются автомобильным и железнодорожным транспортом.

Погрузочно-транспортное управление АО «Междуречье» производит перевозку угля железнодорожным транспортом с угольных складов, а также используется для перемещения вскрышных пород.

Уголь вывозится на склады угля ОФ «Междуреченская» автомобильным транспортом.

По состоянию на 01.01.2017. запасы угля в границах основного поля разреза составляют 116 241 тыс. тонн, остаточный объем вскрыши – 578 600 тыс. м³.

Основное поле разреза «Междуреченский» представляет собой сформированную карьерную выемку со следующими показателями:

- длина добычного фронта – 4,7 км;
- длина вскрышного фронта – 4,7 км;
- средняя мощность угольного пласта – 9 м;

- количество добычных уступов (количество отрабатываемых угольных пластов) – 3 шт.;
- скорость подвигания фронта горных работ – 40-60 м/год;
- высота вскрышного уступа – 10-55 м;
- ширина рабочих площадок – 45-60 м;
- мощность навалов в пределах технических границ – 15-34 м;
- нижняя граница отработки – горизонт +204 м (абс.);
- средняя глубина отработки по полю – 250 м.

Добыча ведется по 3 пластам: III, IV-V (расщепляется на IV и V) и VI (расщепляется на VI в.п. и VI н.п.):

– III пласт является среднемощным, выдержанным, строение пласта простое и сложное. Угол падения пласта от 0 до 20°, исключения встречаются на крыльях антиклинальной складки в районе разведочных линий, до 60°;

– IV-V пласт является мощным, выдержанным, строение пласта меняется от простого до очень сложного. Прослой породы мощностью свыше 0,5 м делит пласт на два пласта IV и V, площадь распространения которых незначительна. Угол падения пласта от 0 до 20°, исключения встречаются на крыльях антиклинальной складки в районе разведочных линий, до 43°;

– VI пласт является среднемощным, невыдержанным, строение пласта меняется от простого до очень сложного. Прослой породы средней мощностью 0,55 м делит пласт на две пачки VI в.п. и VI н.п. Угол падения пласта от 0 до 20°, исключения встречаются на крыльях антиклинальной складки в районе разведочных линий, до 54°.

Горные работы ведутся с применением комбинированной транспортной (железнодорожная, автомобильная и бестранспортная) технологии, по сплошной продольной однобортовой системе разработки.

Коренные породы, а также навалы над пластом III (является верхним пластом свиты), отрабатываются по комбинированной транспортной технологии, с применением, как железнодорожного, так и автомобильного транспорта.

Отработка вскрышных пород по железнодорожной технологии ведется с применением экскаваторов типа «механическая лопата» ЭКГ-6,3у, ЭКГ-6,3ус, ЭКГ-8у и ЭКГ-12,5кус, с дальнейшей погрузкой в железнодорожный транспорт (думпкар 2ВС-105). Отработка вскрышных пород по автотранспортной технологии ведется с применением экскаваторов типа «механическая лопата» ЭКГ-6,3ус, ЭКГ-8ус, ЭКГ-12,5кус и P&H 2800 с погрузкой в автомобильный транспорт (БелАЗ 7513 и БелАЗ 7530).

Навалы над пластом IV-V и коренные породы, заключенные между пластами III и IV-V, обрабатываются с применением автомобильной технологии. Отработка вскрышных пород ведется экскаваторами типа «механическая лопата» ЭКГ-8и, ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, а также гидравлическими экскаваторами типа «обратная лопата» Caterpillar 5130В, с погрузкой в автомобильный транспорт (БелАЗ 7513 и БелАЗ 7530).

Отработка навалов над пластом VI и коренных пород, заключенных между пластами IV-V и VI, при залегании свиты пластов свыше 14°, производится с применением автомобильного транспорта, при залегании свиты пластов до 14° – по бестранспортной технологии. Отработка вскрышных пород по автотранспортной схеме ведется с применением экскаваторов типа «механическая лопата» ЭКГ-12, ЭКГ-12,5, ЭКГ-12,5КУС, а также гидравлическим экскаватором типа «обратная лопата» Caterpillar 5130В, с погрузкой в автомобильный транспорт (БелАЗ 7513 и БелАЗ 7530). Отработка вскрышных пород по бестранспортной схеме ведется с применением шагающих экскаваторов типа «драглайн» ЭШ-15/90 и ЭШ-20/90, с последующим складированием вскрышных пород во внутренний отвал, размещаемый на почве пласта VI.

Добыча угля ведется с применением гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» Caterpillar 5130В и канатных экскаваторов типа «мехлопата» ЭКГ-12,5, с дальнейшей транспортировкой автосамосвалами БелАЗ 7513 до обогатительной фабрики «Междуреченская».

Переэкскавация и выполаживание существующих навалов на бортах карьерной выемки, отработка опасных зон восточного крыла антиклинальной

складки и прочие вспомогательные работы выполняются с помощью шагающих экскаваторов типа «драглайн» ЭШ-10/70 и ЭШ-11/70.

Подготовка коренных пород и угля к выемке осуществляется буровзрывным способом. Для бурения взрывных скважин применяются буровые установки ЗСБШ-200-60 и DNL-1200. Взрывные работы производятся силами взрывного участка АО «Междуречье». Основные применяемые типы ВВ – эмулан ПВВ-А, эмулит ПВВ-В, эмульсолит А-20, эмульсолит П-А-20, эмулин и гранулиты ПС. При ведении горных работ на разрезе предварительному рыхлению буровзрывным способом подлежат 100 % разрабатываемых вскрышных пород и 100 % добываемого угля.

2.1.2 Обогащение угля

Добываемые угли марок ОС, КС, ТС, СС и окисленные угли участка открытых горных работ транспортируются автотранспортом на обогатительную фабрику «Междуреченская», которая расположена на промплощадке АО «Междуречье».

Производственная мощность технологического комплекса ОФ «Междуреченская» – 6700 тыс. т/год.

Доставка угля на технологический комплекс обогатительной фабрики производится автосамосвалами. На предприятии осуществляется прием и раздельное складирование углей по маркам на открытых складах. Также на фабрике располагаются линии углеподготовки (отдельно для первого и второго технологического комплекса), включающая две стадии дробления и позволяющая поставлять на обогащение уголь крупностью: 0-200 мм для технологического комплекса № 1; 0-150 мм для технологического комплекса № 2.

На технологическом комплексе № 1 обогащаются энергетические угли средней и тяжелой категории обогатимости, с глубиной обогащения до 25 мм, класс 0-25 мм отгружается в рядовом виде без обогащения.

Технологический комплекс № 1 включает следующие основные операции:

- прием угля, доставляемого с разреза автотранспортом, на склад;
- дробление угля до крупности 0-200 мм в конусной дробилке и валковой зубчатой дробилке;
- предварительное грохочение угля на грохоте по зерну 25 мм;
- подготовительную классификацию угля на грохоте по зерну 25 мм;
- обогащение угля в тяжелосредних сепараторах с выпуском концентрата и отходов;
- сортировку концентрата на грохоте по зерну 50 мм и 25 мм;
- регенерацию некондиционной суспензии на электромагнитных сепараторах;
- сброс хвостов магнитной сепарации в наружный шламовый отстойник.

Конечным продуктом переработки являются: концентрат, отсев и отходы.

Второй технологический комплекс обогащает коксующиеся марки угля ОС, КС и ТС с глубиной обогащения до 0 мм с выделением трех продуктов (концентрат, промпродукт и отходы) и включает следующие основные операции:

- складирование угля по маркам на открытых складах рядового угля;
- классификацию угля по кл. 150 мм;
- дробление угля более 150 мм;
- мокрую классификацию по кл. 13 мм;
- обогащение угля кл. 13-150 мм в магнетитовой суспензии в тяжелосредних сепараторах;
- промывку и обезвоживание продуктов обогащения кл. 13-150 мм;
- регенерацию магнетитовой суспензии в две стадии;
- дешламацию угля кл. 2-13 мм;

- обогащение угля кл. 2-13 мм в магнетитовой суспензии в тяжелосредних гидроциклонах;
- промывку и обезвоживание продуктов обогащения кл. 2-13 мм;
- регенерацию магнетитовой суспензии в две стадии;
- классификацию угля кл. 0-2 мм в гидроциклонах по зерну 0,2 мм;
- обогащение угля кл. 0,2-2 мм при помощи спиральных сепараторов с выделением отходов и концентрата;
- обезвоживание концентрата со спиральных сепараторов на шнековых центрифугах;
- обезвоживание отходов спиральных сепараторов;
- флотацию угля кл. 0-0,2 мм с выделением флотоконцентрата и отходов флотации;
- обезвоживание флотоконцентрата на напорных фильтрах;
- сгущение и обезвоживание отходов флотации;
- складирование и погрузку продуктов обогащения.

После обогащения на ОФ «Междуреченская» выпускается концентрат марок ОС, КС, ТС, СС и промпродукт. Общий вид технологического комплекса ОФ «Междуреченская» представлен в приложении А.

Порода от обогащения после удаления гравитационной воды и шлам после пресс-фильтров закладываются в отвал «Придорожный».

Только за 2017 год согласно отчетности 2-ТП (отходы) на обогатительной фабрике «Междуреченская» образовалось 986 032,8 тонн породы от обогащения, которые были переданы для складирования предприятию АО «Междуречье».

2.2 Воздействие отходов углеобогащения АО «Междуречье» на компоненты окружающей природной среды

2.2.1 Влияние отходов на поверхностные воды

Земляной шламонакопитель представляет собой открытую земельную емкость необходимую для отделения воды от твердых частиц. Осветленная вода возвращается в производственный цикл, а отходы углеобогащения отбрасываются на борт шламонакопителя и, после удаления гравитационной влаги, транспортируются в отвал.

Часть сточных вод из земляного шламонакопителя инфильтруется в реку Кийзак, расположенную в непосредственной близости от него. Также в непосредственной близости от реки находится железная дорога, обогатительная фабрика, ремонтно-механическое управление. Данная река относится к водным объектам рыбохозяйственного значения второй категории. На рисунке 2.1 представлена карта-схема промплощадки АО «Междуречье».



Рисунок 2.1 – Карта-схема промплощадки АО «Междуречье»

Помимо источника загрязнения в виде инфильтрации сточных вод из шламонакопителя, предприятие АО «Междуречье» имеет 2 организованных

выпуска сточных вод в реку Кийзак. Через выпуск №2 осуществляется сброс хозяйственно-бытовых сточных вод после биологических очистных сооружений. Объем водоотведения за 2016 год через данный выпуск составил 251,1 тыс. м³. Через выпуск №3 отводятся карьерные воды основного поля разреза, а также ливневые сточные воды автобазы и промплощадки АО «Междуречье». За 2016 год объем водоотведения составил 5201,6 тыс. м³.

В 2017 году согласно ежегодной отчетности, только через организованные выпуски предприятия, в реку Кийзак поступило 5 296,1 тонн загрязняющих веществ. В таблице 2.2 представлены сбросы загрязняющих веществ, осуществляемые предприятием АО «Междуречье» в реку Кийзак через 2 и 3 выпуски.

Таблица 2.2 – Сбросы загрязняющих веществ в реку Кийзак в 2017 году

Показатель	Ед. изм.	Масса загрязняющих веществ		
		Выпуск 2	Выпуск 3	Всего
БПК _{полн}	т	0,88	6,41	7,29
Нефтепродукты	т	0,02	0,09	0,11
Взвешенные частицы	т	0,86	23,29	24,15
Сухой остаток	т	112,67	3 046,22	3 158,90
Сульфаты	т	7,29	584,76	592,05
Фосфаты	т	0,02	-	0,02
Хлориды	т	5,56	10,13	15,69
Азот аммонийный	т	0,02	1,33	1,35
Азот нитратов	т	2,33	169,29	171,62
Азот нитритов	кг	9,89	923,51	933,40
Железо	кг	9,79	130,43	140,22
Фенол	кг	-	0,41	0,41
Медь	кг	0,70	25,73	26,43
Свинец	кг	-	5,44	5,44
Никель	кг	0,85	21,3	22,15
Марганец	кг	5,06	151,65	156,71
Цинк	кг	0,59	31,28	31,87
Хром 6+	кг	0,13	5,34	5,47
СПАВ	кг	2,85	-	2,85

В таблице 2.3 представлены концентрации загрязняющих веществ в контрольных створах по 2 и 3 выпускам. Измерения проведены в аккредитованной лаборатории центра лабораторного анализа и технических измерений по Кемеровской области, в Новокузнецком отделе лабораторного анализа и инструментальных измерений.

Таблица 2.3 – Концентрации загрязняющих веществ в контрольных створах

Показатель	ПДК _{р.х.} , мг/дм ³	Концентрации загрязняющих веществ в контрольных створах, мг/дм ³	
		Выпуск 2	Выпуск 3
БПК _{полн.}	3	0,024	0,013
Нефтепродукты	0,05	0,054	0,211
Минерализация	1000	310,1	346,2
Сульфаты	100	73,7	62,4
Фосфаты	0,2	0,049	0,031
Хлориды	300	11,6	0,004
Азот аммонийный	0,5	0,320	0,268
Нитраты	40	17,7	0,709
Нитриты	0,08	0,110	0,903
Железо	0,1	0,110	0,001
Медь	0,005	0,003	0,003
Свинец	0,01	< 0,005	< 0,005
Никель	0,01	0,004	0,009
Марганец	0,05	0,017	0,010
Цинк	0,05	< 0,005	< 0,005
Хром 6+	0,02	< 0,005	< 0,005

Превышения ПДК_{р.х.} зафиксированы по нефтепродуктам, для контрольного створа выпуска 2 в 1,1 раза, для контрольного створа выпуска 3 – в 4,2 раза; по нитритам для выпуска 2 – в 1,4 раза, для выпуска 3 – в 11,3 раза и по железу в контрольном створе выпуска 2 – в 1,1 раза.

Значительное превышение ПДК_{р.х.} по содержанию нефтепродуктов в контрольном створе выпуска №3 может быть обусловлено сбросами ливневых сточных вод автобазы. Еще более существенное превышение ПДК_{р.х.}, в 11,3 раза, наблюдается по нитритам также для контрольного створа выпуска №3.

Это обусловлено сбросом карьерных сточных вод, в которые попадают продукты от использования взрывчатых веществ, содержащих в своем составе аммиачную селитру и другие азотсодержащие соединения (п 2.1.1).

2.2.2 Отбор проб сточных вод из шламонакопителя

Для оценки влияния отходов углеобогащения на качество природных вод, из земляного шламонакопителя были отобраны пробы воды для дальнейшего анализа.

Отбор и консервация проб осуществлялась в соответствии с ПНД Ф 12.15.1-08 «Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод». На рисунке 2.2 приведена схема отбора сточных вод [95].



Рисунок 2.2 – Схема отбора проб сточных вод
из земляного шламонакопителя

Пробы воды помещались в герметичные емкости из полиэтилена вместимостью 1 дм³, что соответствует представительному объему пробы (рисунок 2.3). Емкости для отбора проб предварительно подготавливались в лабораторных условиях, а непосредственно перед отбором омывались водой с места отбора.



Рисунок 2.3 – Емкости для отбора и транспортировки проб

Консервирование проб сточных вод для дальнейшего определения содержания катионов производилось с использованием концентрированной соляной кислоты до $\text{pH} < 2$. Отобранные пробы охлаждались до температуры $2 - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в дальнейшем транспортировались в холодильниках. При транспортировании проб обеспечивалась их сохранность в летних условиях (упаковка защищала пробы от возможного внешнего загрязнения, не влияла на состав пробы и не приводила к потерям определяемых показателей при транспортировке). Конструкция охлаждающих ящиков препятствовала самопроизвольному открытию пробок емкостей.

2.2.3 Определение состава сточных вод шламонакопителя

Количественный химический анализ сточных вод из шламонакопителя проводился в аккредитованной лаборатории Моделирования экологической обстановки Горного университета. Содержания катионов в составе отобранных проб определялось при помощи атомно-абсорбционного метода, в соответствии с методикой М-02-2406-13 «Методика количественного химического анализа. Определение элементов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом», на спектрометре Shimadzu AA-7000. Достоинством прибора является возможность как электротермической, так и пламенной атомизации, а также наличие двух

систем коррекции неселективного поглощения: по самообращенной линии и дейтериевой [96].

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии основан на измерении поглощения излучения резонансной длины волны анализируемым элементом после атомизации пробы. Концентрация определялась по интенсивности аналитического сигнала и рассчитывалась по градуировочной зависимости. Преимуществом метода атомно-абсорбционной спектроскопии является универсальность в отношении различных объектов анализа, возможность его применения для определения следовых количеств, для определения компонентов в образцах сложного состава, и для определения содержания компонентов в концентрированных растворах.

Определение содержания катионов в составе сточных вод из шламонакопителя выполнялось путем проведения следующих операций:

- разделение отобранной пробы на две части, приготовление из них двух анализируемых растворов и подготовка холостой пробы;
- регистрация сигналов атомного поглощения холостого и анализируемых растворов;
- вычисление аналитических сигналов определяемого элемента пробы в каждом анализируемом растворе по разности среднего арифметического из двух измерений выходного сигнала элемента анализируемого раствора и среднего арифметического из двух измерений выходного сигнала определяемого элемента холостого раствора;
- определение концентрации элемента в каждом из анализируемых растворов при помощи градуировочной зависимости;

Вместе с анализируемой, готовилась холостая проба (дистиллированная вода), с которой проводились те же операции, как и с анализируемой. При разбавлении растворов использовалась соляная кислота с концентрацией 0,1 моль/дм³.

Неизвестные концентрации катионов металлов определялись путем сравнения интенсивностей спектральных линий в пробах и в растворах, приготовленных из государственных стандартных образцов. Для этого из стандартных образцов методом последовательных разбавлений готовились градуировочные растворы. Для разбавления применялась соляная кислота концентрацией 0,1 моль/дм³.

Результаты проведения количественного химического анализа по определению содержания катионов в составе сточных вод из земляного шламонакопителя представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты анализа жидкой составляющей отходов углеобогащения, мг/ дм³

Номер пробы	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺
1	111,5	69,4	49,1	4,04	0,48	0,03	0,02	0,011
2	116,1	85,5	61,5	4,05	0,54	0,03	0,01	0,014
3	81,7	58,5	42,6	4,58	0,55	0,07	-	0,005
4	132,1	72,7	47,8	4,17	0,87	0,11	0,02	0,007
5	123,0	70,4	44,6	4,33	0,94	0,12	0,02	0,007
6	148,8	91,1	57,6	3,95	0,57	0,39	0,04	0,011
7	85,5	71,3	50,6	8,73	0,61	0,03	0,02	0,013
8	84,5	62,8	44,5	3,33	0,82	0,06	0,02	0,009
ПДК _{р.х.}	180,0	120,0	40,0	50	0,1	0,05	0,05	0,005

Концентрация анионов в отобранных пробах сточных вод определялась методом ионообменной хроматографии в соответствии с М-02-1805-09 «Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов NO²⁻, NO³⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, PO₄³⁻, Br⁻ в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионообменной хроматографии» методом ионообменной хроматографии на хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence. Подготовка пробы к анализу заключалась в фильтровании воды через бумажный фильтр. Далее подготовленная проба вводилась в жидкостной хроматограф [97].

Результаты проведения измерений количественного анализа на содержание анионов представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты анализа жидкой составляющей шламов углеобогащения, мг/ дм³

Номер пробы	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻
1	0,15	31,4	115,8	81,6	0,044	102,9
2	0,12	45,6	126,2	102,6	0,04	132,3
3	0,14	27,2	118,5	47,8	0,047	47,4
4	0,13	41,1	150,8	69,4	0,039	72,7
5	0,13	27,5	147,4	66,6	0,042	68,1
6	0,14	33,4	145,4	91,2	0,041	121
7	0,16	30,7	135	74,2	0,045	66,2
8	0,15	31,2	131,3	58,9	0,045	39,4
ПДК _{р.х.}	0,08	40	300	100	0,2	—

Определение содержания нефтепродуктов в сточных водах проводилось флуориметрическим методом на анализаторе жидкости ФЛЮОРАТ-02-3М в соответствии с аттестованной методикой ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02». Определение концентрации нефтепродуктов флуориметрическим методом основано на их экстрагировании гексаном из исследуемого раствора и измерении интенсивности флуоресценции экстракта [98].

Результаты определения содержания нефтепродуктов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Содержание нефтепродуктов в пробах сточных вод

Номер пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	ПДК _{р.х.}
Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³	0,14	0,18	0,21	0,23	0,20	0,19	0,16	0,14	0,05

Согласно полученным данным, превышения ПДК_{р.х.} в шламонакопителе наблюдаются в среднем по катионам: Mg²⁺ в 1,2 раза, по Cu²⁺ в 1,9 раза, Fe³⁺ в 6,7 раза; по анионам: NO₂⁻ в 1,8 раза и по нефтепродуктам – в 3,6 раза. Наибольшие превышения зафиксированы по содержанию железа и нефтепродуктов. Это связано применяемыми на предприятии методами обогащения угля. Однако инфильтрация из шламонакопителя невелика и согласно, схеме водопотребления и водоотведения, менее 15% воды теряется на данном этапе, причем часть воды испаряется. При попадании инфильтрационных вод в реку Кийзак из шламонакопителя происходит их разбавление природными водами и значения концентраций по всем элементам снижаются до нормативных значений [99].

В работе [100] представлены результаты исследований загрязнения рек Кемеровской области сточными водами промышленных предприятий. Согласно представленной в этой работе классификации, река Кийзак относится к рекам с высокой антропогенной нагрузкой, однако на основании полученных в результате проведения анализа данных можно сделать вывод, что земляной шламонакопитель хотя и является источником негативного воздействия на природные воды, но организованные сбросы предприятия влияют на состояние реки Кийзак в несоизмеримо большей степени.

2.2.4 Влияние отходов на атмосферный воздух

Влияние земляного шламонакопителя на состояние атмосферного воздуха невелико, поскольку в нем отходы углеобогащения находятся в увлажненном состоянии (влажность для отходов углеобогащения на бортах шламонакопителя составляет от 5 до 30 %, а внутри – от 50 до 90 %) и они практически не разносятся ветром. Порода от обогащения после удаления избыточной влаги из шламонакопителя перемещается в отвал «Придорожный». Туда также поступает шлам после пресс-фильтров из технологической линии 2 ОФ «Междуречье» (п. 2.1.2).

Расчет пыления отвала «Придорожный» был проведен согласно отраслевой методике расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля [101].

Количество твердых частиц, сдуваемых с поверхности отвала «Придорожный» составляет 1,811 т/год, а максимально разовый выброс при этом – 0,165 г/с. Такие значения по выбросам относительно невелики в сравнении со взрывными работами, проводимыми на разрезе (при проведении взрывных работ согласно расчетам, выбросы оксидов азота составляют 117,522 т/год, угарного газа – 199,944 т/год и пыли – 59,019 т/год), а также с выбросами от других породных отвалов предприятия.

Большие объемы загрязняющих веществ выбрасываются при горении отвалов. На сегодняшний день в Российской Федерации не существует нормативных документов для расчета вероятности самовозгорания угольных отвалов, однако исследователи связывают это с рядом факторов, таких как: форма отвала, влажность материала, горно-геологические условия места складирования отходов, содержание сульфидной серы в теле отвала, время прошедшее с момента окончания отсыпки, размер кусков породы, температура окружающей среды, условия образования углей и углистых пород и др. Также одним из основных факторов, определяющих вероятность возгорания отвалов является содержание углистых пород. В работе [22] автор приводит данные о корреляции возникновения очагов самовозгорания терриконов и концентрации углистого материала в них. По полученным данным, при содержании в отвалах < 5 % углистого материала, вероятность самовозгорания крайне мала и повышается с ростом концентрации угольных частиц в теле отвала. Помимо концентрации частиц, на вероятность самовозгорания значительно влияет их размер. После обогащения угля, в отвалы попадают частицы диаметром от 0 до 3 мм, что также увеличивает вероятность возникновения пожаров.

Порода от обогащения на ОФ «Междуреченская» закладывается в отвал «Придорожный». Содержание угольных частиц в нем составляет около 25 %. В 2014 году по этой причине на предприятии произошло возгорание отвала,

которое продолжалось в течении 3 лет. В результате чего в воздух было выброшено большое количество загрязняющих веществ. Горение отвала можно наблюдать даже на космоснимках (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Горение отвала

На сегодняшний день одной из основных проблем для угольных предприятий является горение породных отвалов. Возникновение пожаров не только отрицательно влияет на состояние окружающей природной среды, но и создает угрозу жизни населения близлежащих населенных пунктов.

Одним из возможных путей минимизации риска возникновения возгорания отвалов является снижение концентрации угольных частиц в теле отвала путем их утилизации.

2.3 Оценка возможности использования отходов углеобогащения в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий

2.3.1 Отбор проб отходов углеобогащения

Для оценки пригодности отходов углеобогащения АО «Междуречье» в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий, были отобраны пробы отходов из земляного шламонакопителя.

Рассматриваемый земляной шламонакопитель имеет размеры 30×90 м, а территория, на которой происходит удаление гравитационной влаги, располагается по северному и восточному бортам шламонакопителя и занимает площадь $2\,500$ м².

Отбор проб осуществлялся ручным методом по равномерной сети, по схеме, представленной на рисунке 2.5. Результаты анализа проб отходов углеобогащения по определению зольности, удельной теплоты сгорания, выхода летучих, содержанию топливных элементов и состава зольного остатка представлены в приложении Б.



Рисунок 2.5 – Схема отбора проб отходов

Из земляного шламонакопителя были отобраны пробы отходов углеобогащения, представленные мелкодисперсными частицами угля и пустой породы, в 14 точках. Пробы отбирались для оценки возможности использования отходов в качестве сырья для получения топливных суспензий.

Фотографии земляного шламонакопителя АО «Междуречье» представлены на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Земляной шламонакопитель

Отбор проб отходов из шламонакопителя был проведен в соответствии с ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03 «Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений», при помощи пробоотборника Ван Вина (рисунок 2.7) [102]. В дальнейшем эти пробы помещались в предварительно подготовленные емкости из темного стекла с притертой крышкой.



Рисунок 2.7 – Пробоотборник Ван Вина

Отбор твердых проб с бортов шламонакопителя производился с разных глубин: с поверхности и с глубины 1 м ручным способом, при помощи совка

и пробоотборного устройства с продольной щелью и поворотным устройством (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Пробоотборное устройство с продольной щелью и поворотным устройством

Масса точечной пробы на воздушно-сухое состояние при всех отборах отходов углеобогащения составляла не менее 300 г, что соответствует массе представительной пробы.

2.3.2 Гранулометрический анализ

Определение гранулометрического состава образцов отходов углеобогащения позволяет выявить количество основных фракций частиц, содержащихся в отходах, а также требуемую степень их измельчения для дальнейшего использования в качестве сырья для топливных водоугольных суспензий.

Определение гранулометрического состава проводилось при помощи лазерного анализатора размеров частиц HORIBA LA-950. Данный прибор использует оптическую схему расположения детекторов для обеспечения широкого динамического диапазона: от 10 нм до 5000 мкм. Схема прибора включает в себя длинноволновый источник лазерного света ($\lambda = 650$ нм), необходимый для определения размера крупных частиц (от 500 нм до 5 000 мкм), а также коротковолновый полупроводниковый лазер ($\lambda = 405$ нм), позволяющий

с высокой точностью и разрешением определять размер наночастиц (от 10 нм до 500 нм).

Измерение проводилось в блоке «мокрого измерения» во фракционной ячейке. Для анализа бралась навеска массой 0,5 г. Определение производилось в среде изопропилового спирта для предотвращения слипания мелкодисперсных частиц. Результаты анализа представлены на рисунке 2.9.

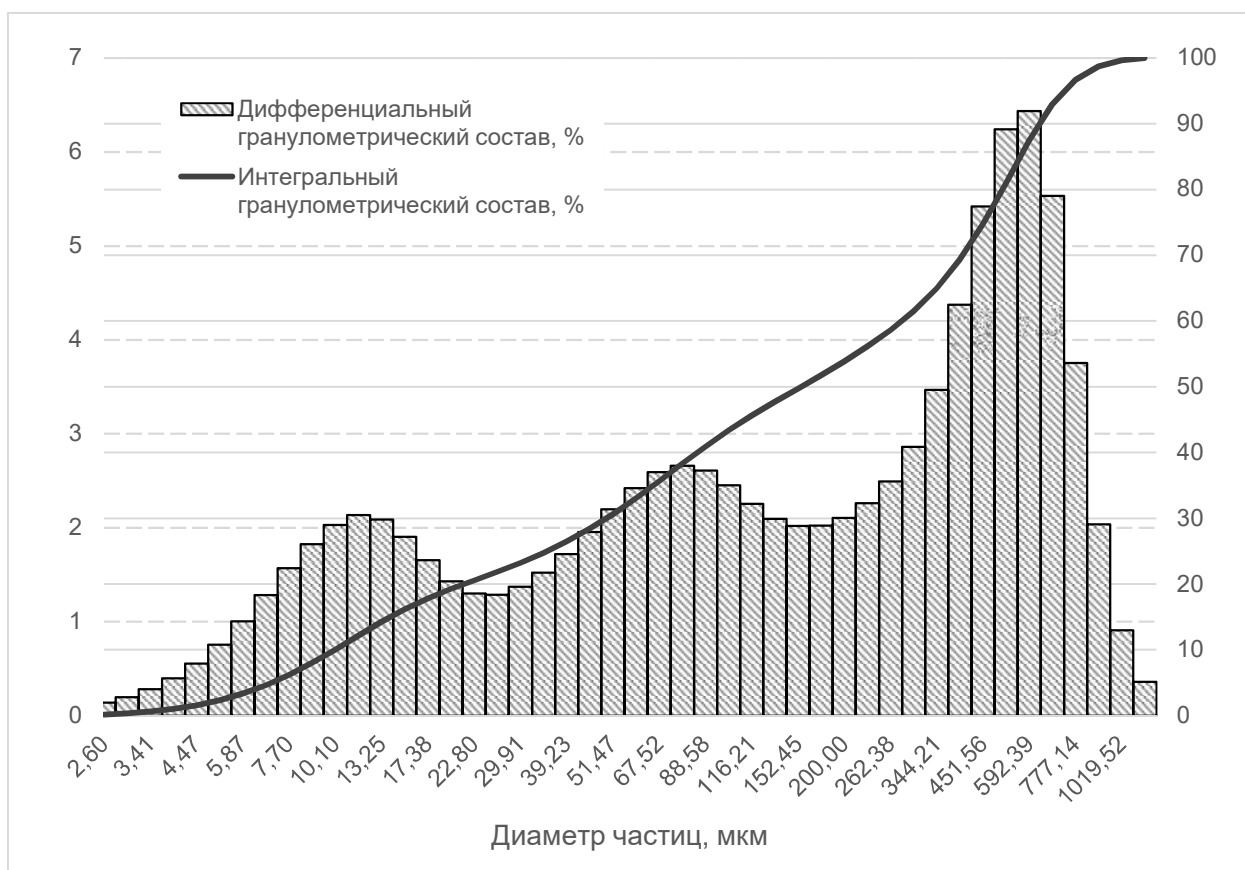


Рисунок 2.9 – Результаты гранулометрического анализа объединенной пробы отходов углеобогащения

Состав отходов углеобогащения неравномерный и содержит по меньшей мере три фракции: от 0 до 30 мкм; от 30 до 200 мкм и от 200 до 1100 мкм. Такие фракции наблюдаются во всех пробах, однако в разных соотношениях, в зависимости от глубины отбора проб. Медианный диаметр частиц в объединенной пробе составляет 155,4 мкм, а средний – 257,3 мкм.

При приготовлении топливных суспензий на основе угля, его измельчение как правило происходит в две стадии: предварительное измельчение, которое обычно осуществляется до фракции 0 – 3 мм и измельчение до конечной фракции – менее 100 – 150 мкм [103]. Максимальный зафиксированный диаметр частиц в пробах отходов углеобогащения составляет 1167,7 мкм. Такие размеры частиц исходного сырья позволяют не проводить предварительное дробление, а сразу измельчать отходы до размеров необходимых для получения топливных водоугольных суспензий в одну стадию.

Наилучшими по топливным и реологическим характеристикам считаются суспензии, частицы в которых имеют диаметр менее 150 мкм [104]. Так, например, китайский стандарт [105] на водоугольные суспензии определяет содержание в суспензии частиц размером более 300 мкм от 0 до 0,8 %, в зависимости от класса суспензии, при этом содержание частиц диаметром до 75 мкм должно составлять не менее 75 %, вне зависимости от класса. Именно до таких размеров необходимо будет провести измельчение отходов углеобогащения для дальнейшего проведения экспериментов.

2.3.3 Термогравиметрический анализ

Проведение термогравиметрического (ТГ) анализа отходов углеобогащения позволяет определить влажность, зольность и выход летучих компонентов образцов и тем самым оценить количество горючей массы содержащейся в отходах обогащения угля.

ТГ анализ проводился с использованием термогравиметрического анализатора LECO TGA701. Данный прибор позволяет одновременно анализировать до 19 образцов с высокой точностью взвешивания, выбирать атмосферу печи (кислород, азот или воздух), а также задавать температурную программу проведения анализа.

Для определения влажности и зольности отходов углеобогащения была выбрана программа проведения испытаний, представленная в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Программа проведения термогравиметрического анализа

Шаг	Температура, °С	Скорость нагрева, °С/мин	Атмосфера	Расход газа, л/мин
Влажность	25 – 107	6	Инертная (N_2)	8,5
Предварительный нагрев	107 – 500	10	Инертная (N_2)	7
Зольность	500 – 815	5	Окислительная (O_2)	5

Данные параметры шагов анализа соответствуют ГОСТ Р 52911-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги» и ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности» [106, 107].

Результаты анализа объединенной пробы, высушенной до воздушно-сухого состояния, представлены на рисунке 2.10.

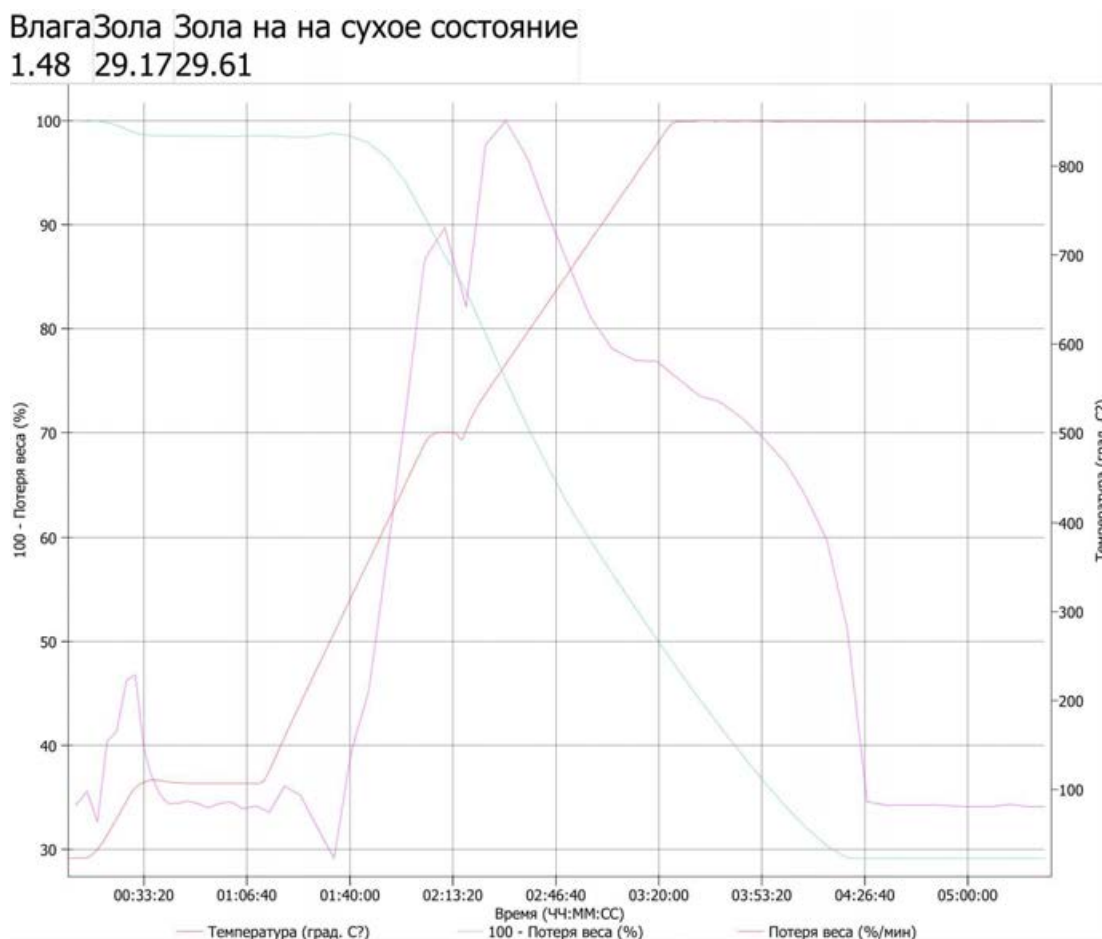


Рисунок 2.10 – Термогравиметрическая кривая объединенной пробы отходов углеобогащения

Содержание золы на сухое состояние отходов рассчитывалось по формуле:

$$A^d = A^a \cdot \frac{100}{100 - W^a} \quad (2.1)$$

Где: A^a – аналитическая зольность, %;

W^a – массовая доля влаги аналитической пробы, %.

Значение зольности для проб отходов углеобогащения на абсолютно сухое состояние находится в диапазоне от 26,4 до 35,2 %, что свидетельствует о высоком содержании горючей массы в анализируемых образцах.

В работах [33, 108, 109] рассматривается использование высокзолных отходов углеобогащения в качестве сырья для получения водоугольных и органоводоугольных суспензий. В этих трудах представлены результаты успешного применения отходов зольностью до 60 %.

Определение количества летучих компонентов проводилось в соответствии с ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ» [110].

Для определения содержания летучих компонентов, навеска воздушно-сухой пробы отходов массой 1 г выдерживалась без доступа воздуха при температуре 900 °С в течение 7 мин. в закрытом кварцевом тигле. После выдерживания тигли охлаждались до комнатной температуры в эксикаторе и взвешивались. По разнице масс исходной пробы и нелетучего остатка определялось содержание летучих компонентов в пробе отходов. Выход летучих компонентов на сухое беззолное состояние рассчитывался по формуле:

$$V^{daf} = \frac{100 \cdot V^a}{100 - W^a - A^a} \quad (2.2)$$

Где: A^a – аналитическая зольность, %;

W^a – массовая доля влаги аналитической пробы, %;

V^a – выход летучих из аналитической пробы, %.

Летучие компоненты угля выделяются из капли водоугольной суспензии при повышении температуры и воспламеняются. При горении летучих происходит прогрев капли и воспламенение углеродного остатка [111].

Данный показатель значительно влияет на температуру и скорость зажигания капель водоугольного топлива, стабильность горения суспензий, полноту выгорания угольных частиц и другие параметры.

Для проб отходов углеобогащения значение выхода летучих компонентов на сухое беззольное состояние составило от 43,4 до 48,3 %.

Чем выше значение выхода летучих компонентов, тем проще происходит поджиг суспензии, тем стабильнее ее горение и тем меньше коэффициент недожога топлива, однако несмотря на это, существующие технологии позволяют использовать для получения суспензий отходы с низким значением выхода летучих. Например, в работе [112], показано использование отходов обогащения угля с содержанием летучих 16,6%.

Китайский стандарт [113] устанавливает содержание летучих веществ на сухое состояние в сырье для получения водоугольных суспензий. Для первого класса данное значение должно составлять более 30 %; для второго класса – от 20 % до 30 % и для третьего – менее 20 %.

В пробах отходов углеобогащения содержится от 29,7 до 33,0 % летучих веществ на сухое состояние топлива. Такое содержание летучих позволяет сжигать водоугольные суспензии из данного сырья без применения топлива подсветки и без использования добавок органических веществ при их термической утилизации.

2.3.4 Калориметрический анализ

Проведение калориметрического анализа отходов углеобогащения позволяет определить удельную теплоту сгорания отходов обогащения угля и оценить их теплотворную способность. Также калориметрический анализ исходного сырья позволяет рассчитать удельную теплоту сгорания водоугольных суспензий в зависимости от содержания в них воды и добавок.

Калориметрический анализ проводился с использованием бомбового калориметра ИКА С 2000 (рисунок 2.11). Данный прибор предназначен для определения высшей теплотворной способности жидких и твердых материалов. С его помощью можно проводить эксперименты в адиабатическом, изопериболическом и динамическом режимах.

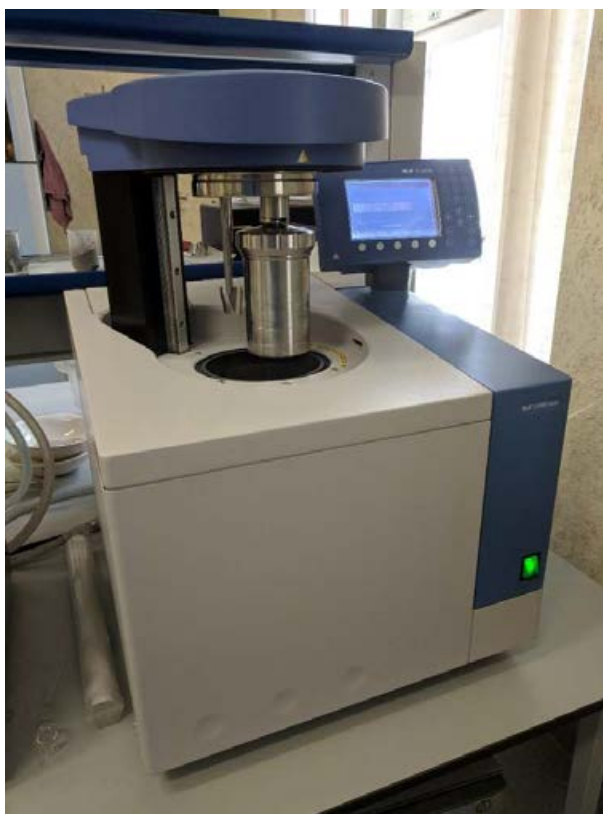


Рисунок 2.11 – Бомбовый калориметр ИКА С 2000

Определение удельной теплоты сгорания отходов углеобогащения проводилось в соответствии с ГОСТ 147-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания» в воздушно-сухих пробах отходов углеобогащения [114].

Анализ проводился в изопериболическом режиме. Определение высшей теплоты сгорания при этом заключалось в полном сжигании пробы отходов углеобогащения в окислительной атмосфере, в герметически закрытой калориметрической бомбе, которую погружали в воду, находящуюся в калориметрическом сосуде. По увеличению температуры воды устанавливалось количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива.

Высшая удельная теплота сгорания проб отходов углеобогащения составила от 17,1 до 19,4 МДж/кг для разных проб [115].

Низшая теплота сгорания отходов обогащения угля рассчитывалась по формуле:

$$Q_i^a = Q_s^a - 24,42 \cdot (W^a + 8,94H^a) \quad (2.3)$$

Где: 24,42 – теплота парообразования при 25°C в расчете на 1% выделившейся воды, кДж/кг;

8,94 – коэффициент пересчета массовой доли водорода на воду;

Q_s^a – высшая теплота сгорания пробы топлива, кДж/кг;

W^a – доля влаги аналитической пробы, масс. %;

H^a – доля водорода в аналитической пробе, масс. %.

Существующие технологии позволяют перерабатывать низкокалорийные отходы углеобогащения в виде водоугольных суспензий. Например, в работе [116] рассматривается использование в качестве сырья тонкодисперсных отходов углеобогащения низшей удельной теплотой сгорания 12,5 МДж/кг, а в работе [33] рассмотрено использование суспензий с еще меньшей удельной теплотой сгорания исходного сырья – 11,6 МДж/кг.

Низшая удельная теплота сгорания отобранных проб отходов углеобогащения составила от 16,3 до 18,6 МДж/кг. Такие значения удельной теплоты сгорания являются относительно высокими для отходов и позволяют использовать их в качестве сырья для получения топливных суспензий без предварительного обогащения.

2.3.5 Определение содержания топливных элементов в составе отходов обогащения угля

Определение содержания основных топливных элементов в составе угля позволяет выяснить состав отходов углеобогащения, сделать выводы о содержании в них горючей массы, а также определить удельную теплоту сгорания

расчетным способом и подтвердить данные, полученные при помощи калориметрического анализа. Помимо этого, значение концентраций азота и серы в составе отходов позволит приблизительно рассчитать количество оксидов азота (образующихся по «топливному механизму») и оксидов серы, которые образовались бы при полном их сжигании.

Определение содержания углерода, водорода, азота и серы в составе отходов углеобогащения производилось в соответствии с ГОСТ 32979-2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота» и ГОСТ 32465-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии» [117, 118].

Анализ проводился на элементных анализаторах LECO CHN 628 с приставкой 628S. Данные приборы используются для определения углерода, водорода, азота и серы в топливе и других материалах. Время определения составляет 5 минут, при этом производится одновременное определение всех элементов. Короткое время анализа достигается за счёт использования независимых детекторов. Для определения содержания серы, водорода и углерода используются инфракрасные детекторы, а определение содержания азота производится при помощи детектора по теплопроводности. Использование балластной ёмкости и системы отбора аликвотных объёмов устраняет необходимость применения систем хроматографического разделения и других дорогостоящих методов газового анализа, что позволяет значительно сократить расход химических реагентов и уменьшить стоимость анализа.

Для определения содержания углерода, водорода и азота бралась навеска отходов углеобогащения массой 0,1 г и одновременно определялось их содержание в пробе. Сжигание аналитической пробы производилось при температуре 950°C в токе кислорода. Углерод, водород и азот при этом количественно переходили в соответствующие газообразные компоненты (CO_2 , H_2O , NO_x). Оксиды азота, образовавшиеся при сжигании, восстанавливались до N_2 перед поступлением газов в детектор.

Для определения содержания серы в отходах углеобогащения, бралась навеска массой 0,25 г и проводилось ее сжигание при температуре 1350 °С в токе кислорода. Из газового потока удалялись пары воды и твердые частицы, путем его пропуска через трубки, заполненные стекловатой и хлорнокислым магнием (ангидрон). После газовый поток поступал в инфракрасный детектор, где определялось количество диоксида серы.

Результаты анализа объединенной пробы отходов углеобогащения представлены на рисунке 2.12 [119].

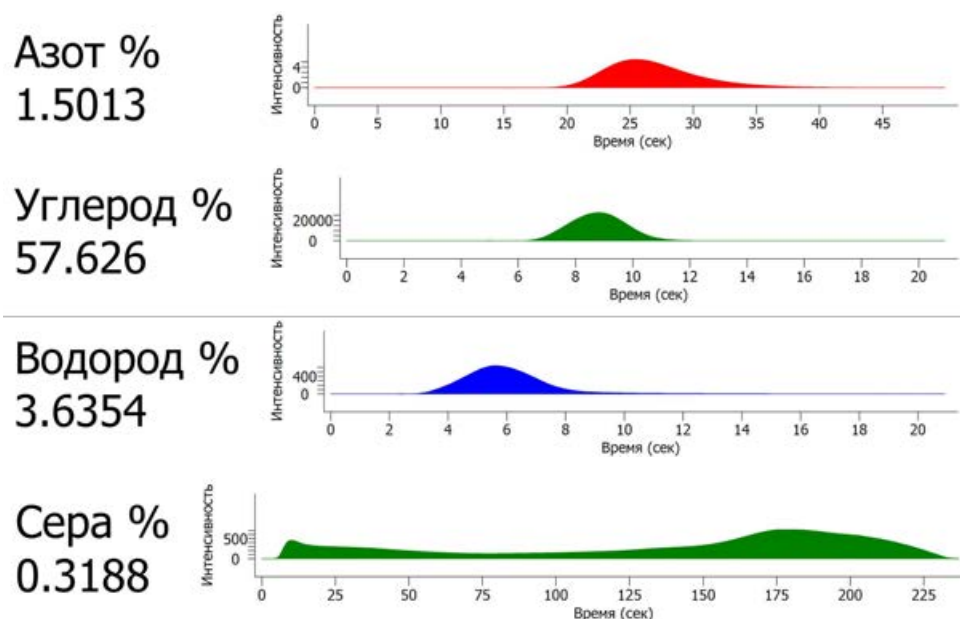


Рисунок 2.12 – Результаты определения основных топливных элементов в объединённой пробе отходов углеобогащения

Определение содержания кислорода в пробах отходов углеобогащения производилось расчётным способом, в соответствии с ГОСТ Р 53355-2009 «Топливо твердое минеральное. Элементный анализ» [120].

Массовая доля кислорода в органической массе аналитической пробы при этом рассчитывалась по формуле:

$$O_d^a = 100 - (W^a + A^a + C^a + H^a + N^a + S_t^a) \quad (2.4)$$

Где: W^a – массовая доля влаги аналитической пробы, %;

C^a – массовая доля углерода в аналитической пробе, %;

H^a – массовая доля водорода в аналитической пробе, %;

N^a – массовая доля азота в аналитической пробе, %;

S_r^a – массовая доля общей серы в аналитической пробе, %;

A^a – зольность аналитической пробы, %.

Массовое содержание основных топливных элементов в отходах углеобогащения составило: для углерода – от 52,2 до 60,3 %, для водорода – от 2,9 до 3,8 %, для азота – от 1,2 до 1,9 %, для серы – от 0,2 до 0,4 % и для кислорода – от 6,7 до 9,0 %.

Содержание топливных элементов можно использовать для расчета удельной теплоты сгорания по формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_i^p = 339 \cdot C^a + 1256 \cdot H^a - 109 \cdot (O^p - S^a) - 25,14 \cdot (9 \cdot H^a + W^a) \quad (2.5)$$

Где: C^a – массовая доля углерода в аналитической пробе, %;

H^a – массовая доля водорода в аналитической пробе, %;

O^p – массовая доля кислорода, полученная расчетным способом, %;

S^a – массовая доля серы в аналитической пробе, %;

N^a – массовая доля азота в аналитической пробе, %;

W^a – массовая доля влаги аналитической пробы, %;

Значения низшей удельной теплоты сгорания, полученные расчетным способом, находятся в пределах от 17,0 до 19,9 МДж/кг. Эти значения являются более высокими чем те, которые были получены экспериментальным способом на 0,6 – 1,3 МДж/кг, однако близки им [121].

Высокое содержание в отходах углеобогащения топливных элементов позволяет говорить о высоком потенциале их использования в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий [122, 123].

2.3.6 Определение состава зольного остатка

Определение состава зольной части отходов углеобогащения позволяет выбрать направление дальнейшего использования золошлаковых отходов, образующихся после сжигания, а также установить токсичность самих отходов углеобогащения и образующейся после сжигания золы.

Определение состава минеральной части отходов проводилось в соответствии с ГОСТ Р 55879-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом рентгенофлуоресцентной спектromетрии» [124].

Концентрация макроэлементов определялась на рентгенофлуоресцентном спектрометре со встроенным дифрактометром Thermo Scientific™ ARL™ 9900 X-Ray WorkStation. Данный прибор позволяет проводить как рентгенофлуоресцентный анализ содержания элементов от бора до урана, так и рентгеноструктурный анализ и определять минеральный состав проб. Для проведения рентгенофлуоресцентного анализа используется Rh анод трубки, 32 монохроматора и 3 гониометра для обеспечения высокой точности измерений.

Метод рентгенофлуоресцентной спектromетрии основан на зависимости интенсивности характеристической флуоресценции определяемого элемента от его содержания в пробе. Характеристическое излучение, поступающее от пробы, является результатом возбуждения атомов пробы тормозным рентгеновским излучением.

При помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра происходит возбуждение атомов в пробе, выделение из спектра излучения линий с определенной длиной волны, принадлежащих каждому из определяемых элементов и определение их интенсивности. Интенсивность флуоресценции определяемых атомов пересчитывают в единицы концентраций по градуировочному графику.

Для проведения анализа отходы углеобогащения озолялись при температуре 815°C в кварцевых тиглях. Полученная зола измельчалась в агатовой

ступке и спрессовывалась. Препарат помещался в рентгенофлуоресцентный спектрометр, где снимался спектр характеристического рентгеновского излучения элементов пробы отходов углеобогащения. На рисунке 2.13 представлен внешний вид рентгенофлуоресцентного спектрометра и подготовленные к анализу препараты зольного остатка отходов углеобогащения.



Рисунок 2.13 – Рентгенофлуоресцентный спектрометр Thermo Scientific™ ARL™ 9900 X-Ray WorkStation

Спектр характеристического рентгеновского излучения зольной части отходов углеобогащения представлен на рисунке 2.14.

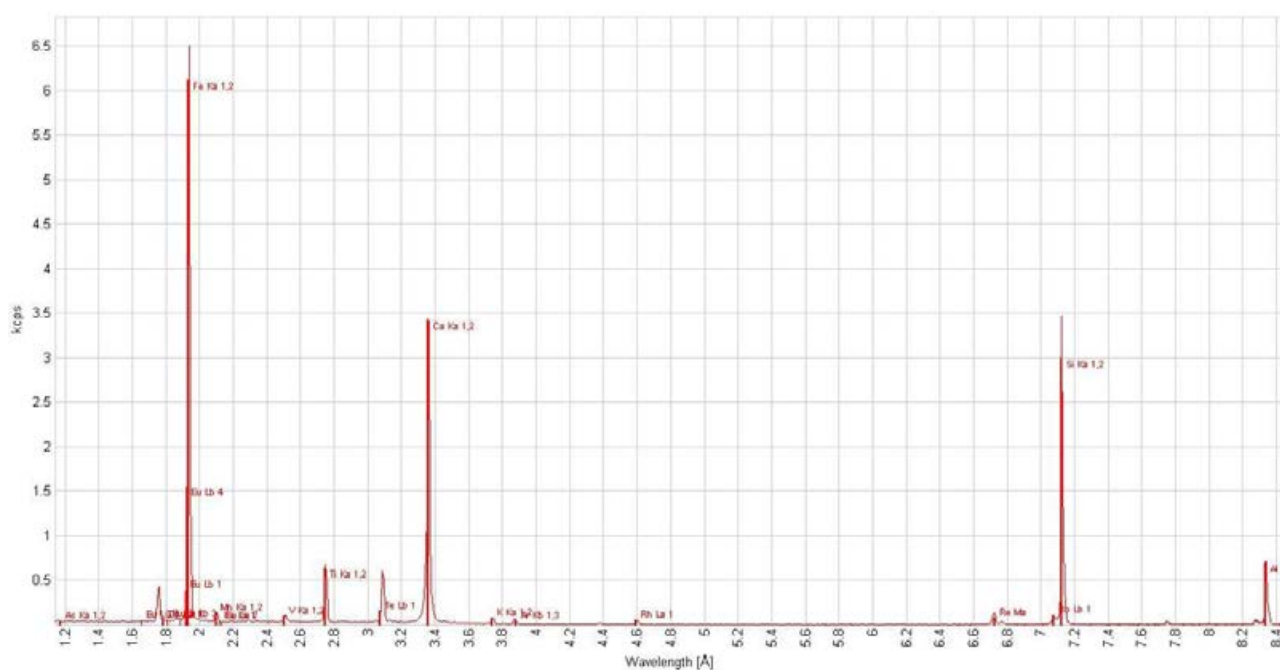


Рисунок 2.14 – Характеристический спектр рентгеновского излучения зольного остатка объединенной пробы отходов углеобогащения

Состав зольного остатка отходов углеобогащения, определенный при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра, представлен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Содержание макроэлементов в зольном остатке отходов углеобогащения

Оксид элемента	Массовая доля, % в пересчете на сухое состояние золы	Массовая доля, % в пересчете на сухое состояние отходов углеобогащения
Fe ₃ O ₄	34,1	10,6
SiO ₂	20,8	6,44
Al ₂ O ₃	10,0	3,11
CaO	5,30	1,64
BaO	5,30	1,64
SrO	3,60	1,12
TiO	2,83	0,891
K ₂ O	1,30	0,403
Na ₂ O	1,27	0,394
MgO	0,526	0,163
MnO	0,364	0,113
Остальное	10,0	3,11

Высокое содержание оксидов железа (более 34 %) наблюдается в составе зольного остатка из-за технологии обогащения угля. Для приготовления среды, в которой производится увеличение концентрации полезного компонента, применяется магнетитовый порошок. Часть его попадает в шламонакопитель вместе с мелкодисперсными частицами угля и пустой породы.

Определение содержания микрокомпонентов в составе зольного остатка проводилось в соответствии с ГОСТ 32977-2014 «Топливо твердое минеральное. Определение микроэлементов в золе атомно-абсорбционным методом» [125].

Для проведения анализа, проба отходов углеобогащения озолялась при температуре 500°C и растиралась в агатовой ступке. После этого навеска золы массой 0,2 г помещалась в цилиндр лабораторной микроволновой печи, куда также добавлялись: 1 см³ азотной, 3 см³ соляной и 5 см³ плавиковой кислот, а

также 10 см³ воды. Разложение проб происходило в микроволновой печи. При этом мощность нагрева проб увеличивалась равномерно в течении 30 мин. до 800 Вт, после чего в течении 20 мин. происходило выдерживание проб при таком значении мощности. По истечении указанного времени, магнетрон микроволновой печи отключался и происходило ее остывание до температуры менее 30°С. После этого в тот же цилиндр добавлялось 30 см³ 4 % борной кислоты для растворения образовавшихся фторидов и смесь равномерно нагревалась в течении 25 мин. до мощности 1200 Вт. Длительность выдерживания при такой мощности нагрева составляла 5 мин, после чего пробы снова остывали в герметичных стаканах микроволновой печи. Полученные растворы переносились в мерную колбу объемом 50 см³ и анализировались на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA-7000. Результаты анализа представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Содержание микроэлементов в объединенной пробе зольного остатка отходов углеобогащения

Элемент	Массовая доля, г/т в пересчете на сухую золу	Содержание, определяющее практическую значимость, г/т [126]
Cr	18,3	7000,0
Cu	16,0	500,0
Ni	23,2	500,0
Pb	25,3	1200,0
V	59,8	500,0
Zn	71,6	2000,0
Cd	3,7	5,0
Co	3,6	100,0
Ga	8,7	100,0
Hf	15,5	25,0
In	0,1	1,0
Y	13,5	75,0

В таблице 2.9 наряду с результатами определения содержания микроэлементов представлены концентрации, определяющие практическую значимость элементов в золах углей. На основании полученных в результате анализа данных, можно сделать вывод о том, что промышленное извлечение металлов из золы отходов углеобогащения не рентабельно [127].

Определение содержания мышьяка и сурьмы производилось после спекания проб отходов углеобогащения со смесью Эшка (2 части MgO и 1 часть Na_2CO_3). При этом в тигель отбиралась навеска пробы массой 0,5 г, смешивалась с 1 г смеси Эшка, после чего проба покрывалась сверху еще 0,5 г смеси оксида магния и соды (рисунок 2.15). После этого тигель с пробой помещался в муфельную печь при температуре 800°C и выдерживался в течении 2 часов. В дальнейшем проба обрабатывалась соляной кислотой и анализировалась на содержание сурьмы при помощи атомно-абсорбционного спектрометра, а на содержание мышьяка при помощи приставки для генерации гидридов атомно-абсорбционного спектрометра.



Рисунок 2.15 – Спекание проб для определения содержания мышьяка и сурьмы

Результаты анализа для объединенной пробы отходов углеобогащения представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Содержание мышьяка и сурьмы в объединенной пробе отходов углеобогащения

Элемент	Массовая доля, г/т в пересчете на сухую золу
As	22,8
Sb	3,2

Согласно «Федеральному классификационному каталогу отходов», а также протоколам биотестирования, представленным в проекте нормативов образования отходов и лимитов на их размещение предприятия АО «Междуречье», отходы породы, полученные при обогащении угольного сырья в тяжелосредних сепараторах и отсадочных машинах (код ФККО 2 11 333 01 39 5), относятся к 5 классу опасности. Данные о составе отходов, полученные выше также указывают на очень низкую степень вредного воздействия на окружающую природную среду и согласно результатам, полученным расчетным способом, также относятся к 5 классу опасности [128].

2.4 Проведение предварительных лабораторных испытаний по сжиганию водоугольных суспензий

2.4.1. Термический анализ водоугольных суспензий

Для определения температур протекания основных стадий сжигания топливных суспензий и количества выделяющейся в ходе сжигания энергии, проводился ТГ и ДСК анализ.

Лабораторные исследования по сжиганию топливных суспензий из отходов углеобогащения проводились слоевым способом, при помощи синхронного термоанализатора Mettler Toledo TGA/DSC 1. Внешний вид прибора представлен на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Синхронный термоанализатор Mettler Toledo TGA/DSC 1

Эксперименты по сжиганию проводились как для измельченных отходов углеобогащения, которые являлись сырьем для получения топливных водоугольных суспензий, так и для самих топливных суспензий. Тонина помола отходов углеобогащения составляла < 150 мкм, а содержание воды в суспензии – 40 %.

Для сжигания образцов использовалась следующая температурная программа: начальная температура – 30 °С, конечная температура – 1200 °С, скорость нагрева – 15 °С/мин, расход воздуха – 50 см³/мин.

ТГ и ДСК кривые полученные в результате анализа представлены на рисунках 2.17 и 2.18 для исходного сырья и топливной суспензии соответственно.



Рисунок 2.17 – ТГ и ДСК кривые исходного угля

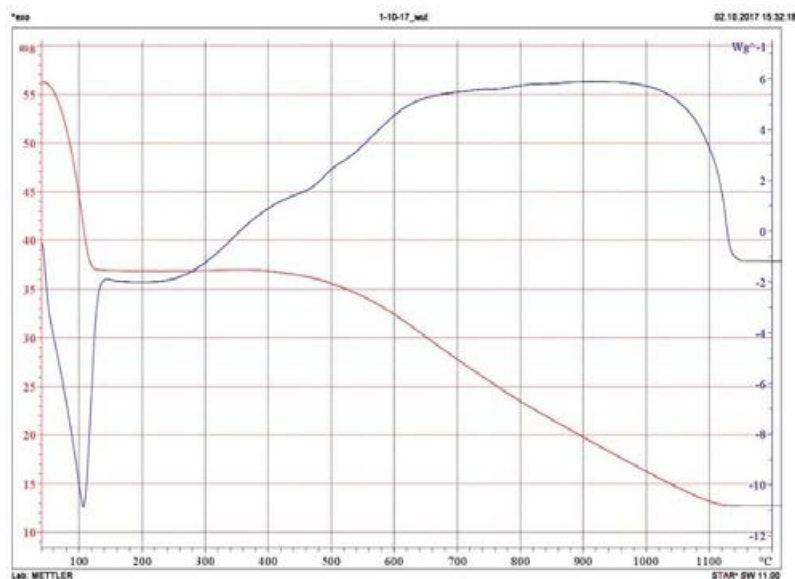


Рисунок 2.18 – ТГ и ДСК кривые водоугольной суспензии

Как видно из рисунков 2.17 и 2.18, в температурном интервале от 40 до 150 °С имеет место значительное изменение массы у образца водоугольной суспензии. Данная потеря обусловлена процессом испарения влаги. При этом суспензия теряет около 35 % массы, а исходный образец около 2 %. На первой стадии «сушка», на ДСК кривой наблюдается значительный эндотермический

процесс, который связан с расходом энергии и поглощением тепла при нагревании и испарении воды.

Вторая стадия процесса идет при температуре от 250 до 400 °С. В данном температурном диапазоне происходит незначительное увеличение массы образцов и начинается протекание экзотермического процесса. Увеличение массы связано с окислением компонентов отходов углеобогащения в окислительной среде.

Третья стадия для исходного образца и полученной суспензии лежит в пределах 250 – 970 °С и 250 – 1130 °С, соответственно. При этом имеет место продолжительная экзотермическая реакция для обоих образцов, однако в случае образца водоугольной суспензии тепло выделяется более равномерно. Также на этой стадии происходит уменьшение массы пробы, связанное с окислением топлива.

При достижении температуры свыше 970 и 1130 °С для образцов отходов углеобогащения и полученной из них суспензии соответственно, их масса перестает изменяться, а также стабилизируется ДСК кривая, что свидетельствует о прекращении физико-химических процессов.

Значение выделившейся энергии при горении измельченных отходов углеобогащения составило 18,3 КДж/г, а для полученной суспензии, в пересчете на массу исходного топлива – 16,4 КДж/г. Потери энергии при сжигании суспензии связаны с протеканием эндотермических реакций, возникающих при испарении воды на начальном этапе [129].

2.4.2 Определение состава отходящих газов

Для выбора температуры сжигания при которой будет обеспечиваться наименьшая токсичность выбросов, осуществлялось определение содержания углеводородов, оксидов азота и оксидов серы. При сжигании твердого топ-

лива, концентрация углеводородов будет снижаться при повышении температуры сжигания, а концентрации оксидов азота и серы с повышением температуры, увеличивается [130].

Превалирующими компонентами отходящих газов, связанных с пиролизом твердого топлива являются следующие органические компоненты: предельные и непредельные углеводороды, кислородсодержащие углеводороды (спирты, альдегиды, кетоны и т.д.), полиароматические углеводороды, среди которых наиболее токсичными являются нафталин, антрацен, пирен, бенз(а)антрацен и бенз(а)пирен. Данные соединения рекомендованы при оценке риска для окружающей среды и здоровья человека [131]. Основными неорганическими компонентами отходящих газов являются оксиды азота и серы, угарный и углекислый газы [132, 133, 134].

Для проведения экспериментов по влиянию температуры сжигания на состав отходящих газов были выбраны следующие температурные программы: начальная температура – 30 °С; конечная температура варьировалась в пределах от 500 до 1500 °С, шагом 100 °С; скорость нагрева 50 °С/мин; расход воздуха 50 см³/мин. При достижении конечной температуры анализа, навеска выдерживалась до постоянной массы.

Приготовление водоугольных суспензий проводилось при помощи верхнеприводной мешалки Экросхим ПЭ-8300, при скорости вращения 350 об./мин. В качестве дисперсионной среды использовалась дистиллированная вода. Дисперсная фаза – измельченные отходы углеобогащения, с диаметром частиц менее 150 мкм. Компоненты водоугольной суспензии с массовым соотношением отходы углеобогащения / вода равным 60 / 40 добавлялись в лабораторный стакан объемом 250 см³ и перемешивались в течении 5 минут.

Опыты проводились в платиновых тиглях, поскольку при анализе в тиглях из оксида алюминия происходили значительные потери воды из суспензии.

Для определения содержания углеводов в отходящих газах использовался комплекс по сжиганию отходов (рисунок 2.19), состоящий из синхронного термоанализатора Mettler Toledo TGA/DSC 1 (1), многоконтурного интерфейса хранения SRA Instruments (2) и газового хроматографа Agilent 7890A (3) с времяпролетным масс-спектрометром LECO Pegasus HT (4).

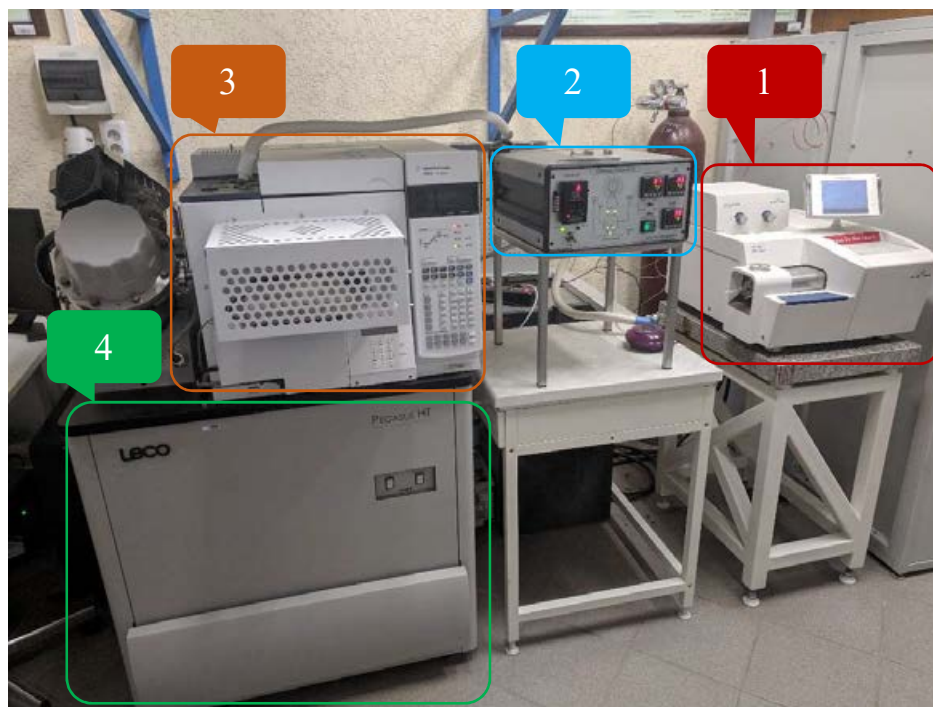


Рисунок 2.19 – Комплекс по сжиганию отходов

Навески водоугольных суспензий помещались в термоанализатор и сжигались при выбранных температурных программах. Отходящие газы в процессе горения поступали по обогреваемой магистрали в многоконтурный интерфейс хранения, представленный набором из 16 хроматографических колонок. После полного сжигания, отходящие газы, накопленные в интерфейсе хранения, поступали на анализ в газовый времяпролетный хромато-масс-спектрометр.

Газохроматографический анализ проводился на капиллярной колонке HP-5MS, 30 м x 0,25 мм x 0,25 мкм, расход газа-носителя (гелия) составлял 1 см³/мин, без деления потока (splitless); температура испарителя – 250 °С; начальная температура термостата колонок – 40 °С; выдержка при начальной

температуре – 3 мин; скорость нагрева – 10 °С/мин; конечная температура колонок – 250 °С; выдержка при конечной температуре – 5 мин, режим детектирования – сканирования по полному ионному току (SCAN).

Для градуировки прибора использовались растворы: стандартные калибровочные растворы: алканов C5 – C20 в дихлорметане; этанола в метаноле; ацетона в четыреххлористом углероде; ацетальдегида в бензоле, а также растворы нафталина, антрацена, пирена, бенз(а)антрацена и бенз(а)пирена в метаноле.

На рисунке 2.20 представлена хроматограмма, полученная при анализе состава отходящих газов от сжигания водоугольной суспензии при максимальной температуре 1000 °С.

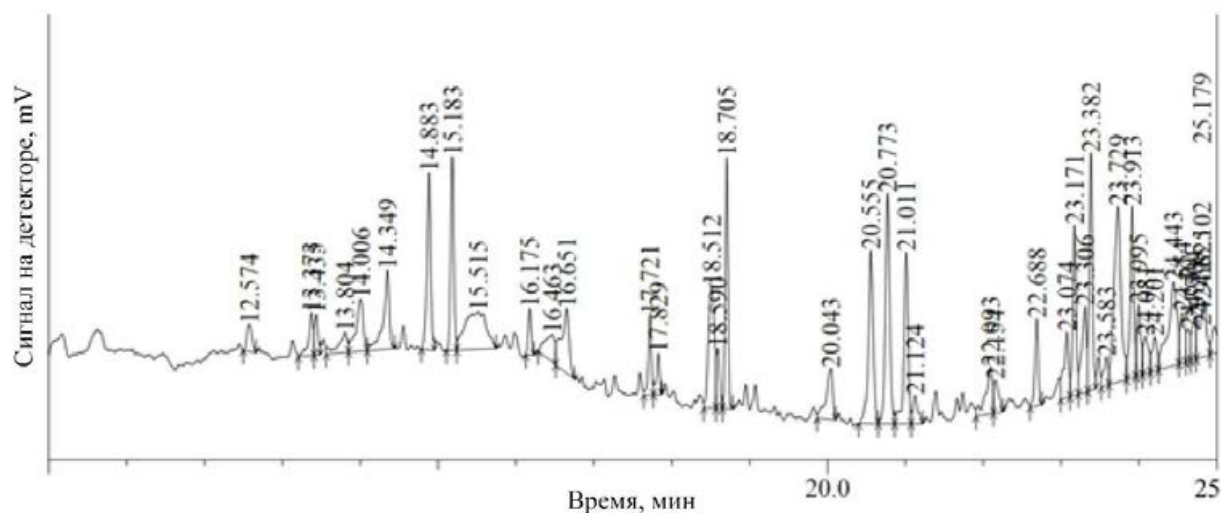


Рисунок 2.20 – Хроматограмма, полученная при анализе состава отходящих газов от сжигания ВУС из отходов углеобогащения

В таблице 2.11 представлены основные углеводороды и значения удельной массы их образования при температурах 700 °С, 1000 °С и 1300 °С.

Таблица 2.11 – Удельное образование основных углеводородов при различных температурах

Группа соединений	Удельное количество образования, мг/г		
	700 °С	1000 °С	1300 °С
Пределные углеводороды	2,15	0,73	0,43
Непределные углеводороды	2,23	0,56	0,10
Кислородсодержащие органические соединения	0,12	0,14	0,03
Полиароматические углеводороды:			
Нафталин	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Антрацен	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Пирен	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Бенз(а)антрацен	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Бенз(а)пирен	0,002	< 0,001	< 0,001

Из таблицы 2.11 можно заметить существенное снижение суммарного количества углеводородов, входящих в состав отходящих газов при повышении температуры с 700°С до 1000°С.

Для визуализации полученных данных была построена кривая изменения содержания суммы углеводородов в отходящих газах в зависимости от температуры сжигания (рисунок 2.21).

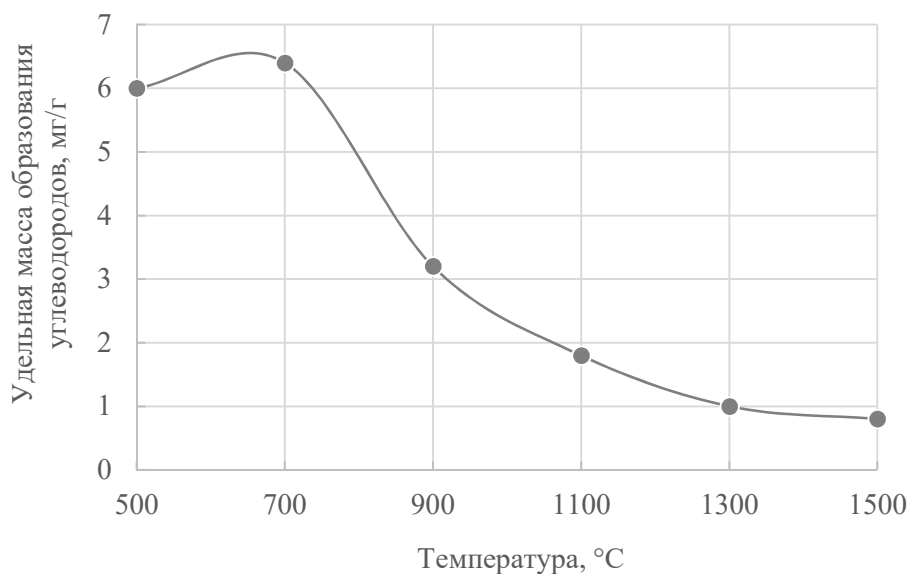


Рисунок 2.21 – Удельная масса углеводородов в отходящих газах в зависимости от температуры

При сжигании топлива, оксиды азота образуются по топливному, термическому и быстрому механизмам. Образование топливных оксидов азота (в результате реакции азота, содержащегося в топливе, при разложении молекул и при взаимодействии его с кислородом воздуха) практически не зависит от температуры сжигания. При температуре свыше 1300°C, сильное влияние оказывает термический механизм образования (рисунок 2.22). При таких температурах оксиды азота образуются из молекулярного азота воздуха по механизму Зельдовича [80]:



В силу того, что энергия тройной связи в молекуле N_2 велика, реакция имеет большую энергию активации и может проходить с заметной скоростью только при высоких температурах.

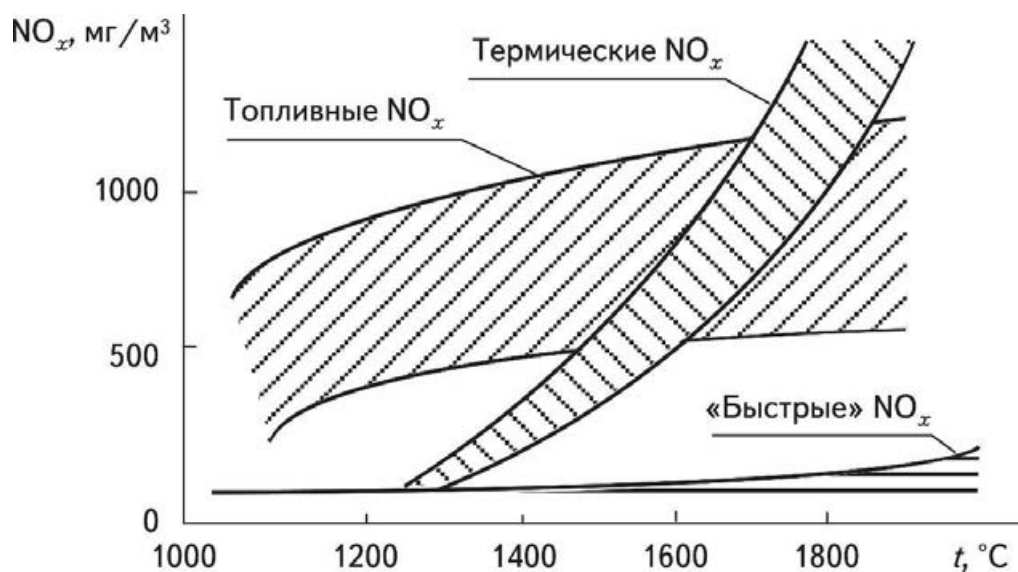


Рисунок 2.22 – Зависимость образования оксидов азота от температуры при сжигании органического топлива

Определение содержания оксидов азота в пробах проводилось в соответствии с РД 52.04.792-2014 «Массовая концентрация оксида и диоксида азота в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием сульфаниловой кислоты и I-нафтиламина» [135].

Отбор проб для определения содержания оксидов азота осуществлялся на твердый сорбент, обработанный йодистым калием и этиленгликолем. Отходящие газы прокачивались через сорбционные трубки. После этого сорбент промывался дистиллированной водой и к полученной пробе добавлялся раствор I - нафтиламина и сульфаниловой кислоты. Через 20 минут определялась концентрация нитрит-ионов в полученном растворе при помощи спектрофотометра HACH DR 5000. На рисунке 2.23 представлены фотографии сорбционных трубок после отбора проб, а также сами пробы, подготовленные к анализу на спектрофотометре.

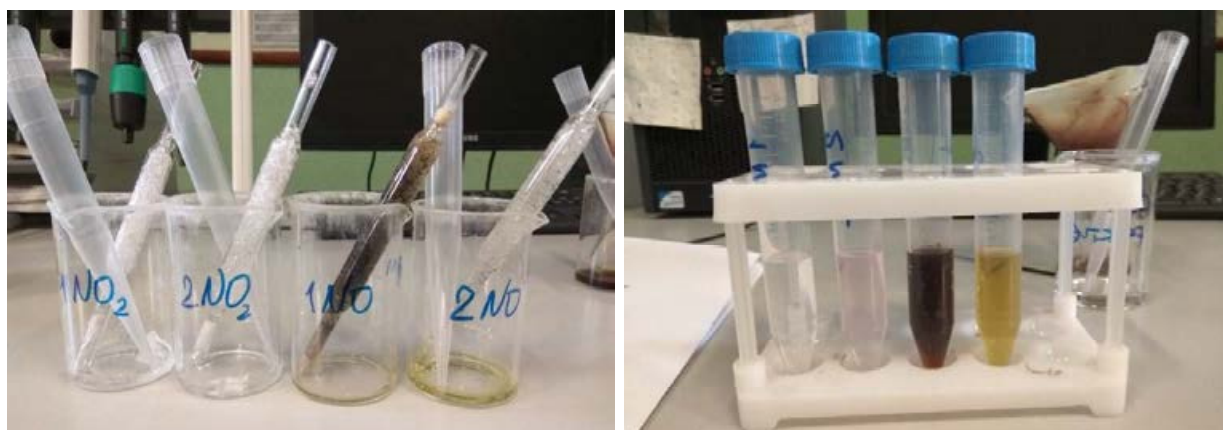


Рисунок 2.23 – Определение содержания оксидов азота в отходящих газах

Для визуализации полученных данных была построена кривая изменения содержания оксидов азота в отходящих газах в зависимости от температуры (рисунок 2.24).

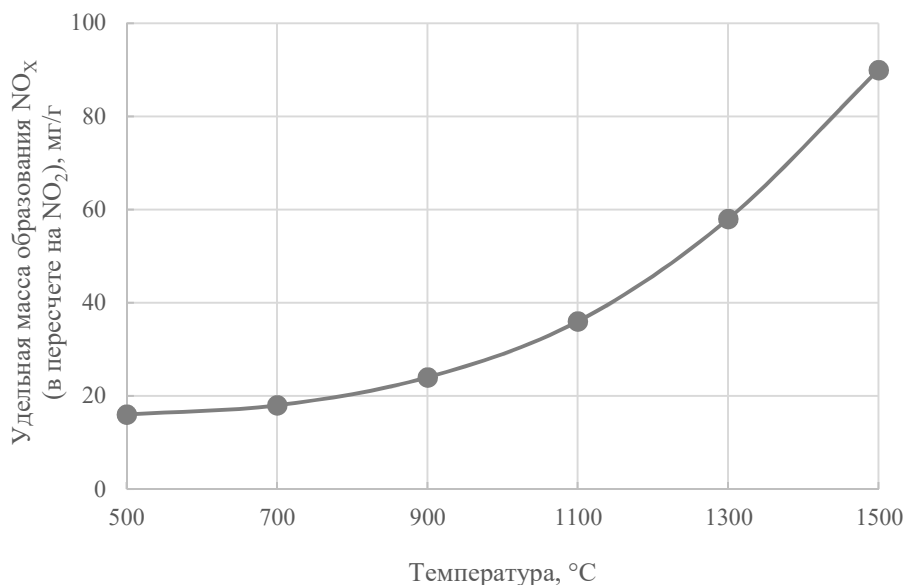


Рисунок 2.24 – Удельная масса оксидов азота в пересчете на NO₂ в отходящих газах в зависимости от температуры

Образование оксидов серы при сжигании топлива связано с взаимодействием серы, находящейся в составе топлива с кислородом при нагревании. В твердом топливе сера встречается как в неорганической, так и в органической формах. В минеральной части угля сера находится в форме пирита и, в незначительных количествах, в форме сульфатов кальция, натрия, железа, магния и др. Органическая сера является составной частью угольного вещества.

Температуры, при которых сера угля, находящаяся в различных формах, окисляется, будут отличаться друг от друга. Так образование SO₂ из серы, входящей в состав органического вещества угля начинается при температуре 350 °С. Пиритная сера начинает окисляться при температуре около 500 °С, а сульфаты – при температурах от 600 до 1150 °С, в зависимости от соединения [136]. Таким образом содержание оксидов серы в отходящих газах будет зависеть от температуры сжигания топлива.

Содержание оксидов серы определялось при помощи индикаторных трубок ТИ-[SO₂-0,13]. Для этого весь объем отходящих газов, полученных при испытаниях, улавливался при помощи пробоотборного мешка, в котором состав пробы усреднялся. После окончания испытаний мешок подсоединялся ко

входу аспиратора через расходомер, а индикаторная трубка к его выходу (рисунок 2.25). Расход газа составлял $100 \text{ см}^3/\text{мин}$. Объем газовой пробы, прошедшей сквозь индикаторную трубку, составлял 200 см^3 . По окончании эксперимента снимались показания и производился пересчет выделившегося оксида серы на единицу массы топлива.



Рисунок 2.25 – Определение содержания оксидов серы в отходящих газах

Для визуализации полученных данных была построена кривая изменения содержания оксидов серы в отходящих газах в зависимости от температуры (рисунок 2.26).

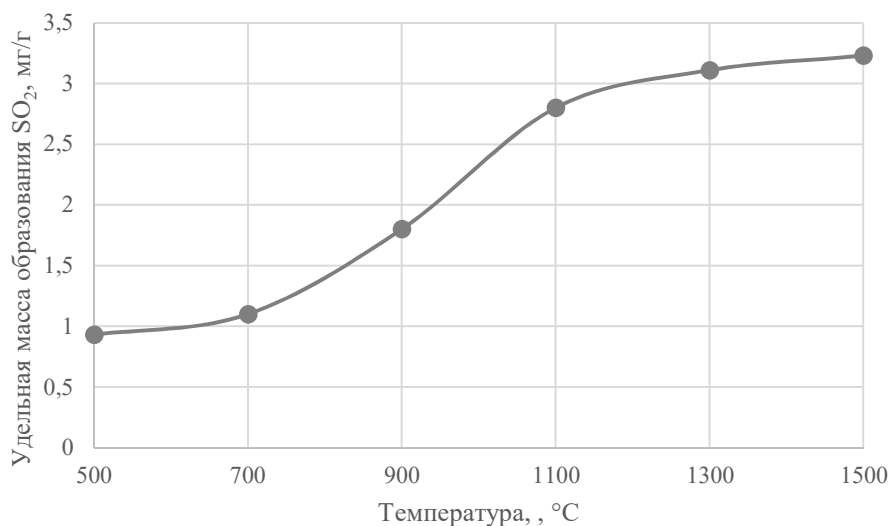


Рисунок 2.26 – Удельная масса оксидов азота в пересчете на SO₂ в отходящих газах в зависимости от температуры

Значения температуры, при которых наблюдаются наименьшая по сумме удельная масса образования углеводородов, оксидов азота и серы в отходящих газах при сжигании топливных водоугольных суспензий, наблюдаются при температуре в пределах от 900 до 1150 °С (рисунок 2.27).

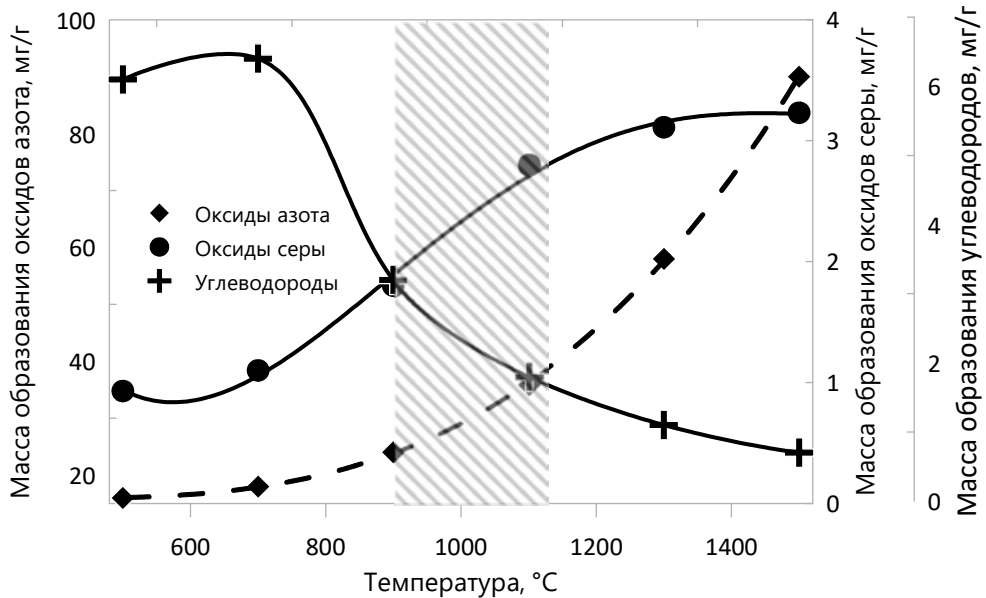


Рисунок 2.27 – Зависимость образования углеводородов и оксидов азота от температуры сжигания

Данные, полученные в ходе экспериментов по определению зольности, выхода летучих, удельной теплоты сгорания, а также элементного состава отходов углеобогащения свидетельствуют о высоком потенциале их использования в качестве сырья для приготовления топливных водоугольных суспензий. Опыты по сжиганию водоугольных суспензий при различных температурах с анализом газовой фазы позволили выбрать температурный диапазон, в котором наблюдаются наименьшая по сумме удельная масса образования углеводородов, оксидов азота и серы в отходящих газах [137].

Эксперименты по сжиганию суспензий проводились слоевым методом, однако наиболее распространенным способом сжигания таких суспензий на сегодняшний день является их распыление при помощи форсунок в уже разогретую камеру сгорания. При этом частицы капле имеют небольшие размеры (менее 200 мкм) и при температуре 900 – 1300 °С быстро разогреваются. Под

действием высоких температур процессы испарения влаги, выхода и горения летучих, а также окисления коксового остатка происходят практически одновременно. При моделировании процессов факельного сжигания по определению состава отходящих газов будет также влиять ряд параметров, которые невозможно контролировать при сжигании слоевым способом, таких как размер капель при распылении суспензии, время нахождения частиц в камере, гранулометрический состав исходного сырья и др.

Для проведения анализа по сжиганию топливных суспензий приближенного к реальным условиям необходима установка, обеспечивающая подачу суспензии в виде капель размером менее 200 мкм в предварительно разогретую до заданных температур камеру сгорания.

Выводы по второй главе

1. Выявлено что на предприятии АО «Междуречье» ежегодно образуется свыше 950 000 тонн отходов углеобогащения, которые при размещении на объектах по хранению отходов не имеют значительного негативного влияния на состояние окружающей природной среды, однако увеличивают вероятность возгорания отвалов вследствие увеличения концентрации мелкодисперсного углесодержащего материала.
2. В результате проведения экспериментов по определению гранулометрического состава, зольности, выхода летучих компонентов, удельной теплоты сгорания и состава отходов углеобогащения установлено, что они имеют высокий потенциал использования в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий.
3. Установлено, что состав отходящих газов, образующихся при сжигании водоугольных суспензий из отходов углеобогащения зависит от температуры сжигания. С ростом температуры снижается количество углеводородов и возрастает содержание оксидов азота и серы в отходящих газах. Температурный диапазон, в котором наблюдаются наименьшая по сумме всех компонентов удельная масса образования загрязняющих веществ лежит в пределах от 900 до 1150 °С.

ГЛАВА 3 СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ВЫБРОСОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

3.1 Влияние параметров подготовки и сжигания топлива на энергетические и экологические характеристики утилизации отходов углеобогащения

3.1.1 Способы сжигания твердого топлива

Сжигание твердого топлива может быть организовано слоевым или камерным способом. Слойной способ, в свою очередь подразделяется на сжигание в плотном и в кипящем слое, а камерный – на факельный и вихревой (рисунок 3.1). В основе классификации способов сжигания лежит аэродинамическая характеристика процесса, определяющая условия омывания горящего топлива окислителем.

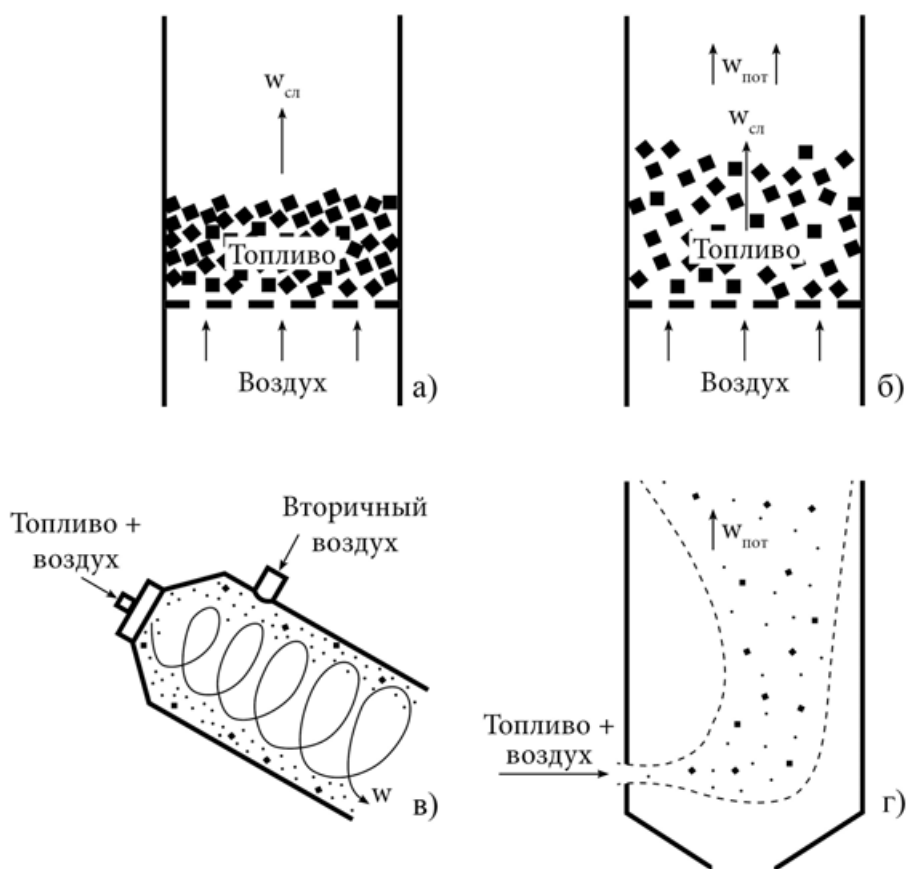


Рисунок 3.1 – Схемы организации процесса сжигания топлива: а) слоевое в

плотном слое; б) слоевое в кипящем слое; в) камерное вихревое; г) камерное факельное

Слоеое сжигание в плотном слое осуществляется путем принудительного движения воздуха через неподвижный или движущийся слой топлива, который реагирует с окислителем, в результате чего образуется поток горячих продуктов сгорания (рисунок 3.1 а). Топливо продувается воздухом с такой скоростью, при которой сохраняется устойчивость слоя. При попадании в камеру сгорания твердое топливо прогревается, из него выделяется влага и летучие вещества, которые изменяют структуру угля и увеличивают его удельную площадь поверхности. Эти процессы протекают у поверхности слоя и не превышают в толщину диаметра среднего куса сжигаемого угля. При слоевом способе сжигания обеспечивается высокая устойчивость горения (за счёт большого запаса топлива в слое, соизмеримого с его часовым расходом), что позволяет сжигать топливо с различными показателями влажности и не требует системы предварительной подготовки [138].

В плотном слое горение топлива протекает при малых теплопотерях в окружающую среду и при высоких температурах в области горения. Увеличение расхода дутья позволяет ускорить процесс окисления, снять ограничение, накладываемое диффузионной областью и перевести процесс в кинетическую область. Однако обтекание частиц топлива окислителем в слое происходит неравномерно по всей зоне горения, что требует увеличения коэффициента избытка воздуха до более чем 1,7 для обеспечения полноты сгорания топлива. Применение слоевого способа сжигания ограничено паропроизводительностью котельных агрегатов до 10 т/час для бурых и каменных углей и до 20 т/час для антрацитов [139].

Преодолеть недостатки слоевого сжигания можно путем использования топки с кипящим слоем. Для организации такого процесса скорость дутья и размеры частиц подбираются так, чтобы топливо оказалось во взвешенном состоянии. При этом сила тяжести, приложенная к частицам, уравновешивается

подъемной силой потока окислителя. С увеличением скорости движения воздуха напор может достигнуть и превысить силу тяжести, приложенную к частицам. Устойчивость слоя в таком случае нарушается и начнется хаотичное движение частиц топлива, которые поднимаются над колосниковой решеткой. Увеличение скорости движения воздуха в кипящем слое возможно до достижения скорости витания частиц, при которой топливо выносятся из слоя. В таком режиме сжигания большая часть воздуха проходит через кипящий слой объемами газа, которые не содержат топлива и перемешивают тонкодисперсный материал слоя. В результате этого условия сжигания стабилизируются по всему объему камеры сгорания и процесс горения протекает практически при одинаковой температуре по всей высоте (рисунок 3.1 б). Таким образом, в отличие слоевого сжигания в плотном слое, в кипящем слое частицы топлива активно перемешиваются по всему объему топки и образуют зону горения, устойчивую по высоте (0,3 – 0,5 м).

Активное перемешивание и длительное пребывание топлива в слое обеспечивает более полное выгорание. Особенностью сжигания угля в кипящем слое является одинаковая температура по объему камеры и небольшие теплотери. Это позволяет организовать сжигание топлива при температурах 900 – 1200 °С с малым коэффициентом недожога. Для этого в зону кипящего слоя вводят инертный наполнитель: шамотную крошку, золу, кварцевый песок и др. Концентрация топлива в кипящем слое обычно не превышает 5 %, что позволяет сжигать таким методом как твердые, так и жидкие виды топлив, включая горючие отходы с низкой удельной теплотой сгорания. Обычно температура отходящих газов при сжигании в кипящем слое низкая, 800 – 1000 °С, что исключает перегрев металла и уменьшает образование оксидов азота и серы в продуктах сгорания. Кроме того, такой способ сжигания позволяет вводить в кипящий слой твердые присадки (например, известняк) для нейтрализации образующихся оксидов серы [140].

На котлах ТЭС производительностью выше 15 – 35 т/час, сжигание твердого топлива осуществляется в потоке воздуха при скорости движения газов,

превышающей скорость витания частиц. Топливо при этом перемещается вместе с газовым потоком сгорая во время движения в пределах топочного пространства (рисунок 3.1 г). Время нахождения частиц в камере сгорания при таком способе сжигания ограничено ее размерами и для обеспечения необходимой степени выгорания, топливо подвергается измельчению до пылевидного состояния. Тонкий помол обеспечивает летучесть частиц и скорость выгорания в 1 – 2 секунды [141].

При сжигании твердого минерального топлива в потоке воздуха, необходимо обеспечить высокую температуру в зоне горения (от 1000 до 1800 °С в зависимости от марки угля). Это достигается рециркуляцией продуктов сгорания, а также разделением потоков дутья на первичный (для розжига) и вторичный (для обеспечения полноты сгорания). Интенсификация перемешивания топлива с кислородом дутья в процессе горения происходит за счет увеличения избытка воздуха до 25 % и использованием специальных конструкций горелочных устройств. Тепловые потери, связанные с химической неполнотой сгорания при таком способе сжигания, составляют менее 1,5 %, а с механической – от 0,5 до 6 % [142].

При пылеугольном сжигании горение топлива в факеле имеет скачкообразный характер. При удалении от зоны активного горения, интенсивность процессов окисления топлива снижается и основные показатели, такие как температура горения, концентрации кислорода и продуктов сгорания, механический недожог, изменяются плавно. Это обусловлено быстрым выгоранием летучих компонентов и мелких частиц угля, которые реагируют с первичным потоком дутья.

При факельном сжигании топлива, в ядре факела наблюдаются температуры до 1500 – 2000 °С, что может привести к шлакованию стенок топки и высоким концентрациям оксидов серы, азота и других вредных выбросов в составе отходящих газов [143].

Устранить недостатки факельного сжигания можно путем организации вихревого движения топочных газов. В отличие от сжигания в факеле, при

вихревом методе частица или капля топлива циркулирует по организованному контуру так долго, сколько необходимо для ее полного сгорания (рисунок 3.1 в). При возврате частиц топлива в зону активного горения, возможно увеличение времени пребывания в топке без изменения её геометрических размеров. Также достоинствами вихревого способа сжигания является снижение тепловых потерь, связанных с механическим недожогом, уменьшение затрат на помол топлива и стабильность процесса горения за счёт увеличения массы топлива в топке. Недостатками данного способа являются ограничения по производительности и типу применяемых углей [139].

Так как топливные водоугольные суспензии содержат от 30 до 60 % воды, то проблемы, связанные с организацией топочного процесса, обычно возникают из-за их пониженной калорийности. Топливо, попавшее в топку котельного агрегата в виде капель, проходит стадии испарения воды, воспламенения угля и выгорания коксового остатка. Топки котельных агрегатов, предназначенные для сжигания водоугольных топливных композиций, должны обеспечивать достаточное время пребывания частиц в камере сгорания, интенсивное перемешивание капель топлива и окислителя, а также поддерживать необходимую температуру по всему объему топочной камеры. Такие условия могут быть обеспечены при вихревом способе сжигания, что является причиной его распространения при сжигании суспензионных видов топлив. Однако, при переоборудовании действующих котлоагрегатов, осуществляющих сжигание топлива слоевым способом или в кипящем слое на использования в качестве топлива водоугольных суспензий, организация вихревого способа часто невозможна ввиду конструктивных особенностей существующего на предприятии оборудования. В таких случаях применяют факельное сжигание, которое является более простым и не требует значительных капитальных затрат при реализации проекта. Факельное сжигание на сегодняшний день является основным способом сжигания водоугольных суспензий, особенно в котлах средней и большой мощности [33]. По этой причине для проведения лабораторных испытаний, приближенных к реальным условиям, был спроектирован

и изготовлен экспериментальный стенд, в котором можно проводить испытания по факельному сжиганию топлив.

3.1.2 Влияние параметров приготовления и распыла топливных суспензий на экологические и энергетические характеристики их сжигания

Для возможности управления процессом сжигания и получения наилучших топливных и экологических характеристик при термической утилизации отходов углеобогащения, необходимо рассмотреть влияние основных параметров приготовления, распыления и горения топливных суспензий.

На рисунке 3.2 представлены основные стадии сжигания топливных водоугольных суспензий по оси распыла факела. В нижней части рисунка 3.2 можно видеть основные возможные варианты протекания процесса окисления угольных частиц, в зависимости от параметров распыла, крупности помола исходного сырья, а также характеристик сжигания суспензий.

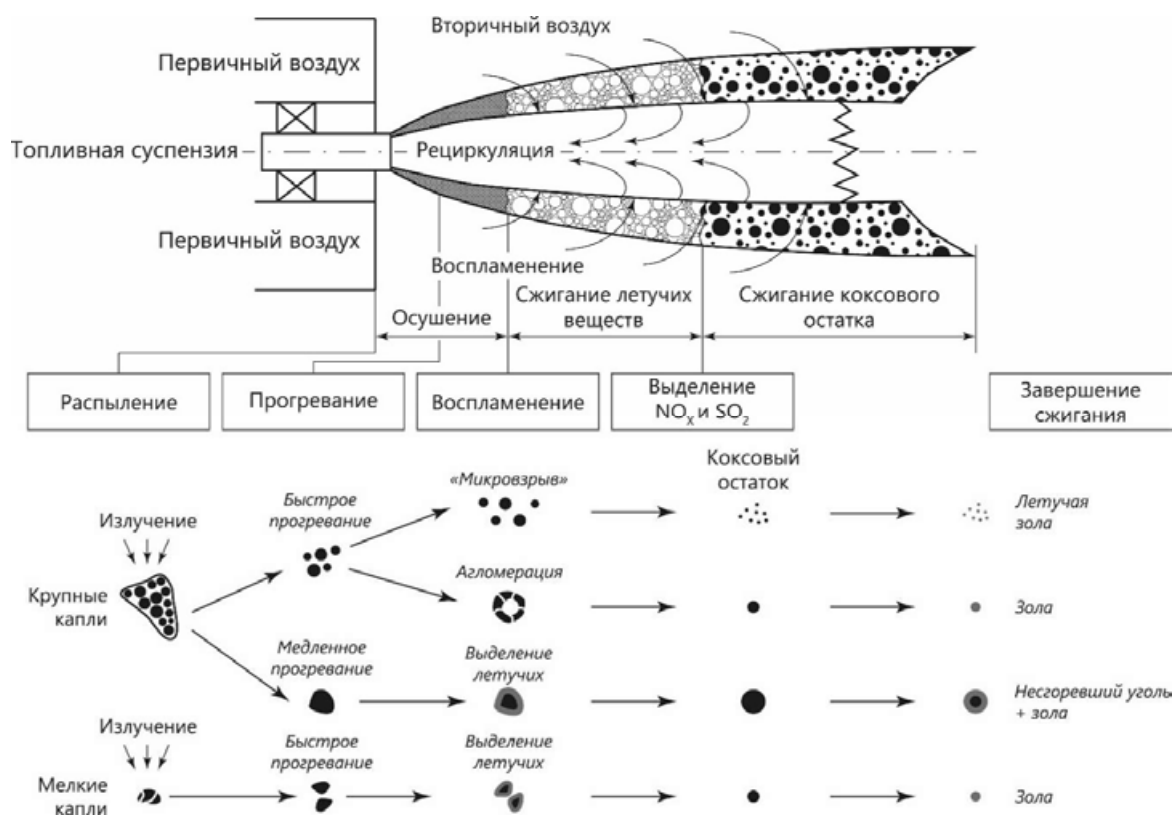


Рисунок 3.2 – Горение водоугольного топлива при факельном сжигании

Распыление водоугольного топлива осуществляется воздухом, в два этапа. На первом этапе происходит дробление струи суспензии за счет кинетической энергии распыляющего агента. На втором этапе, при большой скорости движения распыленных частиц топлива осуществляется их дробление за счет сил сопротивления газовой среде в топке котла. В результате возникающего динамического воздействия капли разрываются на более мелкие, а жидкая фаза с тонкими угольными частицами срывается с поверхности крупных угольных частиц [142].

При взаимодействии капли топлива с разогретым окислителем, её температура повышается. Это тепло затрачивается на испарение воды из поверхностного слоя, а также на переход органической составляющей угля в газообразное состояние. При достижении концентрации летучих органических соединений в окрестности капли критических значений, происходит их зажигание. Теплота, выделяющаяся при горении которых, прогревает коксовый остаток, его температура повышается и происходит возгорание углерода.

При сжигании водоугольных топливных суспензий из-за добавления воды, длина пламени увеличивается на 20 – 40 % по сравнению с пылеугольным сжиганием отходов углеобогащения. Это способствует более равномерному протеканию процесса горения топлива, снижению коэффициента недожога, а также уменьшению концентрации углеводородов в составе отходящих газов [143].

Основные характеристики приготовления и сжигания топливных суспензий из отходов углеобогащения, а также основные параметры, которые необходимо контролировать при сжигании такого рода топлив, представлены на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Основные параметры термической утилизации отходов углеобогащения

При приготовлении топливных суспензий на характеристики сжигания влияют следующие параметры: тонина помола, соотношение дисперсной и дисперсионной фаз суспензий, состав отходов, а также влияние различных добавок.

– Размеры твердых частиц влияют на седиментационную стабильность суспензии; эффективность распыла при помощи форсунок; химический и механический недожог топлива; а также износ и стабильность работы оборудования, обеспечивающего перекачивание и подачу суспензии в котлоагрегат. Для улучшения перечисленных характеристик необходимо равномерное и минимально возможное измельчение сырья для приготовления топливных суспензий, однако это приведет к повышению затрат на его истирание. Одним из наиболее эффективных способов помола твердых частиц в жидкой фазе является гидроудар. В таких установках для уменьшения размера частицы используется свободный удар. Частицы, сталкиваясь с ударными элементами роторов получают разнонаправленные удары, интенсивность которых возрастает по мере продвижения материала к выходу из помольной камеры. Вода при таком измельчении является проводником кинетической энергии, а также снижает прочность твердого тела, облегчая его разрушение в соответствии с эффектом

Ребиндера [144, 145]. Согласно работам [142, 146 – 148], сжигание топливных суспензий наиболее эффективно происходит при размерах дисперсионной фазы менее 150 мкм.

– Соотношение твердой и жидкой фаз в суспензиях выбирается таким образом, чтобы количество твердого горючего компонента было максимальным, для повышения удельной теплоты сгорания и увеличения стабильности горения топлива, однако при недостаточном содержании воды, суспензии невозможно распылять при помощи форсунок и перемещать трубопроводным транспортом из-за их высокой вязкости. При содержании твердых частиц в составе суспензии от 50 до 70 масс. %, её вязкость находится в пределах от 0,5 до 0,8 Па · с, что является достаточным показателем для транспортировки и распыла суспензионного топлива [149 – 152].

– Состав исходного сырья для получения топливных водоугольных суспензий существенно влияет на параметры приготовления, распыла и сжигания. Следует различать петрографический состав, состав органической и минеральной составляющей.

Состав органической составляющей углей связан со степенью их метаморфизма. С её повышением увеличивается массовая доля углерода с 50 % в торфах до 98 % в антрацитах и снижается содержание кислорода от 40 % и до 1 %. Состав органической составляющей углей определяет их удельную теплоту сгорания. Помимо этого, степень метаморфизма существенно влияет на качественный и количественный состав летучих компонентов, а это является одной из основных характеристик исходного сырья, определяющей возможность его использования для получения топливных суспензий. Состав летучих определяет температуру зажигания и стабильность горения водоугольного топлива [33].

Исследования [153], проведенные с различными типами углей (от лигнита до антрацита) позволили вывести соотношение между химическим составом угля и концентрацией твердой фазы в суспензии. Максимальное содержание угля в суспензии прямо пропорционально содержанию углерода и обратно

пропорционально внутренней или равновесной влаге угля, содержанию кислорода и летучих. Авторы рекомендуют рассматривать эти параметры в качестве основных при выборе углей для приготовления топливных водоугольных суспензий.

Топливные композиции, полученные на основе углесодержащих материалов, представляют собой микрогетерогенные системы, поэтому к петрографическому составу твердой фазы предъявляются особые требования с точки зрения обеспечения рациональных реологических параметров, стабильности суспензий и достижения максимального теплового эффекта при сжигании. Основными группами микрокомпонентов углей являются липтинит, витринит и фюзинит. Различие их свойств значительно проявляется на низких стадиях метаморфизма. Фюзинит в сравнении с другими микрокомпонентами отличается пониженной сорбционной способностью, повышенной плотностью и незначительным количеством летучих компонентов, выделяющихся при нагреве. Эффективность сжигания угля находится в обратной зависимости от содержания фюзенированных микрокомпонентов. Сжигание угля с высоким содержанием фюзенированных компонентов должно проводиться с повышенным коэффициентом избытка воздуха, при более высоких температурах и при увеличенном времени пребывания углей в топке, по сравнению с витринитовыми углями [33].

Состав минеральной части оказывает существенное влияние на технологические параметры топливных суспензий. Реологические параметры суспензий зависят от состава минеральных примесей. К ним относятся глинистое вещество, соединения железа и алюминия, карбонаты, кварц и др. Присутствие в твердой фазе глинистых минералов снижает текучесть суспензий. Для них характерно набухание за счет капиллярных сил. Склонность глинистого вещества к набуханию отрицательно влияет на реологические характеристики топливных суспензий из каменных углей. Однако, в то же время, их присутствие повышает устойчивость ВУТ к расслаиванию [154].

– В качестве добавок к водоугольным суспензиям используются пластификаторы, а также различные отходы производств (осадки очистных сооружений, нефтесодержащие компоненты, отходы растительного происхождения и др.).

Пластификаторы при приготовлении водоугольных суспензий используются в качестве добавок, влияющих на их реологические и седиментационные характеристики. Добавление к угольным суспензиям веществ, снижающих поверхностное натяжение также влияет на характеристики распыла [103]. Обычно содержание пластификаторов в суспензиях по массе не превышает 2 %. При таких низких содержаниях, влияние пластификаторов на другие характеристики хранения, транспортировки и сжигания топливных суспензий незначительно.

Добавление отходов производства в состав топливных суспензий применяется как для улучшения топливных характеристик, так и для утилизации отходов производства и потребления. В качестве таких добавок используются отходы нефтехимической отрасли, сточные воды и их осадки, золошлаковые отходы котельных с высоким значением химического недожога, отходы растительного происхождения, например, отходы деревообработки, сельского хозяйства и т.д. Содержание таких добавок в топливных суспензиях составляет от 5 до 50 % от массы твердого компонента топливной суспензии.

При добавлении значительного количества компонентов, происходит влияние практически на все параметры приготовления и сжигания топливных суспензий.

Добавление отходов нефтепереработки приводит к изменению седиментационных и реологических характеристик суспензии, влияет на температуру зажигания и горения суспензий, увеличивает удельную теплоту сгорания и влияет на состав отходящих газов [155].

Осадки сточных вод как правило имеют высокую зольность, которая отрицательно сказывается на удельной теплоте сгорания топливных суспензий и

увеличивает их седиментационную устойчивость. Помимо этого, в составе таких отходов часто содержатся соединения азота и серы, которые увеличивают токсичность отходящих газов.

В качестве растительных добавок используют такие отходы как солома, лузга подсолнечника, отходы деревообрабатывающей промышленности и др. Одновременное сжигание отходов растительного происхождения и угля, имеет несколько преимуществ: снижение токсичности отходящих газов за счет удерживания серы щелочными и щелочноземельными соединениями, входящими в состав золы от сжигания компонентов растительного происхождения; утилизацию большого количества горючих сельскохозяйственных и древесных отходов; снижение температуры воспламенения суспензии за счет содержания большого количества летучих в составе биомассы; увеличение седиментационной стабильности таких суспензий. Однако при одновременном сжигании угля и отходов растительного происхождения, увеличивается шлакование поверхностей топki и коррозионный износ. Также значительно усложняется процедура приготовления таких суспензий [156].

Также помимо параметров приготовления суспензий, на состав отходящих газов и энергетические параметры термической утилизации отходов обогащения угля влияют характеристики сжигания. К ним относятся: температура сжигания, коэффициент избытка воздуха, размеры капель суспензии после распыления и время нахождения капель в камере сгорания.

– Температура в топке является одним из важнейших показателей при сжигании топлив. Она регулируется дозированием подачи топлива, температурой и расходом подачи дутья, режимом сжигания, влиянием добавок и другими параметрами. Температура в камере сгорания обеспечивает стабильность горения, а также влияет на химический недожог топлива. Влияние температуры в камере сгорания на состав отходящих газов подробнее было описано в п. 2.4.2. Считается что наилучшие характеристики сжигания водоугольных суспензий наблюдаются в диапазоне температур от 850 до 1200 °С [79, 116]. В

предварительных лабораторных испытаниях для получения наименьших концентраций загрязняющих веществ в отходящих газах был выбран температурный диапазон от 900 до 1150 °С (п. 2.4.2).

– Коэффициент избытка воздуха в топке выбирается в зависимости от: состава топлива и содержания горючей массы, способа сжигания, конструкции топки и других параметров. Определяющей характеристикой при выборе рационального значения избытка воздуха в топке котельного агрегата, являются минимальные суммарные потери, связанные с уносом тепла отходящими газами, химическим и механическим недожогом топлива [131].

Коэффициент избытка воздуха также влияет на состав отходящих газов. При недостатке окислителя в камере сгорания образуется меньшее количество оксидов азота и серы, однако возрастают концентрации углеводородов из-за неполного окисления топлива, а также увеличивается коэффициент недожога топлива. При увеличении коэффициента избытка воздуха в камере сгорания происходит увеличение объемов образования термических оксидов азота, а также увеличивается содержание оксидов серы в отходящих газах и возрастают потери тепла с отходящими газами. При этом концентрации углеводородов снижаются. При факельном сжигании топливных суспензий считается достаточным избыток воздуха равный 1,2 – 1,4 [104, 157].

– Размер капель суспензии при распыле определяется параметрами форсунки, а также реологическими характеристиками суспензии и размером частиц дисперсной фазы после помола. Параметры распыла выбираются в зависимости от характеристик форсунки, а также проектного времени нахождения капель в камере сгорания. При больших размерах капель суспензии, коксовый остаток может не догорать в топке, что увеличит степень недожога топлива. Также при отклонении от проектных параметров распыла, траектория и скорость движения капель суспензии могут изменяться, что значительно влияет на экологические и энергетические параметры сжигания при вихревой схеме организации процесса [158]. Считается оптимальным распыление до капель

диаметром не более 300 мкм, с максимальным количеством частиц в пределах от 40 до 150 мкм [159].

– Время нахождения капель суспензии в топке в наибольшей степени определяется схемой организации процесса сжигания, а также геометрическими параметрами топки котла. Также на время нахождения капель влияют параметры распыла суспензии. От времени нахождения частиц в камере зависит полнота выгорания коксового остатка угля [160].

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований

3.2.1 Экспериментальный стенд для проведения испытаний

Для проведения экспериментов по сжиганию топливных суспензий, приближенных к реальным условиям, был спроектирован лабораторный стенд, который позволяет проводить испытания по факельному сжиганию различных видов топлив, в том числе суспензионных и обладает следующими характеристиками:

- основные геометрические размеры: $D \times Ш \times В$ 700 × 300 × 500 мм;
- установка 5 термопар для контроля температуры в камере сгорания;
- рабочая температура – до 1400 °С;
- контроль подачи дутья – от 1 до 100 л/мин;
- возможность переключения дутья для использования топлива подсветки и для работы с жидким топливом, распыляемым при помощи форсунки;
- возможность отбора проб загрязняющих веществ;
- установке двухфазной пневматической форсунки для распыления жидких топлив.

Внешний вид экспериментального стенда для сжигания топливных суспензий представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Экспериментальный стенд для факельного сжигания жидких топлив

Помимо самого стенда была спроектирована двухфазная пневматическая форсунка с внешним смешиванием для распыления топливных водоугольных суспензий. Конструктивно форсунка состоит из двух элементов, соединенных между собой резьбовым соединением, что позволяет регулировать зазор, через который осуществляется подача сжатого воздуха и тем самым изменять угол распыла факела и скорость потока газа. Форсунка обладает следующими характеристиками:

- устойчивость к абразивному износу;
- возможность распыления вязких жидкостей;
- размер капель при распылении менее 200 мкм;
- расход суспензии до 5 л / мин;
- давление воздуха 2 – 5 атм;
- возможность регулирования угла факела распыла (от 15° до 80°).

Внешний вид спроектированной и изготовленной форсунки представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Двухфазная пневматическая форсунка
с внешним смешиванием

Схема подключения стенда представлена на рисунке 3.6 и включает в себя следующие основные части:

- корпус стенда изготовлен из стали марки Ст3 толщиной 4 мм, с футеровкой из шамотной плиты ШПВХ-550 толщиной 25 мм. На одной из боковых стенок корпуса расположена дверка для наблюдения за процессом горения и для поджига топлива подсветки, а на другой – отверстия для установки до 5 термопар. Верхняя часть корпуса съемная для полной очистки стенда от золошлаковых отходов. На верхней крышке располагается отверстие для отвода отходящих газов. В задней части находится крепление для форсунки, а также два отверстия для подачи дутья, нижнее из которых подключено к перфорированным трубам, распределяющим воздух для равномерного горения топлива подсветки, а верхнее предназначено для подачи дутья непосредственно к распыляемой суспензии;

- в корпус вмонтировано 5 хромель-алюмелевых термопар, три из которых расположены по оси факела распыла, а две на удалении. При этом все термопары могут передвигаться в направлении перпендикулярном стенке корпуса, в которой они закреплены и тем самым измерять температуру в точках

Сборочный чертеж испытательного стенда с основными размерами и необходимыми сечениями представлен в приложении В. В приложении Г представлен чертеж двухфазной пневматической форсунки с внешним смешиванием.

3.2.2 Методика приготовления топливных суспензий

Для приготовления водоугольных и органоводоугольных суспензий, отходы углеобогащения измельчались при помощи лабораторной шаровой мельницы SPEX SamplePrep 8000D. Размер угольной пыли, используемой в опытах, составлял от 30 до 100 мкм для более чем 90 % частиц. После помола отходов происходило их просеивание через сито с размером ячеек 125 мкм. Непросеявшийся остаток отправлялся обратно на стадию измельчения. При проведении экспериментов по влиянию крупности помола на состав отходящих газов и седиментационную стабильность суспензий, средний размер частиц варьировался от 35 до 202 мкм.

Приготовление водоугольных суспензий проводилось при помощи верхнеприводной мешалки Экросхим ПЭ-8300, при скорости вращения 500 об./мин. В качестве дисперсионной среды использовалась дистиллированная вода. Компоненты водоугольной суспензии в массовом соотношении отходы обогащения угля / вода равным 60 / 40 добавлялись в лабораторный стакан и перемешивались в течении 5 минут.

Приготовление органоводоугольных суспензий с добавкой отработанного масла проводилось в два этапа. На первом подготавливалась эмульсия, для чего в лабораторном стакане смешивались отработанное масло и вода. Длительность подготовки водомасляной эмульсии – 3 минуты. После этого в стакан добавлялись измельченные отходы углеобогащения. Длительность гомогенизации суспензии составляла 5 минут [161].

3.2.3 Определение седиментационной стабильности топливных суспензий

Седиментационная стабильность является важной эксплуатационной характеристикой суспензионного топлива. Она характеризует способность топлива сохранять однородный состав по всему объему и не расслаиваться на отдельные компоненты в течение требуемого периода времени. Устойчивость суспензий зависит от крупности частиц дисперсной фазы. Суспензии, в которых твердые частицы имеют крупный размер, имеют тенденцию к расслаиванию за меньший промежуток времени [162].

Существует несколько методов определения седиментационной устойчивости суспензий, основанных на: изменении плотности пропускаемого светового потока; определении плотностей суспензии в различных участках при осаждении; глубине проникновения стеклянного или металлического стержня и на визуальных наблюдениях расслоения [163].

При проведении экспериментов по оценке седиментационной стабильности суспензий из отходов углеобогащения использовался метод визуальных наблюдений. В основе данного метода лежит определение толщины слоя, отделившегося от суспензии в процессе отстаивания. Седиментационная стабильность вычислялась по формуле:

$$S = \frac{H_o - H_c}{H_o} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

Где: H_c – высота слоя отделившегося осветленного слоя;

H_o – высота слоя исходного образца.

Наблюдение за процессом расслоения образцов топливных суспензий в зависимости от крупности помола производилось с помощью мерных пробирок емкостью 10 см³ с ценой деления 0,1 см³. Для удобства контроля положения границ раздела фаз использовался фотоаппарат с функцией интервальной съемки. Фотографирование образцов производилось каждые 3 часа. На рисунке 3.7 представлен один из полученных в результате наблюдения кадров.



Рисунок 3.7 – Определение седиментационной стабильности образцов водоугольных суспензий

Далее вычислялся показатель седиментационной устойчивости для всех образцов. На рисунке 3.8 представлены результаты определения седиментационной стабильности суспензий после 7 дней эксперимента.

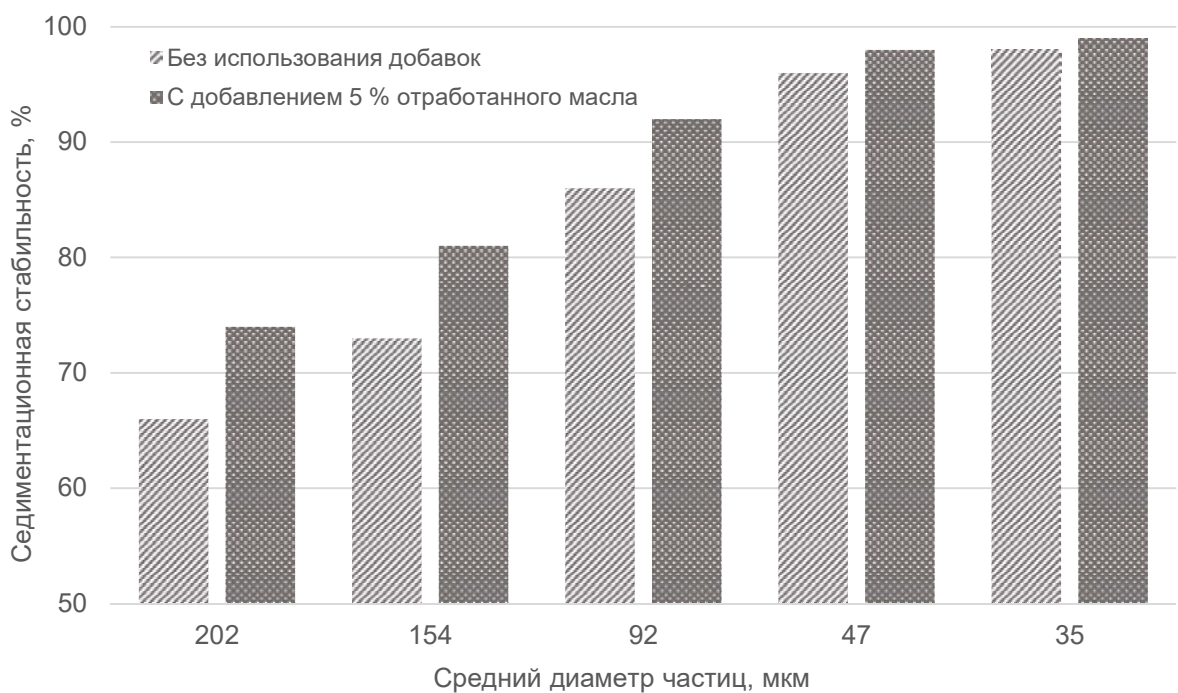


Рисунок 3.8 – Зависимость седиментационной стабильности образцов водоугольных суспензий от крупности помола

На основании полученных данных можно сделать вывод что использование отработанного масла в качестве добавки повышает стабильность суспензии для крупных частиц более чем на 7 %. С уменьшением степени помола влияние такой добавки снижается и для суспензии со средним диаметром частиц 35 мкм, влияние составляет менее 1 %.

Также можно сделать вывод о том, что суспензии со средним диаметром частиц 47 и 35 мкм остаются стабильными в течении более чем 7 суток без добавления пластификаторов, отработанного масла и других компонентов.

Средний размер частиц отходов углеобогащения в 47 мкм требует меньшего количества затраченной энергии на помол до требуемых размеров. По этой причине дальнейшие опыты проводились с выбранным гранулометрическим составом (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Гранулометрический состав твердой части топливных суспензий

При длительном хранении водоугольного топлива для увеличения срока стабильности суспензий может применяться:

- периодическая рециркуляция суспензии при помощи насоса;
- перемешивание лопастной мешалкой;
- использование добавок-стабилизаторов.

Выбранная степень помола позволяет не только оставаться суспензии стабильной в течении длительного периода времени, но и производить ее эффективный распыл, а также исключить возможность забивания угольными частицами сопла форсунки.

3.2.4 Определение параметров распыла топливных суспензий

Для определения характеристик распыла суспензии, двухфазная пневматическая форсунка подключалась к воздушному компрессору через ресивер для подачи сжатого воздуха и к перистальтическому насосу, подающему топливную суспензию.

Суспензия готовилась согласно п.3.2.2, со средним диаметром частиц 47 мкм. Соотношение отходы обогащения угля / вода равнялось 60 / 40. Вязкость полученной суспензии при скорости сдвига 10 с^{-1} составила $0,68 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Расход суспензии для распыла составлял $0,2 \text{ дм}^3/\text{мин}$, давление воздуха – 2,5 бара, а его расход – $7 \text{ дм}^3/\text{мин}$. На рисунке 3.10 можно видеть факел распыла суспензии при заданных параметрах работы пневматической форсунки.



Рисунок 3.10 – Факел распыла суспензии при опробовании форсунки

При выбранных параметрах происходит стабильный и равномерный распыл суспензионного топлива.

Для определения размеров капель суспензии, распыление производилось на экран с закрепленными на нем листами бумаги. Расстояние от сопла форсунки до листов составляло 30 см. В качестве примера на рисунке 3.11 представлен один из таких отпечатков. В нижней части этого рисунка расположена линейка с ценой деления 1 мм для визуализации полученных параметров распыла.

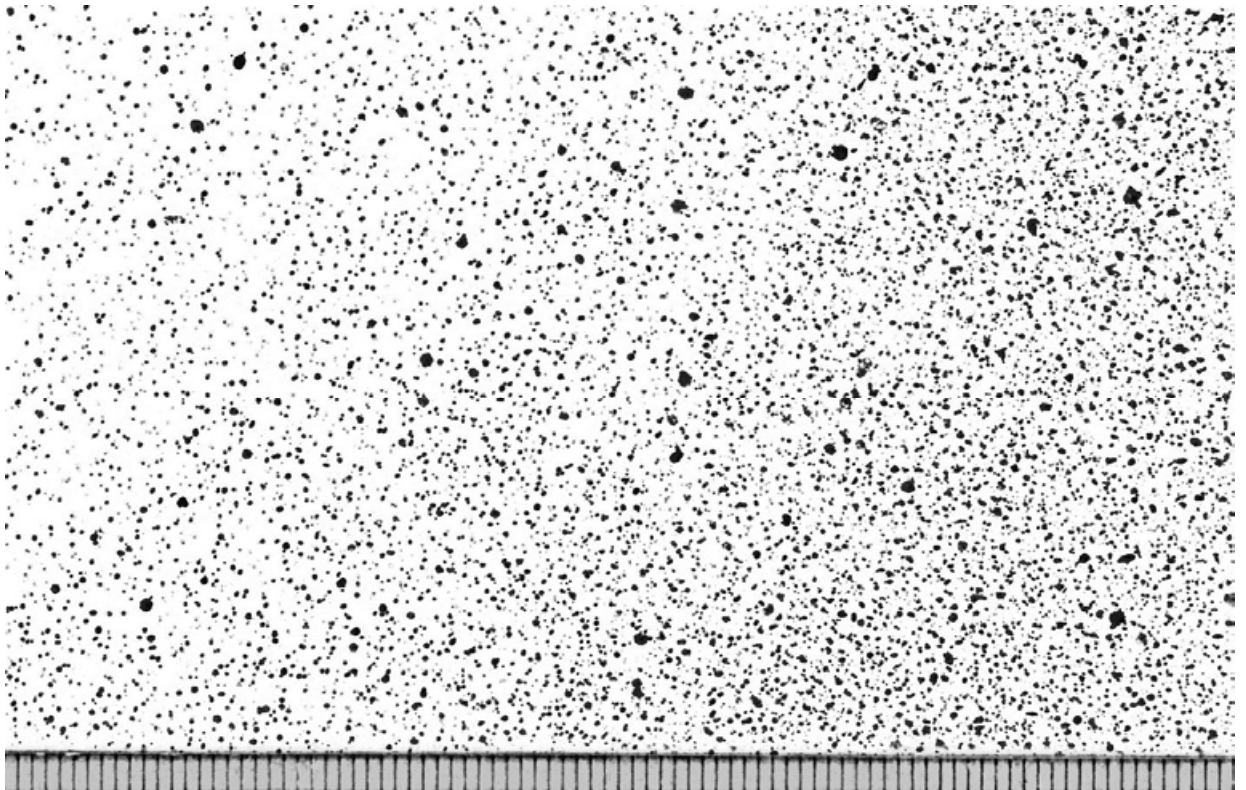


Рисунок 3.11 – Отпечаток распыла форсунки

Обработка отпечатка от распыла суспензии осуществлялась в программе ImageJ. Были обработаны свыше 85 000 капель от распыла топливной суспензии. После обработки были рассчитаны средний и медианный диаметры капель, которые составили 128 мкм и 87 мкм соответственно.

На рисунке 3.12 представлено распределение содержания капель суспензии на отпечатке распыла форсунки в зависимости от их размера.

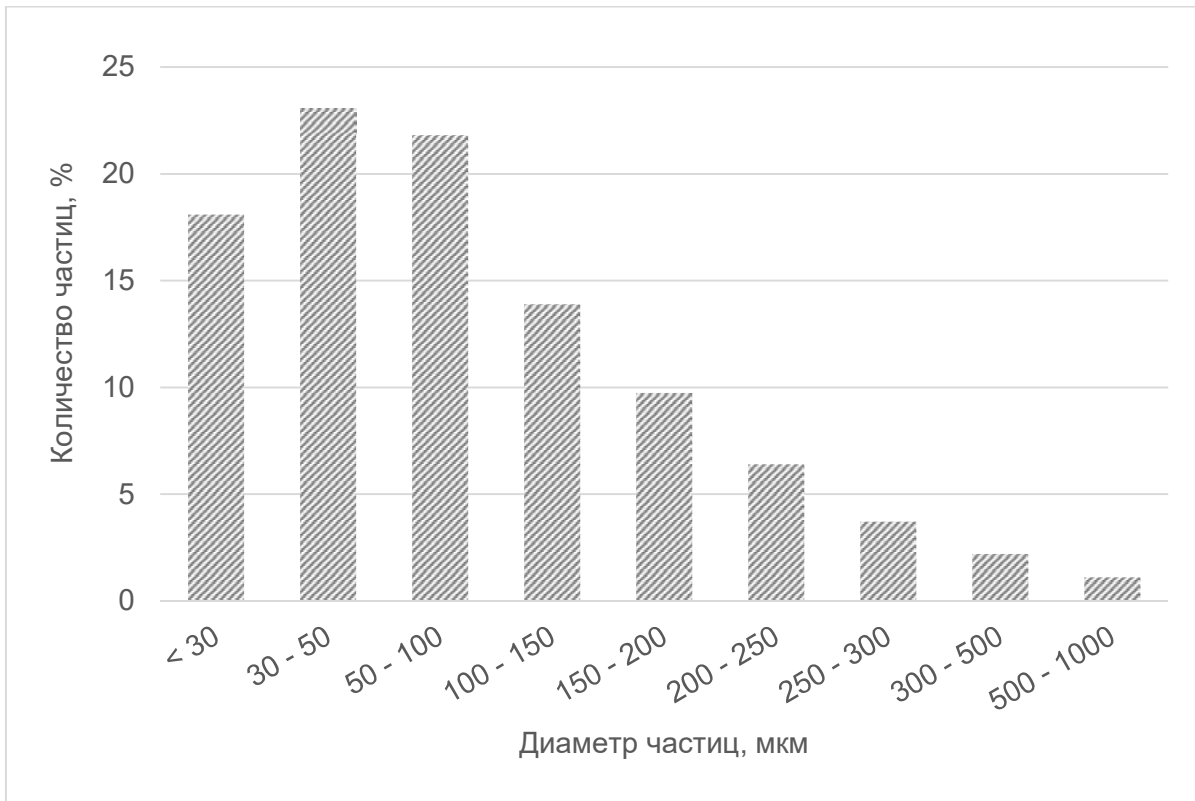


Рисунок 3.12 – Распределение количества капель суспензии при распылении

Полученные характеристики распыления топливных суспензий позволяют использовать спроектированную и изготовленную форсунку для сжигания топливных суспензий.

В работе автором [159] установлена зависимость диаметра распыляемых капель от скорости движения воздуха или пара, разбивающего топливо. Установлено, что радиус капель после распыления определяется по формуле:

$$r_k = \frac{2\sigma}{\psi\rho V_r^2} \quad (3.2)$$

Где: σ – коэффициент поверхностного натяжения;

ψ – коэффициент сопротивления газовой фазы;

ρ – плотность газовой фазы;

V_r – относительная скорость капли по отношению к газовой среде.

Таким образом диаметр капли обратно пропорционален квадрату скорости газового потока.

Конструкция предлагаемой форсунки спроектирована таким образом, что газ, разбивающий суспензию подается через зазор между корпусом и соплом, величину которого можно регулировать. При уменьшении зазора будет увеличиваться скорость движения газа через него, что приведет к уменьшению радиуса капель суспензии и к увеличению эффективности горения суспензионного топлива.

При оценке влияния степени распыла суспензии на состав отходящих газов проводились такие же эксперименты для подбора характеристик работы форсунки путем изменения зазора между корпусом и соплом форсунки, при сохранении остальных параметров распыла (п.3.3.2.3).

3.2.5 Методика определения состава отходящих газов

Для определения компонентного состава продуктов сгорания в зависимости от различных характеристик приготовления и сжигания водоугольного топлива, полученного из отходов углеобогащения, использовался экспериментальный стенд для сжигания жидких топлив. Для этого камера сгорания стенда разогревалась до температуры около 850 °С при помощи топлива подсветки – угля. Дутье при этом подавалось снизу, через распределительные перфорированные трубы. После достижения температуры, необходимой для поджига водоугольных и органоводоугольных суспензий, подача дутья переключалась на режим работы с жидким топливом, распыляемым при помощи форсунки. Определение содержания загрязняющих веществ в отходящих газах от сжигания угля, водоугольных и органоводоугольных суспензий осуществлялось после полной стабилизации показателей горения.

Определение содержания оксидов азота (в пересчете на NO_2) и диоксида серы в отходящих газах производилось при помощи индикаторных трубок ТИ - $[\text{NO}_x-0,05]$ и ТИ - $[\text{SO}_2-0,13]$ (рисунок 3.13). Для этого трубки для контроля химических веществ в газовоздушных средах одновременно подключались к аспиратору ОПТЭК ОП-824ТЦ, при помощи которого устанавливался

расход газовой смеси, проходящей через индикаторные трубки. Он составлял $0,5 \text{ дм}^3/\text{мин}$ для каждого компонента. Время прокачки отходящих газов регистрировалось при помощи секундомера. При этом индикаторная масса трубок изменяла свой цвет, после чего по шкале снимались значения концентрации NO_x и SO_2 в отходящих газах.



Рисунок 3.13 – Определение содержания загрязняющих веществ в отходящих газах

Отбор проб отходящих газов для определения содержания углеводородов проводился с учетом рекомендаций, представленных в работе [164]. Пробы отбирались методом внешней фильтрации на сорбционные трубки, заполненные универсальным сорбентом Tenax GR в условиях изокINETИЧНОСТИ. Отбор проб осуществлялся в течение 2 минут с расходом прокачивания газовой смеси $0,5 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Температура окружающей среды во время экспериментов была не выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому наблюдалось резкое снижение температуры газа по тракту заборной трубки. За сорбционной трубкой размещался поглотительный раствор (н-гексан) для контроля проскока углеводородов, который не превышал $1 - 2 \%$.

Отобранные пробы анализировались на содержание углеводородов при помощи газового хромато-масс-спектрометра GCMS-QP2010 Ultra Shimadzu с термодесорбером Unity-2.

Метод термодесорбции заключается в извлечении летучих компонентов с сорбента при нагревании потоком инертного газа и их ввод в аналитическую систему. Нагрев проводился от 40 до 280 °С со скоростью 500 °С/мин. Поток продувочного газа 20 см³/мин, время десорбции составляло 1 мин, время продувки – 5 мин.

Газохроматографический анализ проводился на капиллярной колонке HP-5MS, 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, расход газа-носителя (гелия) через колонку составлял 1 см³/мин с делением потока (split) 20 : 1; температура испарителя – 280 °С; начальная температура термостата колонок – 30 °С; выдержка при начальной температуре – 5 мин; скорость нагрева – 10 °С/мин; конечная температура термостата колонок – 250 °С; выдержка при конечной температуре – 20 мин, режим детектирования – сканирование по полному ионному току (SCAN).

Для градуировки прибора использовались стандартные калибровочные растворы алканов C5 – C20 в дихлорметане; этанола в метаноле; ацетона в четыреххлористом углероде; ацетальдегида в бензоле, а также растворы нафталина, антрацена, пирена, бенз(а)антрацена и бенз(а)пирена в метаноле.

Содержание оксидов азота и серы в отходящих газах, как основных поллютантов образующихся при сжигании топлив определялось во всех проведенных экспериментах [131]. Концентрации углеводородов определялись только в тех опытах, где, согласно литературным источникам, изменение того или иного параметра значительно влияет на содержание органических соединений в составе отходящих газов при сжигании топлива. К ним относятся: влияние добавок органических соединений, изменение температуры в камере сгорания и влияние коэффициента избытка воздуха [165]. Полученные значения концентраций загрязняющих веществ после измерений пересчитывались на удельную массу их образования, отнесенную к 1 г сожжённого топлива в пересчете на сухое состояние.

3.3 Результаты экспериментальных исследований состава продуктов сгорания при термической утилизации отходов углеобогащения

3.3.1 Влияние параметров приготовления топливных суспензий

3.3.1.1 Гранулометрический состав

Опыты по определению влияния тонины помола на состав отходящих газов проводились для водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения со средним диаметром частиц 35, 47, 92, 154 и 202 мкм при средней температуре в топке 900 ± 20 °С и избытке воздуха 30 % (рисунок 3.14).

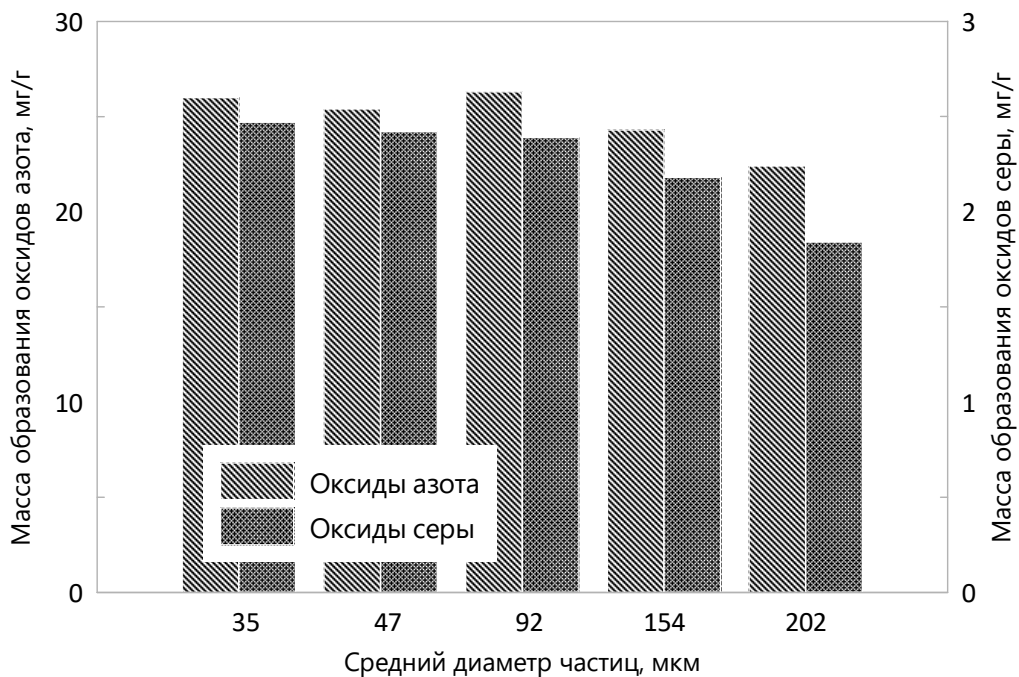


Рисунок 3.14 – Зависимость тонины помола исходного топлива на состав отходящих газов

При попадании в разогретую камеру, температура капель водоугольных суспензий быстро увеличивается, из них выделяются пары воды и летучие компоненты, которые вызывают эффект «микровзрыва», описанный в п.1.5.3 данной работы. В результате этого уменьшается диаметр отдельных капель после впрыска суспензии и увеличивается удельная площадь поверхности распыленного топлива. При использовании в качестве сырья частиц, имеющих крупные размеры (средний диаметр которых составляет 154 и 202 мкм), эффект «микровзрыва» становится менее заметен, а значит для полного сгорания

такого топлива требуется большее время нахождения в камере. При использовании одних и тех же параметров сжигания, увеличение крупности помола привело к повышению степени недожога топлива (от 0,5 % для топлива со средним диаметром частиц 35 мкм; до 11,2 % для топлива, где использовались частицы со средним диаметром 202 мкм).

Именно с увеличением степени недожога топлива связано снижение концентрации загрязняющих веществ в отходящих газах при возрастании среднего диаметра частиц. При выбранных параметрах сжигания, суспензии, в которых использовался средний размер частиц свыше 92 мкм, не выгорают полностью и в органической и минеральной массе сырья остаются соединения серы и азота. Более полное сжигание суспензий увеличивает энергетическую эффективность топлива, снижает опасность получаемых золошлаковых отходов для окружающей природной среды, а также позволяет использовать такие отходы в качестве добавки к асфальтам и бетонам без предварительной подготовки.

Проведенные эксперименты также показали, что уменьшение среднего размера частиц способствует повышению седиментационной стабильности суспензий (п.3.2.2). Исходя из полученных данных можно сделать вывод о целесообразности использования в качестве сырья для получения топливных суспензий, отходов углеобогащения с высокой степенью помола. Это позволит улучшить характеристики хранения, зажигания и сжигания таких суспензий, а также сократить потери минерального сырья при сжигании.

3.3.1.2 Соотношения твердой и жидкой фаз в составе суспензии

Опыты по определению влияния доли твердой фазы на состав отходящих газов проводились для водоугольных суспензий с массовым соотношением отходы углеобогащения / вода равным 50 / 50, 60 / 40 и 70 / 30 при средней температуре в топке 900 ± 20 °С и избытке воздуха 30 %. Результаты представлены в графическом виде на рисунке 3.15.

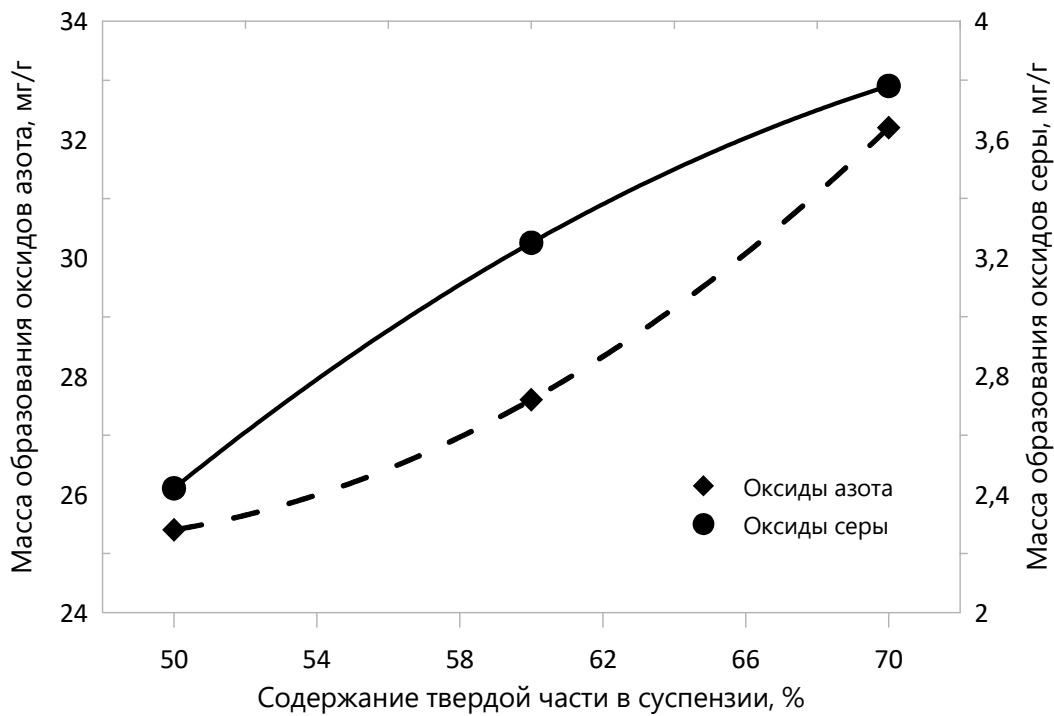


Рисунок 3.15 – Влияние содержания твердой фазы на состав отходящих газов

Как видно из рисунка 3.15, увеличение доли твердого компонента в составе топливных суспензий из отходов обогащения угля с 50 до 70 % приводит к росту удельной массы образования оксидов серы на 56 %, а оксидов азота на 27 %. Это связано со следующими факторами:

- рост содержания дисперсионной среды приводит к снижению температуры горения. Это обусловлено затратами энергии на фазовый переход при парообразовании (п.2.4.1). Меньшие температуры являются причиной снижения концентраций оксидов азота и серы;
- при горении топливных водоугольных суспензий вода под действием высоких температур разлагается на кислород и водород, которые в свою очередь реагируют с продуктами сгорания и снижают количество образующихся загрязняющих веществ (подробнее эти механизмы были рассмотрены в п.1.5.3).

Увеличение содержания воды повышает экономическую эффективность энергоустановок путем снижения коэффициента недожога, улучшает реологические характеристики, определяющие качество распыла и возможность

транспортирования суспензий трубопроводным транспортом, а также приводит к снижению содержания оксидов азота и серы в отходящих газах. При этом сокращение количества горючего компонента в составе топливных суспензий приводит к уменьшению её удельной теплоты сгорания, снижает стабильность горения, а также увеличит время зажигания капель суспензии. Рациональным является содержание твердой части 55 – 60 масс. % [166, 167].

3.3.1.3 Влияние добавок горючего компонента

Исследования по определению влияния добавки отработанного минерального моторного масла к топливным суспензиям на состав отходящих газов проводились при средней температуре в топке 900 ± 20 °С и избытке воздуха 30 %. Массовое соотношение отходы углеобогащения / отработанное масло / вода составляли 60 / 0 / 40, 55 / 5 / 40, 50 / 10 / 40 и 45 / 15 / 40, соответственно.

В качестве добавки к топливным суспензиям использовалось отработанное моторное масло с характеристиками, представленными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные характеристики отработанного масла

Показатель	Единицы измерения	Значение
Удельная теплота сгорания	МДж/кг	45,8
Температура вспышки	°С	194
Температура воспламенения	°С	226
Содержание основных топливных элементов		
Углерод		82,0
Водород	%	14,3
Азот		0,13
Сера		0,49

Отработанное моторное масло обладает высокой удельной теплотой сгорания, 45,8 МДж/кг (таблица 3.1). При его использовании в качестве добавки к топливным суспензиям увеличится общая удельная теплота сгорания, уменьшится время поджига капель суспензии и возрастает стабильность горения фа-

кела. При добавлении к суспензии из отходов углеобогащения 5 % отработанного моторного масла, удельная теплота сгорания возрастет на 13%, при добавлении 10 % на 25 %, при 15 % на 37 %.

В таблице 3.2 представлены концентрации основных групп углеводородов, образующихся при сжигании органоводоугольных суспензий с использованием в качестве добавки отработанного моторного масла.

Таблица 3.2 – Концентрация основных углеводородов в зависимости от содержания отработанного моторного масла в составе суспензии

Группа соединений	Концентрация углеводородов, в зависимости от массового соотношения отходы углеобогащения / отработанное масло / вода, мг/г			
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40	50 / 10 / 40	45 / 15 / 40
Пределные углеводороды	0,42	0,25	0,21	0,19
Непределные углеводороды	0,62	0,79	0,87	0,94
Кислородсодержащие органические соединения	3,88	4,24	4,64	4,97
Полиароматические углеводороды:				
Нафталин	< 0,001	0,001	0,002	0,005
Антрацен	< 0,001	< 0,001	0,001	0,001
Фенантрен	0,002	0,003	0,005	0,008
Пирен	0,003	0,004	0,004	0,005
Бенз(а)пирен	< 0,001	< 0,001	0,002	0,005
Ксилолы	< 0,005	0,01	0,03	0,05
Сумма углеводородов	4,93	5,30	5,77	6,16

Добавление к водоугольным суспензиям отработанного масла приводит к увеличению суммарного количества углеводородов в отходящих газах. Возрастает содержание непредельных, кислородсодержащих и полиароматических углеводородов, а предельных – снижается. Также при добавлении масла, в составе отходящих газов можно зафиксировать ксилолы, которые не были обнаружены при сжигании водоугольного топлива без применения добавок (таблица 3.2).

Рост содержания непредельных углеводородов в составе отходящих газов предположительно связан с увеличением температуры в зоне активного

горения факела, что приводит к неполному пиролизу предельных углеводородов, кроме того наличие в отработанном масле присадок, содержащих такие металлы как Ni, Mo, Cu и т.д. может катализировать реакции межмолекулярного дегидрирования предельных углеводородов при быстром охлаждении сильно нагретой газовой смеси.

Увеличение концентрации кислородсодержащих углеводородов можно объяснить наличием сложных эфиров в составе отработанного масла. Содержание же ПАУ в отходящих газах возрастает из-за роста летучих в составе органоводоугольных суспензий [168].

Для визуализации полученных данных был построен график зависимости удельной массы образования оксидов азота, оксидов серы и суммы углеводородов от добавки в виде отработанного моторного масла к топливным угольным суспензиям, полученным из отходов обогащения угля (рисунок 3.16).

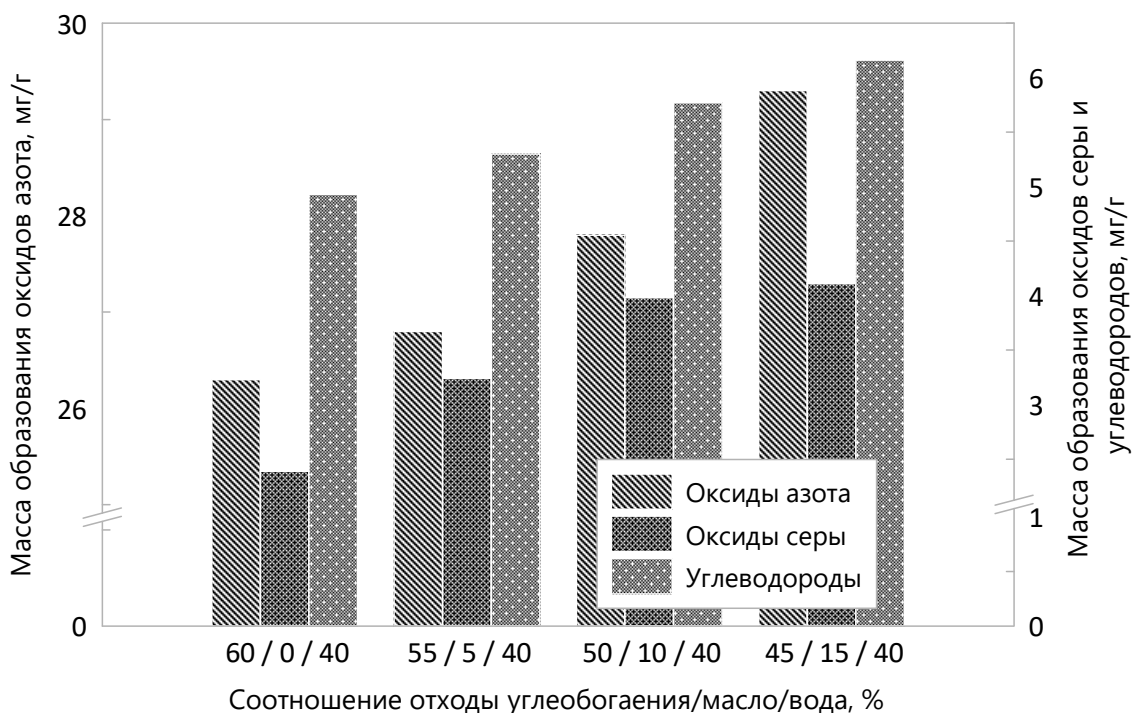


Рисунок 3.16 – Влияние содержания отработанного моторного масла на состав отходящих газов

Содержание серы в отработанном масле составляет 0,49 %. Этот показатель незначительно выше чем для отходов углеобогащения (0,32 %). Содержание азота в составе масла 0,13 % (таблица 3.1), что ниже чем в отходах обогащения угля, где это значение составляет 1,50 % (п.2.3.5).

При увеличении содержания отработанного масла в составе топливных суспензий, при их сжигании происходит увеличение концентрации оксидов азота в отходящих газах из-за повышения температуры в зоне активного горения факела. Также незначительно увеличивается содержание оксидов серы из-за увеличения содержания серы в горючей массе топлива.

При добавлении к суспензиям даже 5 % отработанного моторного масла значительно упростился их поджиг благодаря относительно низкой температуре воспламенения масла, которая составляет 226 °С (таблица 3.1). Для водоугольных суспензий температура поджига составляет от 500 до 850 °С, в зависимости от степени метаморфизма используемого в качестве сырья угля [135]. Также при использовании добавки в виде отработанного масла значительно возрастает седиментационная стабильность суспензии (п.3.2.2).

Поскольку топливные характеристики образующихся на предприятии отходов обогащения угля могут существенно отличаться даже в течении одной смены, то для стабильности горения и получения необходимых параметров, возможно их контролировать путем добавления отработанных минеральных моторных масел (ФККО 40611001313). Также это позволит утилизировать образующиеся на предприятии отходы третьего класса опасности.

3.3.2 Влияние параметров сжигания топливных суспензий

3.3.2.1 Температура сжигания

Опыты по определению влияния температуры сжигания на состав отходящих газов проводились для топливных водоугольных суспензий, при температурах 800 ± 20 °С, 900 ± 20 °С, 1000 ± 20 °С и 1100 ± 20 °С и избытке воздуха 30 %.

В таблице 3.3 представлены концентрации основных групп углеводородов, образующихся при сжигании топливных суспензий, в зависимости от температуры в камере сгорания стенда.

Таблица 3.3 – Концентрация основных углеводородов в зависимости от температуры в камере сгорания

Группа соединений	Концентрация углеводородов, в зависимости от температуры в камере сгорания, мг/г			
	800 °С	900 °С	1000 °С	1100 °С
Предельные углеводороды	0,73	0,42	0,34	0,29
Непредельные углеводороды	1,15	0,62	0,41	0,35
Кислородсодержащие органические соединения	4,73	3,88	2,94	2,32
Полиароматические углеводороды:				
Нафталин	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Антрацен	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Пирен	0,002	0,002	0,002	< 0,001
Бенз(а)антрацен	0,003	0,003	0,002	< 0,002
Бенз(а)пирен	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Сумма углеводородов	6,63	4,93	3,71	2,99

Наличие воды в составе суспензии способствуют более тонкому распылению капель за счет «микровзрывов». По этой причине происходит более полное ее выгорание и снижается количество углеводородов в отходящих газах. Влияние от эффекта «микровзрывов» также можно заметить при сравнении результатов, полученных при слоевом сжигании водоугольных суспензий (таблица 2.11) и при сжигании суспензии в факеле (таблица 3.3). Удельная масса образования углеводородов при распылении суспензии при помощи форсунки снизилась. Несмотря на это, закон по которому происходит уменьшение количества углеводородов с ростом температуры, сохраняется. Остается постоянным и процентное соотношение предельных, непредельных, кислородсодержащих и полиароматических органических соединений.

Для визуализации полученных данных был построен график зависимости удельной массы образования оксидов азота, оксидов серы и суммы углеводородов при изменении температуры сжигания топливных водоугольных суспензий, полученных из отходов обогащения угля (рисунок 3.17).

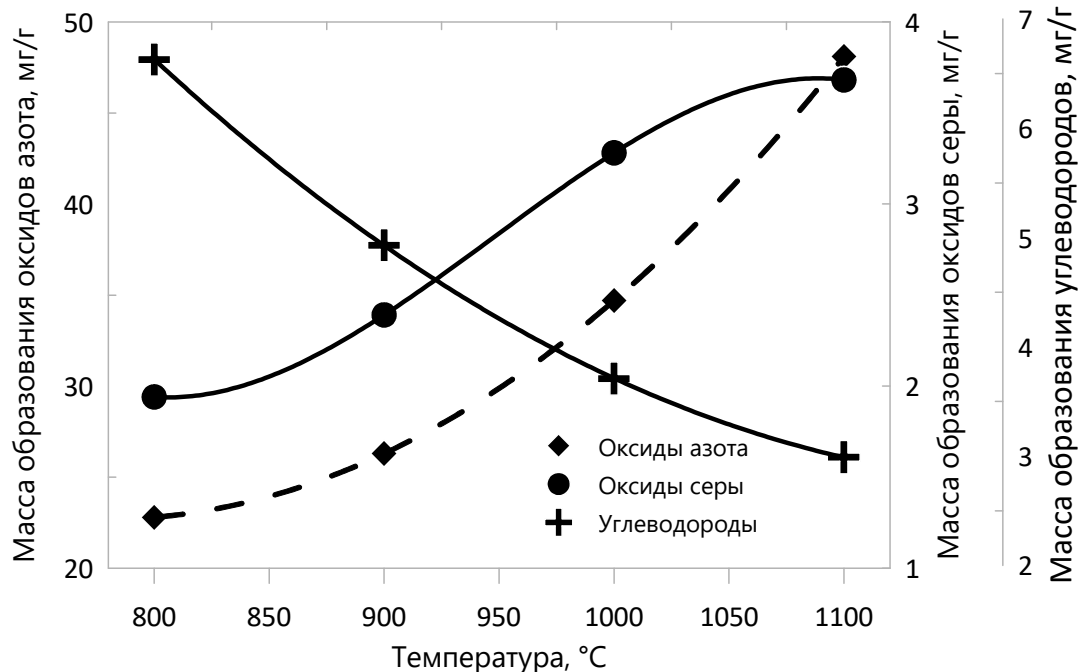


Рисунок 3.17 – Влияние температуры в камере сгорания на состав отходящих газов

Как видно из рисунка 3.17, с ростом температуры в камере сгорания концентрации оксидов серы возрастают. При высоких температурах скорость протекания реакции окисления увеличивается, происходит интенсификация процесса взаимодействия серы топлива с кислородом дутья.

Оксиды азота при горении топлив образуются из азотосодержащих компонентов топлива и из молекулярного азота воздуха (подробнее механизмы образования оксидов азота при горении топлив рассмотрены в п.2.4.2). В ходе экспериментов было установлено, что определяющее влияние на содержание оксидов азота в отходящих газах оказывает высокотемпературный эффект в зоне горения. Образование термических оксидов азота происходит по меха-

низму Зельдовича, при котором происходит окисления азота дутья в зоне активного горения факела. Так как энергия активации этих реакций высока, то содержание оксидов азота в отходящих газах сильно зависит от температуры.

При сравнении результатов, полученных при сжигании водоугольных суспензий слоевым способом (рисунок 2.27) и при сжигании в факеле (рисунок 3.17), можно сделать вывод что количество образующихся оксидов азота и серы незначительно зависит от способа сжигания, в то же время при сжигании топливных суспензий факельным способом, произошло снижение выбросов по всем основным группам углеводородов, что связано с более полным их сгоранием благодаря эффекту «микровзрывов».

3.3.2.2 Коэффициент избытка воздуха

Опыты по определению влияния избытка воздуха при сжигании топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля на состав отходящих газов, проводились при средней температуре в топке 900 ± 20 °С и коэффициентах избытка воздуха 10, 20, 30 и 40 %. В таблице 3.4 представлены концентрации основных групп углеводородов, образующихся при сжигании топлива в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Таблица 3.4 – Концентрация основных углеводородов в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Группа соединений	Концентрация углеводородов, в зависимости от избытка воздуха, %			
	10	20	30	40
Предельные углеводороды	1,12	0,64	0,42	0,32
Непредельные углеводороды	2,32	1,14	0,62	0,46
Кислородсодержащие органические соединения	4,62	4,21	3,88	3,32

Продолжение таблицы 3.4

Группа соединений	Концентрация углеводородов, в зависимости от избытка воздуха, %			
	10	20	30	40
Полиароматические углеводороды:				
Нафталин	0,011	0,003	< 0,001	< 0,001
Антрацен	0,029	0,009	< 0,001	< 0,001
Пирен	0,023	0,007	0,002	< 0,001
Бенз(а)антрацен	0,005	0,004	0,003	< 0,002
Бенз(а)пирен	0,006	0,003	< 0,001	< 0,001
Сумма углеводородов	8,20	6,14	4,93	4,17

Увеличение избытка воздуха, рассчитанное по стехиометрическому уравнению горения топливной суспензии, с 1,1 до 1,4 приводит к снижению удельной массы образования углеводородов практически в 2 раза. При этом также снижается количество канцерогенных ПАУ, таких как антрацен, пирен, бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен и нафталин [169].

Для визуализации полученных данных был построен график зависимости удельной массы образования оксидов азота, оксидов серы и суммы углеводородов от коэффициента избытка воздуха при сжигании топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля (рисунок 3.18).

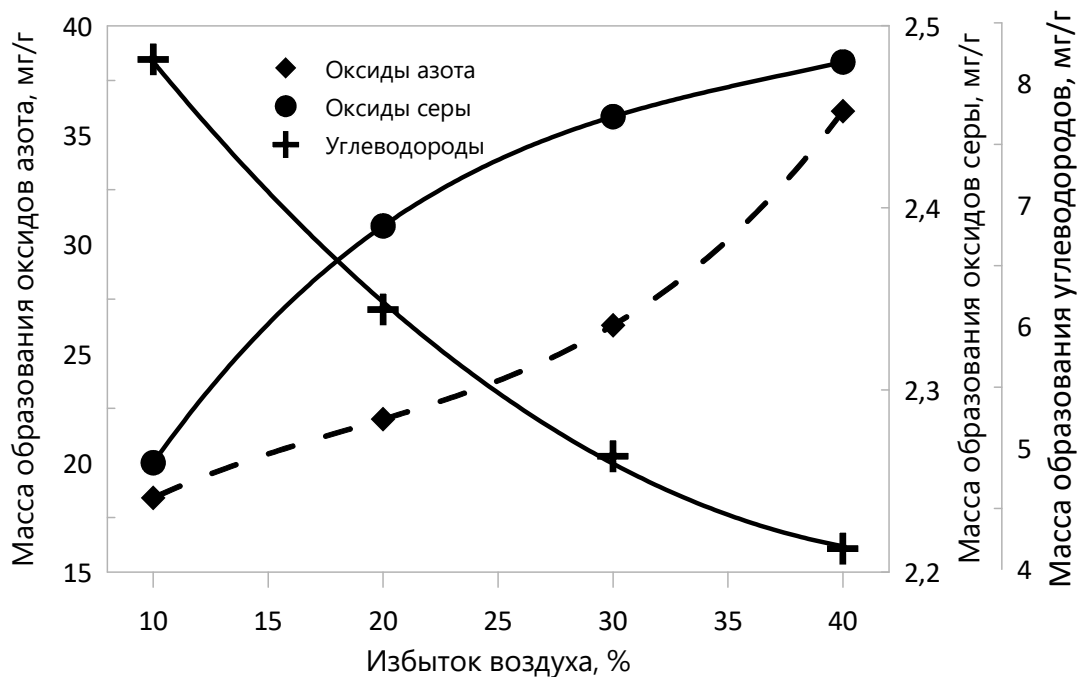


Рисунок 3.18 – Влияние избытка воздуха на состав отходящих газов

На рисунке 3.18 можно видеть значительное снижение удельной массы образования углеводородов, однако вместе с этим увеличивается количество оксидов азота. Удельная масса образования оксидов серы в меньшей степени зависит от коэффициента избытка воздуха.

При сокращении в камере сгорания доли кислорода и азота путем изменения расхода дутья, снижаются и объемы образующихся термических оксидов азота. При этом недостаточный избыток воздуха в зоне горения приводит к увеличению выбросов углеводородов и твердых частиц. Также регулирование образования оксидов азота путем изменения коэффициента избытка воздуха может привести к высокотемпературной сульфидной коррозии и увеличить зашлакованность стенок топки котельного агрегата. Несмотря на это, сжигание топлив с недостатком воздуха является одним из самых распространенных способов регулирования выбросов оксидов азота [170, 171].

Наименьшее количество загрязняющих веществ в отходящих газах при сжигании топливных суспензий из отходов углеобогащения наблюдаются при коэффициенте избытка воздуха 20 – 30 %.

3.3.2.3 Размер капель суспензии

Опыты по определению влияния степени распыла суспензии на состав отходящих газов проводились для водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения со средним диаметром капель 65, 94, 128, 184 и 253 мкм, при средней температуре в топке 900 ± 20 °С и избытке воздуха 30 % (рисунок 3.19).

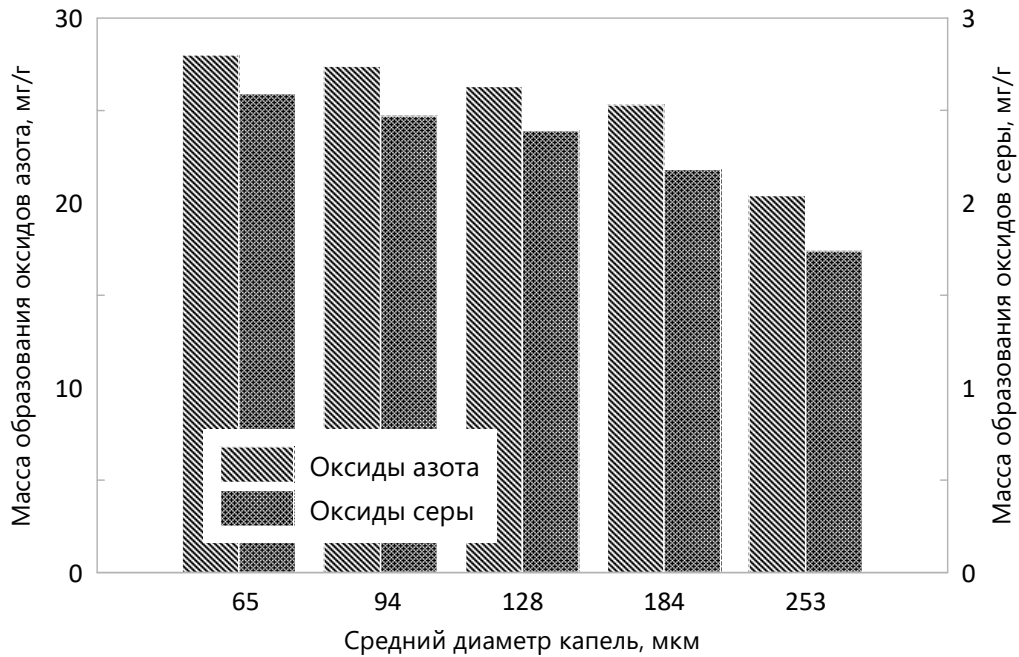


Рисунок 3.19 – Влияние степени распыла суспензии на состав отходящих газов

Увеличение среднего размера капель при распыле суспензии приводит к снижению удельной массы образования оксидов азота и серы. Это связано с тем, что с увеличением диаметра капли, требуется большее время на ее разогрев и воспламенение. Наиболее крупные капли при сжигании суспензий не успевают полностью прогорать, в результате чего увеличивался коэффициент недожога топлива. Именно с ним связано снижение выбросов оксидов азота и серы при увеличении диаметра капель суспензии.

Капли со средним диаметром 65 мкм сгорали более интенсивно, в результате чего температура в камере сгорания увеличивалась и по этой причине происходило незначительное увеличение концентрации оксидов азота и серы в составе отходящих газов.

Можно считать оптимальным распыление водоугольных суспензий до капель со средним размером 94 – 128 мкм, поскольку это требует меньших энергозатрат на распыл, в сравнении с суспензией, распыляемой до капель со средним диаметром 65 мкм. Коэффициент недожога при этом для распыла со средним диаметром капель 65, 94 и 128 мкм составил 0,5 – 0,9 %.

3.3.3 Сравнение количества выбросов загрязняющих веществ при водоугольном, органоводоугольном и пылеугольном сжигании отходов обогащения угля

Эксперименты, по определению состава отходящих газов проводились при сжигании отходов углеобогащения в виде водоугольных, органоводоугольных суспензий, а также в пылеугольном виде, при наиболее благоприятных условиях, установленных выше. Выбранные параметры сжигания представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры сжигания отходов углеобогащения

Характеристика	Единицы измерения	Параметры сжигания отходов		
		Водоугольные суспензии	Органоводоугольные суспензии	Пылеугольное сжигание
Средний диаметр частиц	мкм	47		
Соотношение отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	%	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40	100 / 0 / 0
Средняя температура в камере сгорания	°С	900 ± 20		
Избыток воздуха	%	30		
Средний диаметр капель суспензии	мкм	128	128	–

При параметрах, представленных в таблице 3.5 достигаются наилучшие с экологической точки зрения параметры сжигания топливных суспензий, а именно при таких параметрах в отходящих газах наблюдается наименьшие концентрации оксидов азота, оксидов серы и углеводородов.

На рисунке 3.20 представлены хроматограммы, полученные при сжигании отходов углеобогащения в соответствии с параметрами, выбранными в таблице 3.5.

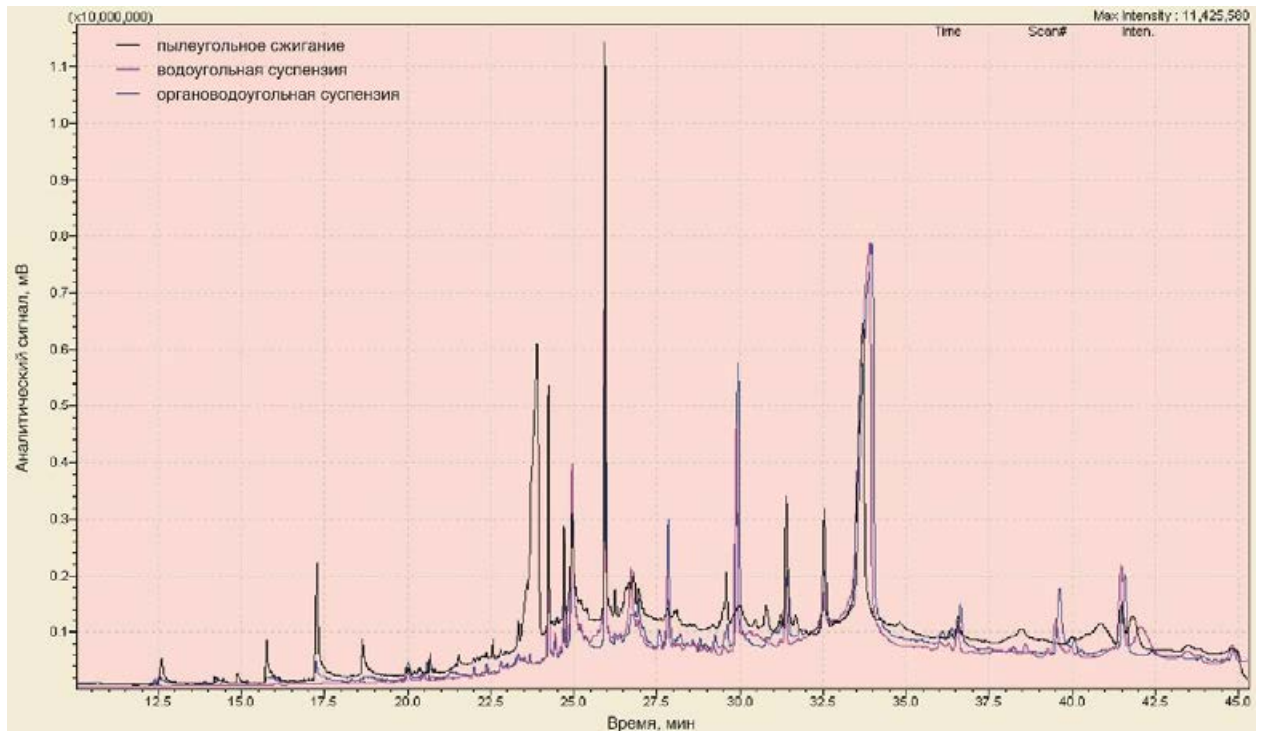


Рисунок 3.20 – Хроматограммы, полученные при анализе состава отходящих газов

Из рисунка 3.20 видно, что наибольшее количество углеводородов образуется при пылеугольном сжигании отходов углеобогащения. При сжигании водоугольных и органоводоугольных суспензий количество зарегистрированных соединений и их масса примерно равна, однако при сжигании суспензий с добавлением отработанного моторного масла были зарегистрированы ксилолы, которые не были обнаружены при пылеугольном сжигании и при использовании в качестве топлива водоугольных суспензий без применения добавок.

В таблице 3.6 приведены удельные массы основные группы углеводородов в зависимости от способа сжигания отходов углеобогащения.

Таблица 3.6 – Концентрация основных углеводородов в зависимости от способа сжигания отходов углеобогащения

Группа соединений	Параметры сжигания		
	Водоугольные суспензии	Органоводоугольные суспензии	Пылеугольное сжигание
Предельные углеводороды	0,42	0,25	0,80
Непредельные углеводороды	0,62	0,79	1,40
Кислородсодержащие органические соединения	3,88	4,24	4,82
Полиароматические углеводороды:			
Нафталин	< 0,001	0,001	0,003
Антрацен	< 0,001	< 0,001	0,036
Фенантрен	0,002	0,003	0,013
Пирен	0,003	0,004	0,020
Бенз(а)пирен	< 0,001	< 0,001	0,003
Ксилолы	< 0,005	0,01	< 0,005
Сумма углеводородов	4,93	5,30	7,19

В отличие от пылеугольного сжигания, горение водоугольных суспензий характеризуется удлинённым факелом сжигания на 20 – 40 %. В результате этого время нахождения частиц топлива и выделяющихся углеводородов в зоне активного горения увеличивается, что позволяет более полно окислять выделяющиеся при нагревании углеводороды и уменьшить коэффициент недожога (п. 3.1.2). Также низкое содержание углеводородов в отходящих газах объясняется введением паров воды в зону горения, что позволяет снизить концентрацию углеводородов, поскольку при высоких температурах вода разлагается на кислород и водород (п. 1.5.3). Выделяющийся кислород при этом интенсифицирует процессы окисления углеводородов.

На рисунке 3.21 представлены удельные массы образования оксидов азота, оксидов серы и углеводородов в зависимости от способа сжигания отходов обогащения угля.

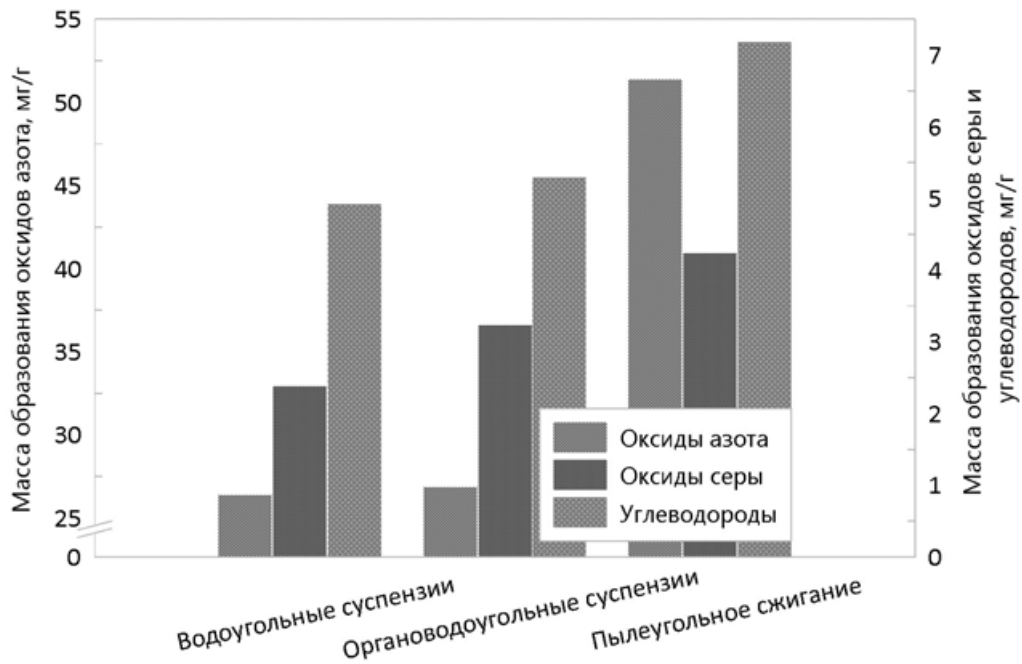


Рисунок 3.21 – Влияние способа сжигания на состав отходящих газов

Как видно из рисунка 3.21, при сжигании водоугольных и органоводоугольных суспензий состав отходящих газов изменяется незначительно. В ходе экспериментов было зафиксировано увеличение удельной массы образования оксидов азота на 6,1 %, оксидов серы – на 11,3 %, суммы углеводородов – на 7,5 %. При пылеугольном способе сжигания удельная масса образования загрязняющих веществ сильно возросла. Больше всего в сравнении со сжиганием водоугольного топлива увеличились концентрации оксидов азота, на 95,4 %, содержание оксидов серы изменилось на 77,8 %, суммы углеводородов – на 45,8 %.

Значительное увеличение концентрации оксидов азота и серы при пылеугольном сжигании связано с высокой температурой в зоне активного горения, где она достигала 1390 ± 20 °С, при поддержании средней температуры в камере сгорания 900 ± 20 °С. При сжигании водоугольной и органоводоугольной суспензии температура в факеле сгорания составила 950 ± 20 °С и 980 ± 20 °С соответственно.

Также снижение концентрации загрязняющих веществ произошло из-за присутствия паров воды в камере сгорания, которые вступали в химические реакции с оксидами азота и серы, описанные в п. 1.5.3.

Проведенные эксперименты позволили установить зависимость образования оксидов серы, оксидов азота, предельных и непредельных углеводородов, кислородсодержащих органических соединений, а также основных полиароматических углеводородов, образующихся при сжигании угля в зависимости от параметров приготовления и характеристик сжигания топливных водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения.

Полученные результаты позволяют выбрать наилучшие экологические и энергетические параметры сжигания топливных суспензий из отходов обогащения угля, к которым относится: степень помола от 30 до 100 мкм, содержание твердой части в суспензии от 55 до 60 %, возможность добавления к суспензиям 5 % отработанного масла для получения лучших энергетических характеристик, без значительного увеличения концентрации загрязняющих веществ в составе отходящих газов, температура сжигания в пределах от 900 до 1150 °С, размер капель при распыле суспензии от 50 до 150 мкм.

Сравнение пылеугольного водоугольного способов сжигания отходов показало, что способ сжигания значительно влияет на состав отходящих газов. В сравнении с пылеугольным сжиганием, при сжигании отходов в виде суспензий удалось добиться снижения оксидов азота - до 48,8 %, оксидов серы – до 43,7 % и суммы углеводородов – до 31,4%.

Выводы по третьей главе

1. Выявлены основные параметры приготовления и сжигания топливных суспензий из отходов углеобогащения, оказывающие влияние на процессы образования оксидов азота и серы, а также основных групп углеводородов в составе отходящих газов. К ним относятся: температура в камере сгорания, коэффициент избытка воздуха, содержание твердого компонента в составе топлива, добавки горючего компонента к водоугольным суспензиям и содержание серы и азота в исходном сырье.
2. С ростом добавки в виде отработанного минерального моторного масла к топливным суспензиям, увеличиваются концентрации оксидов серы, оксидов азота и углеводородов в составе отходящих газов. Однако добавление 5 % отработанного масла позволяет увеличить седиментационную стабильность суспензии, упростить поджиг и повысить её удельную теплоту сгорания. При этом удельная масса образования основных загрязняющих веществ возрастёт незначительно: оксидов азота на 6,1 %, оксидов серы – на 11,3 % и суммы углеводородов – на 7,5 % в сравнении со сжиганием суспензий без добавления жидких горючих компонентов.
3. Установлено, что выбранные диапазоны параметров термической утилизации топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля в сравнении с пылеугольным сжиганием, позволяют значительно сократить количество загрязняющих веществ в составе отходящих газов: оксидов азота – до 48,8 %, оксидов серы – до 43,7 % и суммы углеводородов – до 31,4%.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

4.1 Тепловой расчет котельного агрегата при изменении типа сжигаемого топлива

На основной площадке предприятия АО «Междуречье» в корпусе котельной установлены три паровых котла ДКВр-10-13 номинальной паропроизводительностью 10 т/час, два из которых являются рабочими и один резервным. В летний период в работе находится один котельный агрегат.

Для термической утилизации отходов углеобогащения предприятия было решено установить возможность перевода одного из котельных агрегатов на сжигание топливных водоугольных суспензий. Смена типа топлива на котельной может привести к снижению паропроизводительности, температуры перегретого пара, КПД и других параметров работы котельного агрегата. Для оценки возможности перевода котла на сжигание суспензионного топлива, полученного из отходов обогащения угля, необходимо провести его тепловой расчет.

4.1.1 Описание котла типа ДКВр-10-13

Котельные агрегаты типа ДКВр применяются при работе на жидких, газообразных и твердых видах топлива. Конструктивная схема работы котлов типа ДКВр паропроизводительностью 2,5, 4, 6,5 и 10 т/ч одинакова, независимо от типа используемого топлива (рисунок 4.1).

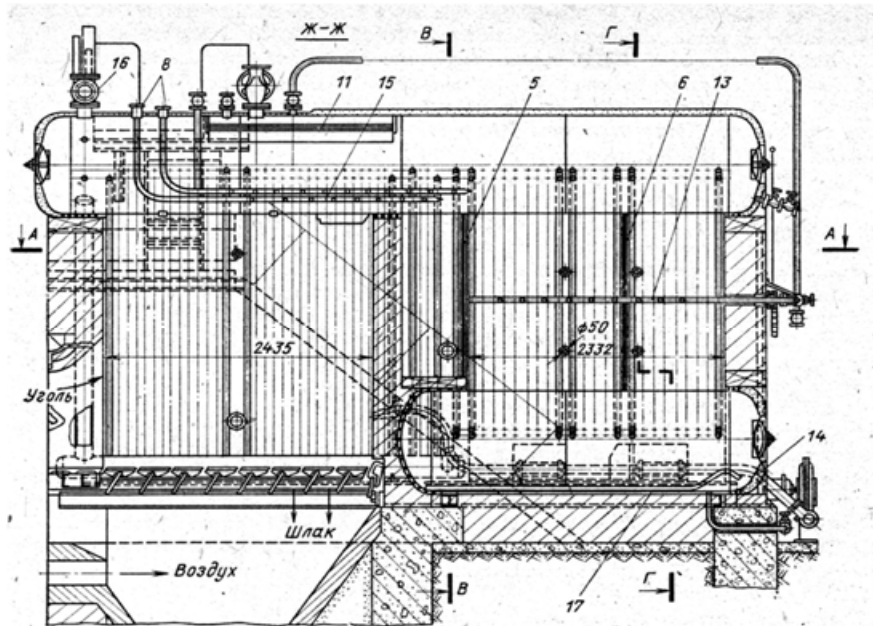


Рисунок 4.1 – Конструктивная схема котла ДКВр-10-13

(1 – топочная камера, 2 – кипяtilьный пучок, 3 – кирпичная стенка, 4 – камера догорания, 5 – шамотная перегородка, 6 – чугунная перегородка, 7 – кипяtilьные трубы, 8 – линии поступления питательной воды, 9 – котельный пучок, 10 – опускные трубы, 11 – сепаратор влаги, 12 – опорная рама, 13 – паровые обдувочные аппараты, 14 – устройство для возврата из газоходов на горячий слой недогоревшего угля, 15 – питательные трубы, 16 – предохранительный клапан, 17 – труба для периодической продувки котла)

Перед котельным пучком располагается топочная камера, которая делится перегородкой из шамотного кирпича на две части, топку и камеру догорания, для снижения тепловых потерь, связанных с уносом и химическим недожогом топлива. Между первым и вторым рядами труб котельного пучка также установлена перегородка из шамотного кирпича, отделяющая кипяtilьный пучок от камеры догорания. Таким образом, первый ряд труб котельного пучка является задним экраном камеры догорания. Чугунная перегородка разделяет котельный пучок на два газохода. Выход разогретых газов из камеры догорания и из котла асимметричен. При установленном пароперегревателе часть кипяtilьных труб не устанавливается, а сам пароперегреватель размещается в первом газоходе, после второго и третьего ряда кипяtilьных труб.

Питание боковых экранов водой осуществляется из нижних коллекторов, куда вода поступает по соединительным трубам из нижнего барабана и одновременно по опускным трубам из верхнего. Такая схема подвода воды в коллекторы способствует уменьшению отложений шламов в верхнем барабане и увеличивает надежность работы котельного агрегата при пониженном уровне воды [172].

4.1.2 Состав и теплота сгорания водоугольного топлива

В настоящее время топливом на котельной предприятия АО «Междуречье» служит добываемый на разрезе уголь со следующими характеристиками: влажность – 12,5 %, зольность – 18,0 %, сернистость – 0,27 % удельная теплота сгорания – 26,38 МДж/кг. Расход угля в 2017 году составил 6956 тонн.

Расчет низшей удельной теплоты сгорания топливных суспензий производился расчетным способом, исходя из теплоты сгорания исходного сырья, по формуле, представленной в работе [173]:

$$Q_{i\text{ ВУС}}^r = Q_{i\text{ отх}}^r \cdot a - R \cdot (1 - a) \quad (4.1)$$

Где: $Q_{i\text{ отх}}^r$ – низшая удельная теплота сгорания отходов обогащения угля, МДж/кг;

a – массовая доля отходов обогащения угля в топливной суспензии;

R – удельная теплота парообразования воды (2,26 МДж/кг).

Для органоводоугольного топлива, с добавкой отработанного минерального моторного масла использовалась следующая формула:

$$Q_{i\text{ ВУС}}^r = Q_{i\text{ отх}}^r \cdot a + Q_{i\text{ м}}^r \cdot b - R \cdot (1 - (a + b)) \quad (4.2)$$

Где: $Q_{i\text{ отх}}^r$ – низшая удельная теплота сгорания отходов углеобогащения, МДж/кг;

a – массовая доля отходов углеобогащения в составе топливной суспензии;

$Q_{i\text{м}}^r$ – низшая удельная теплота сгорания отработанного моторного масла, МДж/кг;

b – массовая доля отработанного моторного масла в составе топливной суспензии;

R – удельная теплота парообразования воды (2,26 МДж/кг).

На основании представленных выше формул были рассчитаны значения удельной теплоты сгорания в зависимости от величины добавки отработанного моторного масла (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Значения основных характеристик топливных суспензий

Параметр	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг	9,6	11,0
Состав топлива, %		
Углерод	33,73	35,02
Водород	2,13	2,67
Сера	0,19	0,20
Кислород	4,27	4,05
Азот	0,88	0,81
Зольность	17,33	15,91
Влажность	41,46	41,35

4.1.3 Расчет объемов и энтальпий воздуха и продуктов сгорания

4.1.3.1 Определение коэффициентов избытка воздуха и присосов по отдельным газоходам

Избыток воздуха увеличивается при движении продуктов сгорания по газоходам котельного агрегата. Это обусловлено тем, что давление в газоходах ниже давления окружающего воздуха и через неплотности в обмуровке происходят присосы в газовый тракт котельного агрегата атмосферного воздуха. При тепловом расчёте присосы воздуха принимались по нормативным данным, представленным в таблице 4.2 [172].

Таблица 4.2 – Присосы атмосферного воздуха в газовый тракт котельного агрегата

Топочные камеры и газоходы	Присос воздуха
Топочные камеры слоевых механических топков	0,1
Первый котельный пучок	0,05
Второй котельный пучок	0,1
Чугунный водяной экономайзер	0,1

Коэффициент избытка воздуха за каждой поверхностью нагрева после топочной камеры рассчитывался по формуле:

$$\alpha_i = \alpha_T + \sum_1^i \Delta\alpha_i,$$

Где: i – номер поверхности нагрева после топки по ходу движения продуктов сгорания;

α_T – коэффициент избытка воздуха на выходе из топки (в соответствии с данными полученными в п. 3.3.2.2, $\alpha_T = 1,3$).

Коэффициенты избытка воздуха за каждой поверхностью нагрева после топочной камеры приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты избытка воздуха (α_i)

Коэффициент избытка воздуха за топкой	$\alpha_1 = 1,4$
Коэффициент избытка воздуха за первым котельным пучком	$\alpha_{1к} = 1,4 + 0,05 = 1,45$
Коэффициент избытка воздуха за вторым котельным пучком	$\alpha_{2к} = 1,45 + 0,1 = 1,55$
Коэффициент избытка воздуха за экономайзером	$\alpha_э = 1,55 + 0,1 = 1,65$

4.1.3.2 Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$), рассчитывался по формуле, представленной ниже:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p$$

Где: C^p , S^p , H^p , O^p , – концентрации углерода, серы, водорода и кислорода соответственно, на рабочую массу топлива, % (таблица 4.1);

Теоретические объемы продуктов сгорания ($\text{м}^3/\text{кг}$), определялись по формулам:

Теоретический объем азота в продуктах сгорания:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V^0 + 0,8 \cdot \frac{N^p}{100}; \quad (4.3)$$

Теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания:

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^p + 0,375 \cdot S^p); \quad (4.4)$$

Теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0 \quad (4.5)$$

Где: C^p , S^p , H^p , N^p , – концентрации углерода, серы, водорода и азота соответственно, на рабочую массу топлива, % (таблица 4.1);

W^p – влажность на рабочую массу топлива, % (таблица 4.1);

V^0 – теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Полученные результаты расчетов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$

Параметр	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
V^0	3,43	3,69
V_{N_2}	2,71	2,92
V_{RO_2}	0,63	0,66
$V_{H_2O}^0$	0,81	0,87

Средний коэффициент избытка воздуха в газоходе для каждой поверхности нагрева определялся по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}, \quad (4.6)$$

Где: α' – коэффициент избытка воздуха перед газоходом;

α'' – коэффициент избытка воздуха за газоходом.

Для топки:

$$\alpha_{\text{ср1}} = \frac{\alpha'_1 + \alpha_T}{2} = \frac{1,3 + 1,4}{2} = 1,35; \quad (4.7)$$

Где: $\alpha'_1 = \alpha_T - 0,1 = 1,4 - 0,1 = 1,3$ - коэффициент избытка воздуха перед топкой.

Для первого конвективного пучка:

$$\alpha_{ср2} = \frac{\alpha_T + \alpha_{1к}}{2} = \frac{1,4 + 1,45}{2} = 1,43; \quad (4.8)$$

Для второго конвективного пучка:

$$\alpha_{ср3} = \frac{\alpha_{1к} + \alpha_{2к}}{2} = \frac{1,45 + 1,55}{2} = 1,50; \quad (4.9)$$

Для экономайзера:

$$\alpha_{ср4} = \frac{\alpha_{2к} + \alpha_{э}}{2} = \frac{1,55 + 1,65}{2} = 1,60. \quad (4.10)$$

Избыточное количество воздуха для каждого из газоходов ($\text{м}^3/\text{кг}$), определялось по следующей формуле:

$$V_{изб}^B = V^0 \cdot (\alpha_{ср} - 1), \quad (4.11)$$

Полученные результаты расчетов избыточного количества воздуха для каждого газохода представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Избыточное количество воздуха для каждого из газоходов ($V_{изб}^B$), $\text{м}^3/\text{кг}$

Параметр	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
Топка	1,20	1,29
1 – ый конвективный пучок	1,47	1,59
2 – ой конвективный пучок	1,71	1,85
Экономайзер	2,06	2,21

Действительный объем водяных паров ($\text{м}^3/\text{кг}$), рассчитывался по формуле:

$$V_{H_2O}^D = V_{H_2O}^0 + 0,016 \cdot (\alpha_{ср} - 1) \cdot V^0 \quad (4.12)$$

Где: $V_{H_2O}^0$ – теоретический объем образующихся при полном сгорании топлива паров воды, $\text{м}^3/\text{кг}$ (таблица 4.4);

$\alpha_{ср}$ – средний коэффициент избытка воздуха для поверхности нагрева (таблица 4.5).

Полученные результаты расчетов действительного объема водяных паров для каждого газохода представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Действительный объем водяных паров ($V^D_{H_2O}$), м³/кг

Параметр	ВУС с массовым соотношением отходы угле- обогащения / отработанное масло / вода	
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
Топка	0,825	0,889
1 – ый конвективный пучок	0,829	0,894
2 – ой конвективный пучок	0,833	0,898
Экономайзер	0,839	0,904

Действительный суммарный объем продуктов сгорания (м³/кг) рассчитывался по следующей формуле:

$$V_{\Sigma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{изб}^B + V_{H_2O}^D \quad (4.13)$$

Где: V_{RO_2} – теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания, м³/кг (таблица 4.4);

V_{N_2} – теоретический объем азота в продуктах сгорания, м³/кг (таблица 4.4);

$V_{изб}^B$ – избыточное количество воздуха для каждого газохода, м³/кг (таблица 4.5);

$V_{H_2O}^D$ – действительный объем водяных паров в продуктах сгорания, м³/кг (таблица 4.6).

Результаты расчетов для каждого газохода действительного суммарного объема продуктов сгорания представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Действительный суммарный объем продуктов сгорания (V_{Σ}), м³/кг

Параметр	ВУС с массовым соотношением отходы угле- обогащения / отработанное масло / вода	
	60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
Топка	5,372	5,759
Первый конвективный пучок	5,650	6,059
Второй конвективный пучок	5,894	6,322
Экономайзер	6,242	6,697

Объемные доли трехатомных газов и водяных паров, а также их суммарные объемные доли рассчитывались по формулам:

$$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{\Sigma}; \quad (4.14)$$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O}^d / V_{\Sigma}; \quad (4.15)$$

$$r_{\Pi} = r_{RO_2} + r_{H_2O}. \quad (4.16)$$

Где: V_{RO_2} – теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания, м³/кг (таблица 4.4);

V_{Σ} – действительный суммарный объем продуктов сгорания, м³/кг (таблица 4.7);

$V_{H_2O}^d$ – действительный объем водяных паров в продуктах сгорания, м³/кг (таблица 4.6).

Результаты расчетов объемных долей трехатомных газов и водяных паров, а также их суммарные объемные доли представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Объемные доли трехатомных газов (r_{RO_2}) и водяных паров (r_{H_2O}), а также их суммарные объемные доли (r_{Π})

Параметр	Компонент	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
		60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
Топка	r_{RO_2}	0,118	0,114
	r_{H_2O}	0,154	0,154
	r_{Π}	0,272	0,268
Первый конвективный пучок	r_{RO_2}	0,112	0,108
	r_{H_2O}	0,147	0,147
	r_{Π}	0,259	0,255
Второй конвективный пучок	r_{RO_2}	0,107	0,104
	r_{H_2O}	0,141	0,142
	r_{Π}	0,248	0,246
Экономайзер	r_{RO_2}	0,101	0,098
	r_{H_2O}	0,134	0,135
	r_{Π}	0,235	0,233

Результаты расчетов объемов воздуха и продуктов сгорания для угольных суспензий с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода равным 60 / 0 / 40 и 55 / 5 / 40, представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Объемы воздуха и продуктов сгорания

Величина	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода							
	60 / 0 / 40				55 / 5 / 40			
	Топка	Первый пучок	Второй пучок	Экономайзер	Топка	Первый пучок	Второй пучок	Экономайзер
Коэффициент избытка воздуха после поверхности нагрева (α_i)	1,40	1,45	1,55	1,65	1,40	1,45	1,55	1,65
Средний коэффициент избытка воздуха в газоходе ($\alpha_{ср.i}$)	1,35	1,43	1,50	1,60	1,35	1,43	1,50	1,60
Избыточное количество воздуха ($V^{изб}$), м ³ /кг	1,20	1,47	1,71	2,06	1,29	1,59	1,85	2,21
Действительный объем водяных паров ($V^{д_{H_2O}}$), м ³ /кг	0,825	0,829	0,833	0,839	0,889	0,894	0,898	0,904
Суммарный объем продуктов сгорания (V_{Σ}), м ³ /кг	5,372	5,650	5,894	6,242	5,759	6,059	6,322	6,697
Объемная доля трехатомных газов (r_{RO_2})	0,118	0,112	0,107	0,101	0,114	0,108	0,104	0,098
Объемная доля водяных паров (r_{H_2O})	0,154	0,147	0,141	0,134	0,154	0,147	0,142	0,135
Суммарная объемная доля (r_{Π})	0,272	0,259	0,248	0,235	0,268	0,255	0,246	0,233

4.1.3.3 Расчет энтальпии воздуха и продуктов сгорания

Энтальпия теоретического объема воздуха для выбранного диапазона температур (кДж/кг) рассчитывалась по формуле:

$$I_a^0 = V^0 \cdot (c_{\mathcal{G}})_a \quad (4.17)$$

Где: $(c\vartheta)_e$ – энтальпия 1 м³ воздуха, кДж/м³ (принимается для выбранной температуры по таблице «энтальпия 1 м³ воздуха, газообразных продуктов сгорания (кДж/м³) и 1 кг золы (кДж/кг)», представленной в [174]);

V^0 – теоретический объем воздуха, рассчитанный для полного сгорания топлива, м³/кг (таблица 4.4).

Энтальпия теоретического объема продуктов сгорания для выбранного диапазона температур (кДж/кг) определялась по формуле:

$$I_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2} \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^D \cdot (c\vartheta)_{H_2O} \quad (4.18)$$

Где: $(c\vartheta)_{RO_2}$, $(c\vartheta)_{N_2}$, $(c\vartheta)_{H_2O}$ – энтальпии 1 м³ трехатомных газов, теоретических объемов водяных паров и азота принимаются по таблице «энтальпия 1 м³ воздуха, газообразных продуктов сгорания (кДж/м³) и 1 кг золы (кДж/кг)» [174];

V_{RO_2} , V_{N_2} – теоретический объем трехатомных газов и азота в продуктах сгорания соответственно, м³/кг (таблица 4.4);

$V_{H_2O}^D$ – действительный объем водяных паров, м³/кг (таблица 4.6).

Энтальпия избыточного количества воздуха для выбранного диапазона температур (кДж/кг) рассчитывалась по формуле:

$$I_{из\bar{a}}^0 = (\alpha - 1) \cdot I_e^0 \quad (4.19)$$

Энтальпия золы:

$$I_{зл} = A^p \cdot a_{ун} \cdot (c\vartheta)_{зл} / 100 \quad (4.20)$$

Энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха $\alpha > 1$ (кДж/кг) определялась по формуле:

$$I = I_{\Gamma}^0 + I_{из\bar{a}}^e + I_{зл}, \text{ кДж/кг} \quad (4.21)$$

Где A^p – зольность топлива на рабочую массу, % (таблица 4.1);

$a_{ун} = 16\%$ – величина уноса золы с газами [175];

$(c\vartheta)_{зл}$ – энтальпия золы, кДж/кг [174].

Результаты расчета энтальпии продуктов сгорания по каждому из газоходов для водоугольных суспензий с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода равным 60 / 0 / 40 и 55 / 5 / 40 сведены в таблицу 4.10 и 4.11 соответственно.

Таблица 4.10 – Энтальпии продуктов сгорания по газоходам при сжигании топливных водоугольных суспензий с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода равным 60 / 0 / 40

Поверхность нагрева	Температура после поверхности нагрева, °С	I_e^0	I_z^0	$I_{изб.}^e$	$I_{эл}$	I
Верх топочной камеры $\alpha_T = 1,4$	1500	7701,8	10363,4	2695,6	4892,0	17951,0
	1400	7139,7	9596,0	2498,9	4401,1	16496,0
	1300	6577,6	8821,7	2302,1	3785,5	14909,3
	1200	6032,6	8064,1	2111,4	3352,8	13528,3
	1100	5484,2	7323,1	1919,5	3050,6	12293,1
	1000	4935,7	6585,9	1727,5	2737,2	11050,5
	900	4404,5	5854,6	1541,6	2434,9	9831,1
	800	3886,9	5135,6	1360,4	2132,6	8628,7
Первый конвективный пучок $\alpha_{K_1} = 1,45$	700	3365,9	4430,6	1178,1	1841,4	7450,1
	900	4404,5	5854,6	1893,9	2434,9	10183,5
	800	3886,9	5135,6	1671,4	2132,6	8939,6
	700	3365,9	4430,6	1447,3	1841,4	7719,4
	600	2851,8	3744,8	1226,3	1558,6	6529,6
	500	2351,3	3081,9	1011,1	1275,7	5368,6
	400	1861,2	2428,8	800,3	1001,1	4230,2
Второй конвективный пучок $\alpha_{K_2} = 1,55$	300	1384,8	1795,5	595,4	732,1	3123,1
	700	3365,9	4430,6	1683,0	1841,4	7955,0
	600	2851,8	3744,8	1425,9	1558,6	6729,3
	500	2351,3	3081,9	1175,7	1275,7	5533,2
	400	1861,2	2428,8	930,6	1001,1	4360,5
	300	1384,8	1795,5	692,4	732,1	3220,0
Водяной экономайзер $\alpha_{ЭК} = 1,65$	200	915,2	1181,3	457,6	471,4	2110,3
	400	1861,2	2428,8	1116,7	1001,1	4546,6
	300	1384,8	1795,5	830,9	732,1	3358,5
	200	915,2	1181,3	549,1	471,4	2201,8
	100	455,9	582,1	273,5	224,6	1080,2

Таблица 4.11 – Энтальпии продуктов сгорания по газоходам при сжигании топливных водоугольных суспензий с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода равным 55 / 5 / 40

Поверхность нагрева	Температура после поверхности нагрева, °С	I_6^0	I_2^0	$I_{изб.}^e$	$I_{зи}$	I	
Верх топочной камеры $\alpha_T = 1,4$	1500	8294,1	11072,6	2902,9	4489,9	18465,5	
	1400	7688,7	10252,8	2691,1	4039,4	16983,3	
	1300	7083,4	9425,5	2479,2	3474,4	15379,1	
	1200	6496,5	8616,1	2273,8	3077,3	13967,2	
	1100	5905,9	7824,7	2067,1	2799,9	12691,6	
	1000	5315,3	7037,1	1860,4	2512,2	11409,7	
	900	4743,2	6256,0	1660,1	2234,8	10150,9	
	800	4185,8	5487,9	1465,0	1957,4	8910,2	
Первый конвективный пучок $\alpha_{K_1} = 1,45$	700	3624,7	4734,7	1268,7	1690,1	7693,5	
	600	3071,1	4002,2	1074,9	1430,5	6507,5	
	500	2532,2	3293,9	886,3	1170,8	5351,0	
	400	2004,3	2596,2	701,5	918,9	4216,6	
	300	1491,2	1919,5	521,9	672,0	3113,4	
	Второй конвективный пучок $\alpha_{K_2} = 1,55$	700	3624,7	4734,7	1268,7	1690,1	7693,5
		600	3071,1	4002,2	1074,9	1430,5	6507,5
500		2532,2	3293,9	886,3	1170,8	5351,0	
400		2004,3	2596,2	701,5	918,9	4216,6	
300		1491,2	1919,5	521,9	672,0	3113,4	
Водяной экономайзер $\alpha_{ЭК} = 1,65$	200	985,5	1263,1	344,9	432,7	2040,8	
	400	2004,3	2596,2	701,5	918,9	4216,6	
	300	1491,2	1919,5	521,9	672,0	3113,4	
	200	985,5	1263,1	344,9	432,7	2040,8	
	100	490,9	622,6	171,8	206,2	1000,6	

При работе парового котла тепло, поступившее в него, расходуется на выработку полезной энергии пара и на покрытие теплопотерь. Суммарное количество энергии, поступившее в котлоагрегат, является располагаемой теплотой. Количество энергии, поступившей в котельный агрегат и покинувшей его, равно. Теплота, покинувшая котлоагрегат равна сумме полезной теплоты и теплопотерь, связанных с технологическими процессами выработки пара. Поэтому тепловой баланс котла при нормальных условиях имеет вид:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (4.22)$$

Где: Q_p^p – располагаемая теплота, поступившая в котлоагрегат, кДж/кг;

Q_1 – полезная теплота пара, кДж/кг;

Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 – тепловые потери: с уходящими газами, от химической неполноты сгорания, от механической неполноты сгорания, от наружного охлаждения соответственно, кДж/кг.

Тепловой баланс котельного агрегата составляется применительно к установившемуся режиму, а теплотери выражаются в процентах от располагаемой теплоты, поступившей в котельный агрегат.

Потеря теплоты с уходящими газами (q_2) обусловлена тем, что температура продуктов сгорания, покидающих котло агрегат, выше температуры атмосферного воздуха. Потери тепла с уходящими газами зависят от температуры уходящих газов; чистоты наружных и внутренних поверхностей нагрева; температуры воздуха, забираемого дутьевым вентилятором; вида сжигаемого топлива и коэффициента избытка воздуха в уходящих газах.

Потери теплоты с уходящими топочными газами можно снизить за счет: путем поддержания требуемого коэффициента избытка воздуха в топке и уменьшения присосов воздуха; снижения объема дымовых топочных газов; снижения температуры уходящих топочных газов, для чего применяют хвостовые поверхности нагрева: воздухоподогреватель, водяной экономайзер, контактный теплообменник и др.

Потери теплоты с уходящими газами рассчитывались по формуле:

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{x.g}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_p^p}, \quad (4.23)$$

Где: I_{yx} – энтальпия уходящих газов, определяется по таблице 4.10 и 4.11 при выбранной температуре и соответствующим значениям α_{yx} , кДж/кг;

$I_{x.g}^0$ – энтальпия теоретического объема холодного воздуха, определяется при $t_b = 30^\circ\text{C}$, кДж/кг;

$\alpha_{yx} = \alpha_{\text{ок}} = 1,45$ – коэффициент избытка воздуха в отходящих газах, принимается по таблице 4.9 в сечении газохода после последней поверхности нагрева;

q_4 – потеря теплоты от механической неполноты горения (при проведении опытов, было выявлено что для водоугольных суспензий при режимах, выбранных в 3 главе, $q_4 = 1,4 \%$);

Q_p^p – располагаемая теплота, поступившая в котлоагрегат, равна удельной теплоте сгорания топлива (таблица 4.1), кДж/кг.

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива (q_3) обусловлены содержанием в уходящих газах горючих компонентов. Потеря теплоты от химической неполноты сгорания зависит от способа сжигания топлива, коэффициента избытка воздуха, конструкции топки, вида топлива и содержания в нем летучих компонентов, организации смесеобразовательных процессов в топке (топочной камере и горелке), распределения температуры по объему топочной камеры. Для водоугольных суспензий при режимах, выбранных в 3 главе, $q_3 = 0,51 \%$

Теплопотери от наружного охлаждения (q_5) обусловлены передачей тепла от обмуровки котельного агрегата наружному воздуху. Потери теплоты от наружного охлаждения зависят от теплопроводности обмуровки и ее толщины.

$$q_5 = q_{5_{\text{ном}}} \cdot \frac{D_{\text{ном}}}{D}, \quad (4.24)$$

Где: $q_{5_{\text{ном}}} = 1,7\%$ – теплопотери от наружного охлаждения при номинальной нагрузке котельного агрегата [164];

$D_{\text{ном}}$ – номинальная нагрузка котельного агрегата, т/ч;

D – расчётная нагрузка котельного агрегата, т/ч.

При расчетной нагрузке котла равной номинальной, $q_5 = q_{5_{\text{ном}}}$

Значения теплотерь, наблюдаемые при сжигании топливных водоугольных суспензий на котельном агрегате ДКВр-10-13, представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Теплотери при сжигании топливных водоугольных суспензий (q_i).

Параметр	Ед. измер.	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
		60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
q_2	%	20,5	16,3
q_3		0,51	0,51
q_4		1,4	1,4
q_5		1,7	1,7

4.1.4 Расчет коэффициента полезного действия котлоагрегата и расхода топлива

Показателем эффективности котельного агрегата служит коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия котла – это отношение полезно использованной теплоты к располагаемой.

Коэффициент полезного действия котельного агрегата рассчитывался по уравнению обратного теплового баланса:

$$\eta_{\text{бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) \quad (4.25)$$

Количество топлива, подаваемого в котельный агрегат, рассчитывалось по уравнению прямого теплового баланса:

$$B_{\text{пг}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{Q_p^p \cdot \eta_{\text{бр}}} \cdot 100 \quad (4.26)$$

Где: $Q_{\text{пг}}$ – полезная мощность котла, кВт;

$$Q_{\text{пг}} = D_{\text{п.п}} \cdot (i_{\text{п.п}} - i_{\text{п.в}}) + 0,01 \cdot P \cdot D_{\text{п.п}} \cdot (i_{\text{кип}} - i_{\text{п.в}}), \quad (4.27)$$

Где: $D_{\text{п.п.}} = 2,25 \text{ кг/с}$ - расход выработанного перегретого пара;

$i_{\text{п.п.}} = 2929,1 \text{ кДж/кг}$ - энтальпия перегретого пара при $P = 1,37 \text{ МПа}$ и

$T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ [165];

$i_{\text{п.в.}} = 419,1 \text{ кДж/кг}$ - энтальпия питательной воды при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [165];

$i_{кип} = 825,6 \text{ кДж/кг}$ - энтальпия кипящей воды в барабане котла при $P = 1,3 \text{ МПа}$ [164];

$P = 3 \%$ - непрерывная продувка парового котла.

Расход топлива с учетом теплотерь, связанных с механической неполноты сгорания (кг/с), определялся по формуле:

$$B_p = B_{пг} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad (4.28)$$

Где: $B_{пг}$ – расход топлива, подаваемого в топку котельного агрегата, кг/с;

q_4 – потери тепла от механической неполноты сгорания, %.

Расчитанные параметры работы котлоагрегата при использовании топливных водоугольных суспензий без добавок и с добавлением 5 % отработанного моторного масла, представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.12 – Показатели эффективности работы котла при замене топлива

Параметр	Ед. измер.	ВУС с массовым соотношением отходы углеобогащения / отработанное масло / вода	
		60 / 0 / 40	55 / 5 / 40
КПД	%	75,9	80,1
$B_{пг}$	кг/с	0,77	0,63
$Q_{пг}$	кВт	5659,3	5659,3
B_p	кг/с	0,78	0,64

Исходя из полученных в результате расчета данных, можно сделать вывод что котельная предприятия может использоваться для сжигания топливных водоугольных суспензий, полученных из отходов обогащения угля. При этом КПД работы котлоагрегата снизится с нормативных 90 – 92 %, до 75,9 % при сжигании водоугольных суспензий и до 80,1 % при сжигании органомоугольных суспензий с добавлением 5 % отработанного моторного масла.

Также в ходе расчетов было установлено, что при сжигании в котельном агрегате ДКВр-10-13 топливных водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения с добавлением отработанного моторного масла при номинальной производительности и заданных параметрах перегретого пара, не

происходит нарушения технологических характеристик работы котла. Проведенные расчеты показывают, что работа котельного агрегата на водоугольном топливе возможна без модернизации поверхностей нагрева с незначительным снижением производительности.

4.2 Утилизация отходов углеобогащения

Утилизация отходов углеобогащения при их использовании в качестве сырья для получения топливных суспензий с дальнейшим сжиганием на котельной предприятия, предполагает ряд технологических операций по измельчению, гомогенизации, транспортированию, хранению и сжиганию получаемого топлива. На рисунке 4.2 представлена предлагаемая схема утилизации отходов обогащения угля.

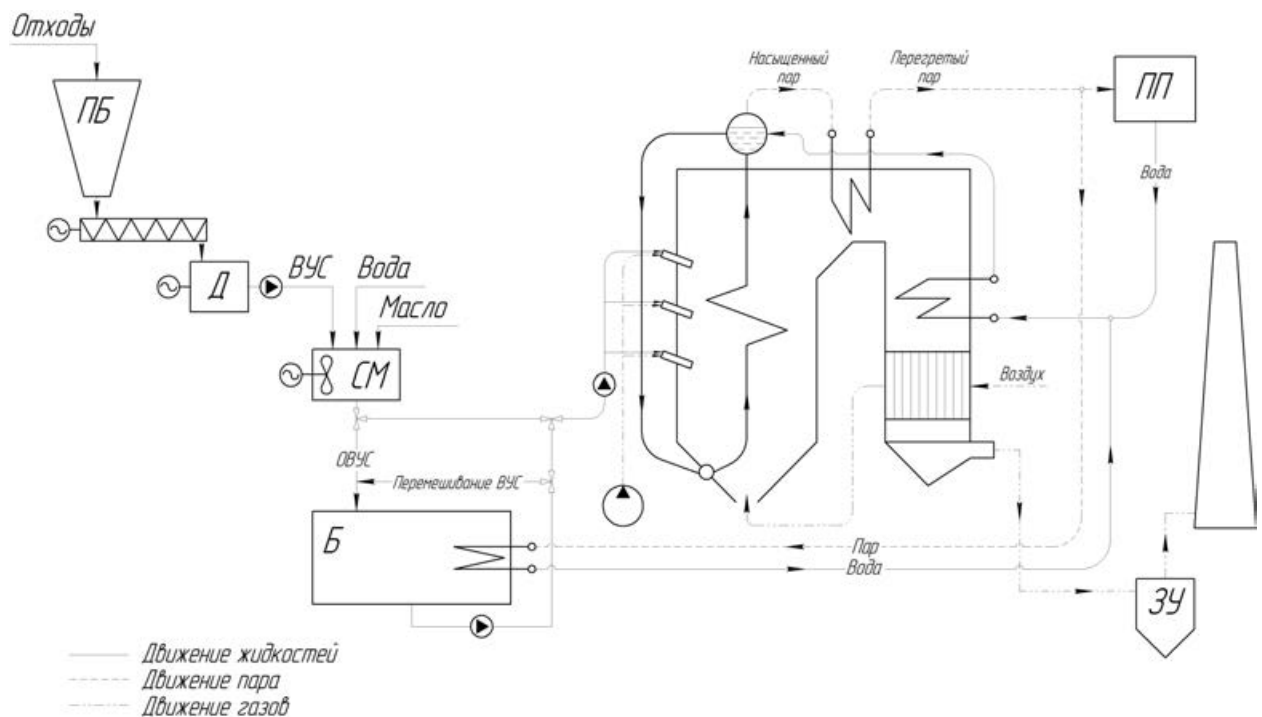


Рисунок 4.2 – Схема утилизации отходов углеобогащения

(ПБ – приемный бункер; Д – дезинтегратор; СМ – смеситель (гомогенизатор);
 Б – бак запаса ВУС; ЗУ – золоуловитель; ПП – потребитель пара)

В приемный бункер поступают отходы углеобогащения, влажностью 30 – 35 % и диаметром частиц 0 – 3 мм. Они при помощи шнекового питателя

подаются в дезинтегратор мокрого помола, где происходит их измельчение. Раздробленная до размеров менее 150 мкм масса отходов поступает в смеситель, куда также подается дисперсионная среда, до обеспечения требуемых значений содержания воды в составе суспензии (40 – 45 %) и различные добавки. В смесителе происходит гомогенизация топлива. После смесителя полученное горючее может подаваться непосредственно в котельный агрегат для утилизации, а может отправляться в обогреваемый бак запаса, обеспечивающий объем топлива, необходимый для одного дня работы котельной. Бак запаса оборудован шламовым насосом, который служит для перекачивания суспензии во избежание ее расслаивания.

Водоугольная суспензия под небольшим давлением при помощи перистальтического насоса перекачивается к соплам абразивно устойчивых двухфазных пневматических форсунок с внешним смешиванием, куда также подается сжатый воздух для распыления топлива. Суспензии сгорают в топочной камере с температурой 900 – 1150 °С. Полученное тепло нагревает экранные трубы, в которых образуется насыщенный пар. В барабане происходит отделение насыщенного пара от воды, а в пароперегревателе водяные пары нагреваются до требуемых температур. После этого полученный пар отправляется потребителю. Часть пара идет на обогрев бака запаса топлива в холодное время года.

Отходящие газы от сжигания топливных суспензий по ходу своего движения попадают в водоподогреватель и воздухоподогреватель для увеличения КПД котла и снижения температуры отходящих газов. Вода после водоподогревателя попадает в барабан и в дальнейшем циркулирует по системе. Воздух после воздухоподогревателя подается в топку дутьевым вентилятором для сжигания водоугольного топлива с коэффициентом избытка воздуха 1,2. Отходящие газы попадают в золоуловитель, где отделяется летучая зола, несгоревшие частицы и сажа. После этого сами отходящие газы выбрасываются через дымовую трубу котельной.

4.2.1 Приготовление топливных суспензий

Приготовление водоугольного топлива как правило состоит из четырех основных этапов:

- предварительное дробление угля до фракции менее 10 мм;
- мокрый помол до фракции менее 100 – 150 мкм;
- гомогенизация суспензии.

Размер частиц исследуемых отходов обогащения угля составляет менее 2 мм (п. 2.3.2), поэтому в стадии предварительного дробления нет необходимости.

Помол до фракции менее 100 – 150 мкм является ключевой операцией приготовления водоугольного топлива, поскольку гранулометрический состав исходного сырья влияет на реологические и седиментационные характеристики водоугольных суспензий, а также определяет коэффициент недожога топлива (подробнее влияние гранулометрического состава исходного сырья на характеристики водоугольных суспензий было рассмотрено в п. 3.1.2, 3.2.3 и 3.3.1.1).

В настоящее время для измельчения исходного сырья до частиц требуемых размеров, используются мельницы раздавливающе-истирающего действия, в которых образец разрушается под действием сжимающих сил (шаровые, стержневые, вибрационные и т.д.) и дезинтеграторы, в которых реализуется метод свободного удара.

Одним из недостатков способов раздавливающе-истирающего измельчения являются высокие энергетически затраты [144, 178]. В силу особенностей процессов помола в мельницах такого типа, на измельчение твердых частиц в них тратится от 2 до 20 % от всей подведенной энергии [144].

Также недостатком мельниц раздавливающе-истирающего типа является неоднородный гранулометрический состав продуктов помола, который содержит как переизмельченные частицы (менее 10 мкм), так и слишком круп-

ные зерна (более 300 мкм) [179]. Поэтому в технологических схемах производства топливных водоугольных суспензий как правило используется замкнутый цикл помола (рисунок 1.7), при котором полученная суспензия подвергается сепарированию с доизмельчением крупных зерен. Это усложняет технологический процесс приготовления суспензий и увеличивает стоимость их производства.

Метод ударного измельчения, напротив, характеризуется однородным гранулометрическим составом. Процентное содержание в измельченном продукте частиц средней фракции при измельчении материала методом свободного удара гораздо выше, чем при других способах помола. При ударном измельчении, гранулометрический состав зависит непосредственно от скорости свободного удара. Чем выше скорость вращения помольного органа или скорость самой разрушаемой частицы, тем меньше размер частиц в готовом продукте.

Наилучшим на сегодняшний день способом измельчения угля в жидкой фазе до фракции менее 100 – 150 мкм является помол в аппаратах, в которых реализуется свободный удар. Структурная схема одного из таких аппаратов представлена на рисунке 4.3. В таких устройствах частицы, сталкиваясь с ударными элементами роторов получают разнонаправленные удары, интенсивность которых возрастает при движении измельчаемого материала к выходу из помольной камеры. Вода при таком способе измельчения является проводником кинетической энергии, а также, в соответствии с эффектом Ребиндера снижает прочность твердого тела, упрощая его разрушение [145].

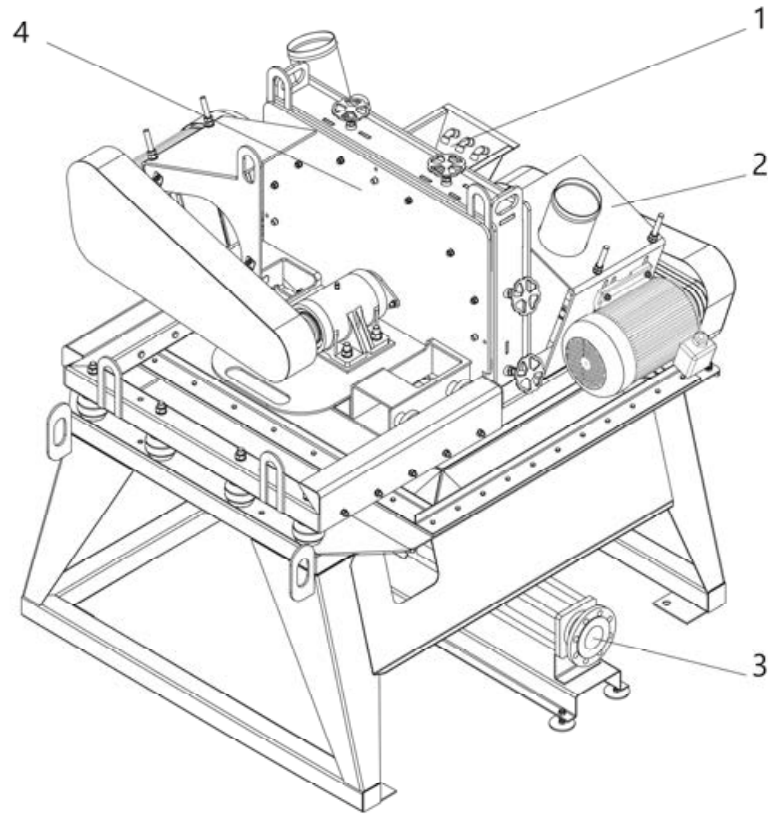


Рисунок 4.3 – Гидроударный узел мокрого помола

Гидроударный узел мокрого помола (рисунок 4.3) состоит из следующих основных структурных элементов: 1 – питатель, к которому подключается шнековый дозатор, 2 – магнитный сепаратор для удаления железосодержащих компонентов, 3 – винтовой насос выдачи продукта помола, 4 – дезинтегратор мокрого помола.

Исходное сырьё, подлежащее измельчению, загружается шнековым дозатором поступает в магнитный сепаратор, где происходит отделение магнитных включений. Далее материал через загрузочную горловину попадает в помольную камеру. На пути от центра роторов к их периферии, частицы материала сталкиваются с помольными органами и разрушаются. При этом интенсивность ударного воздействия возрастает по мере удаления частиц от центра из-за увеличения линейной скорости измельчающих деталей дезинтегратора. В воде размольная мощность дезинтегратора увеличивается благодаря кавитационному эффекту.

После измельчения полученная суспензия попадает в корпус винтового насоса выдачи продукта помола, установленного в нижней части корпуса.

Массовая доля оксидов железа в отходах углеобогащения на сухое состояние, в пересчете на Fe_3O_4 составляет 10,6 % (таблица 2.8). Использование гидроударного узла мокрого помола с магнитным сепаратором позволяет удалить от 60 до 90 % магнитного материала [169]. Использование магнитного сепаратора позволит извлечь из отходов углеобогащения магнетит, который можно вернуть в производство, на стадию тяжелосреднего обогащения угля (п. 2.1.2). Также данная процедура позволит улучшить характеристики получаемых топливных суспензий: повысить стабильность, увеличить удельную теплоту сгорания и снизить значение зольности (п. 3.1.2).

Согласно техническим характеристикам энергетические затраты на производство водоугольного топлива при помощи гидроударного узла мокрого помола Горизонт-3000 МК-ВА составляют 9,8 кВт · ч на одну тонну, а производительность – до 5 м³ в час [181].

В таблице 4.14 приведены характеристики гидроударного узла мокрого помола Горизонт-3000 МК-ВА, шаровой мельницы МШЦ СМ6001А и вибромельницы СВМ-320.

Таблица 4.14 – Характеристики гидроударного узла мокрого помола и вибромельницы СВМ-320

Оборудование	Горизонт-3000 МК-ВА	МШЦ СМ6001А	СВМ-320
Производительность, м ³ /ч	3 – 5	4,2 – 6,5	5,2
Гранулометрический состав, мкм	30-150	74-400	60-350
Потребляемая мощность, кВт	41,4	90	315
Размеры, мм			
Длина	2280	6300	4340
Ширина	1900	3600	2760
Высота	1750	2600	2160

Дезинтегратор мокрого помола благодаря небольшим размерам (2280 × 1900 × 1750 мм) может быть установлен практически на любой площадке, без создания заглубленных фундаментов, в отличие от шаровых и вибрационных

мельниц. Стоимость такой установки примерно в 2 раза ниже стоимости комплекта оборудования на базе вибрационных или шаровых мельниц с аналогичной производительностью.

После измельчения угольные частицы с содержанием воды 30 – 35 % по шнековому питателю поступают в гомогенизатор, где к ним добавляется недостающее количество воды от 5 до 15 %, а также отработанное моторное масло. В гомогенизаторе происходит активное перемешивание всех компонентов для получения однородного состава топливной суспензии. Перемешивание компонентов суспензии также способствует повышению устойчивости к расслаиванию при длительном хранении и транспортировании.

Механический способ гомогенизации, то есть перемешивание с помощью мешалок различных конструкций получило наибольшее распространение при смешивании топливных суспензий. Для гомогенизации водоугольного топлива лучше всего подходят мешалки турбинного типа.

Турбинные мешалки являются быстроходными и состоят из набора вертикальных лопастей, закрепленных радиально на диске. При вращении лопастного колеса в центре создается разрежение, а на периферии избыточный напор. Отброшенная к стенкам аппарата жидкость разделяется на два потока, верхний и нижний, которые всасываются центральной частью колеса. Таким образом, возникают два циркуляционных потока, усиливающих перемешивание жидкости.

Мешалки турбинного типа служат применяют для [163]:

- смешивания жидкостей, имеющих вязкость менее 200 П;
- сильного перемешивания, а также для диспергирования жидкостей больших объёмов (до 6 м³);
- для перемешивания суспензий с твёрдыми крупными частицами размером менее 25 мм;
- для взмучивания осадков, в которых содержится макс. 60% твёрдой фазы.

Внешний вид турбинной мешалки, соответствующей требуемым параметрам гомогенизации суспензий, МТО-300/1-500-5,5-380В-Ст08Х18Н9Е, представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Мешалка турбинного типа для гомогенизации суспензии

Смеситель для гомогенизации суспензии представляет собой ёмкость объемом 1,5 м³, оборудованную турбинной мешалкой диаметром 300 мм и скоростью вращения не менее 400 об/мин, для равномерного перемешивания топливных суспензий.

Для накопления топливных водоугольных суспензий в объеме, необходимом на работу котлоагрегата в течении одного рабочего дня, требуется установка бака. Необходимый объем (м³/сут.) рассчитывается по формуле, исходя из секундного расхода топлива, рассчитанного в п. 4.1.4.

$$V_{\text{бака}} = \frac{B_p \cdot 86400}{\rho} \cdot 1,1 \quad (4.29)$$

Где: B_p – расход топлива, кг/с (таблица 4.12);

86400 – коэффициент для пересчета секунд в сутки, с/сут.;

ρ – плотность водоугольной суспензии (1400 – 1800 кг/м³), в зависимости от характеристик исходного сырья. Для расчета примем минимальное значение, 1400 кг/м³;

1,1 – 10 % коэффициент запаса.

$$V_{\text{бака}} = \frac{0,64 \cdot 86400}{1400} \cdot 1,1 = 43,4 \text{ м}^3 / \text{сут} \quad (4.30)$$

Ближайшие наибольшие баки в серийном производстве изготавливаются объемом 45 дм³. Перемешивание суспензии при объемах свыше 10 м³ следует осуществлять путем её перекачивания шламовым насосом с возвращением обратно в накопительную ёмкость.

4.2.2 Сжигание топливных суспензий

Одним из основных устройств при сжигании водоугольных суспензий является форсунка. Для распыливания водоугольного топлива в котлоагрегат как правило используются пневматические форсунки из-за простоты их эксплуатации, низкого абразивного износа и достаточной степени распыла суспензий.

Форсунки при распылении топлива в котлоагрегат должны удовлетворять ряду требований: обеспечивать надлежащий распыл топлива, создавать заданную форму факела, иметь определенный диапазон возможного варьирования расхода топлива и т.д. К форсункам, используемым для сжигания топливных суспензий предъявляются дополнительные требования. Поскольку водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой суспензию с содержанием твердой массы до 70 %, то при её движении по узким каналам происходит их запыление. Помимо этого, несмотря на кажущуюся пластичность суспензии и высокую дисперсность частиц угля, такое топливо имеет высокую абразивную способность. Таким образом конструкции форсунок для водоугольных топливных суспензий не должны иметь узких каналов и высоких скоростей движения топлива вблизи стенок.

Одной из форсунок специально спроектированных для сжигания топливных суспензий является двухфазная прямоточная пневматическая форсунка с внешним смешиванием, изготовленная ООО «Амальтеа-Сервис». Конструкция форсунки представлена на рисунке 4.5.

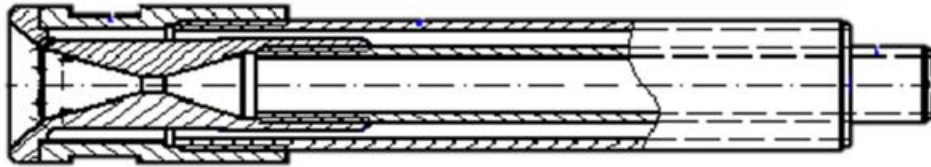


Рисунок 4.5 – Конструкция пневматической форсунки

Конструктивно форсунка состоит из двух элементов: ствола и распылителя. Ствол форсунки аналогичен стволу традиционных форсунок. Распыляющая головка неразборная и конструктивно выполнена как отдельная деталь, присоединяемая к стволу с помощью резьбового соединения. В конструкции распылителя исключен абразивный износ рабочей камеры благодаря тому, что факел распыла формируется вне тела форсунки. Размер капель при распылении топлива составляет от 30 до 500 мкм. Такая форсунка способна работать на топливных композициях с включением абразивного материала. Заявленный ресурс форсунки составляет не менее 15 000 часов [182].

Основные характеристики рассматриваемой двухфазной пневматической форсунки с внешним смешиванием представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Основные характеристики форсунки

Параметр	Значение
Расход топлива, дм ³ /час	100 – 1200
Давление топлива на входе, бар	0,5 – 2
Рабочее давление распыляющего агента, бар	1,5 – 3
Угол конуса факела, °	60 – 120

Согласно данным, полученным при расчете в п. 4.1.4, необходимый секундный расход топлива составляет 0,64 кг/с. При плотности суспензии

1400 кг/м³ часовой расход составит около 1650 дм³/час. Минимальное требуемое количество форсунок для сжигания топлива – 2 шт. Также требуется установить дополнительную форсунку, которая будет работать при выводе из эксплуатации одной из основных.

После сжигания топливных суспензий, унесенные воздушным потоком частицы золы и несгоревшие частицы топлива улавливаются установленным в настоящее время пылеулавливающим оборудованием (батареяный циклон ЦБ-49).

Оборудование, необходимое для переоборудования котельной для сжигания водоугольных суспензий из отходов углеобогащения и его основные характеристики представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 –Оборудование, необходимое для реализации предлагаемого мероприятия

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Характеристика	Значение
Горизонт-3000 МК-ВА	1	Производительность, м ³ /ч	3 – 5
		Потребляемая мощность, КВт	41,4
Форсунка для подачи топлива в котлоагрегат	3	Расход топлива, м ³ /ч	0,1 – 1,2
Гомогенизатор с турбинной мешалкой МТО-300/1-500-5,5-380В-Ст08Х18Н9Е	1	Объем, м ³	1,5
		Потребляемая мощность, КВт	5,5
Шнековый дозатор БГМЗ SP-38-01	1	Производительность, м ³ /ч	до 7,5
		Потребляемая мощность, КВт	2,5
Перистальтический насос для равномерной подачи суспензии к форсункам НПА-32-2,2/3	1	Производительность, м ³ /ч	до 2,2
		Потребляемая мощность, КВт	2,2
Винтовые насосы Унитех ПВ302	2	Производительность, м ³ /ч	до 2,2
		Потребляемая мощность, КВт	1,5
Компрессор поршневой ременной Fiac АВТ 500-1300В	2	Давление, атм.	10
		Производительность, дм ³ /мин	1260
		Потребляемая мощность, КВт	5
Стальной трубопровод для транспортировки суспензии	350 м	Внутренний диаметр, мм	20
Накопительная емкость топливной суспензии	1	Объем, м ³	45

4.3 Расчет затрат на внедрение предлагаемых мероприятий

4.3.1 Капитальные затраты

В капитальные затраты входят: стоимость оборудования (стоимость самого оборудования и стоимость его доставки), затраты на установку оборудования, а также прочие затраты (составляют 2 - 4 % от стоимости стоимости оборудования и проведения монтажных работ).

Капитальные затраты определяются по формуле:

$$Z_{КАП} = Z_{оборуд} + Z_{СМР} + Z_{проч} \quad (4.31)$$

$Z_{оборуд}$ – стоимость оборудования;

$Z_{СМР}$ – стоимость строительно-монтажных работ;

$Z_{проч}$ – прочие затраты.

Цены, количество оборудования и стоимость работ приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Капитальные затраты на реализацию предлагаемого природоохранного мероприятия

Наименование оборудования	Количество оборудования	Цена оборудования, тыс. руб.
Горизонт-3000 МК-ВА	1 шт.	740
Форсунка для подачи топлива	3 шт.	25 × 3
Гомогенизатор с турбинной мешалкой МТО-300/1-500-5,5-380В-Ст08Х18Н9Е	1 шт.	112
Шнековый дозатор БГМЗ SP-38-01	1 шт.	140
Перистальтический насос НПА-32-2,2/3	2 шт.	55 × 2
Винтовые насосы Унитех ПВ302	2 шт.	43 × 2
Компрессор поршневой ременной Fiac АВТ 500-1300В	2 шт.	140 × 2
Стальной трубопровод	350 м	0,2 × 350
Накопительная емкость	1 шт.	200
Итого:		1 813
Дополнительные затраты		
Строительно-монтажные работы	25 %	454
Доставка оборудования	10 %	182
Итого:		636

Стоимость оборудования составляет:

$$Z_{\text{оборуд}} = C_{\text{оборуд}} + Z_{\text{дост}} = 1813 + 182 = 1995 \text{ тыс. руб.} \quad (4.32)$$

Прочие затраты равны:

$$Z_{\text{проч}} = 0,03 \cdot (Z_{\text{СМР}} + Z_{\text{оборуд}}) = 0,03 \cdot (454 + 1813) = 68 \text{ тыс. руб.} \quad (4.33)$$

Таким образом, общие капитальные затраты равны:

$$Z_{\text{КАП}} = Z_{\text{оборуд}} + Z_{\text{СМР}} + Z_{\text{проч}} + Z_{\text{дост}} = 1995 + 454 + 68 + 182 = 2699 \text{ тыс. руб.} \quad (4.34)$$

4.3.2 Эксплуатационные затраты

Эксплуатационные затраты складываются из затрат на электроэнергию, воду, зарплаты рабочих, отчислений на социальные нужды, амортизационных отчислений, а также прочих затрат.

Затраты на электроэнергию:

Шнековый дозатор БГМЗ SP-38-01 используется для подачи отходов углеобогащения на стадию измельчения. Электроэнергия, потребляемая шнековым дозатором – 2,5 КВт · час стоимость электроэнергии составляет 3,6 руб. / КВт · ч. Стоимость электроэнергии, потребляемой дозатором за год можно посчитать по формуле:

$$C_{\text{БГМЗ}} = P_{\text{БГМЗ}} \cdot C_{\text{э}} \cdot 8760 = 2,5 \cdot 3,6 \cdot 8760 = 78,8 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.35)$$

$P_{\text{МТО}}$ – энергия, потребляемая турбинной мешалкой.

$C_{\text{э}}$ - стоимость 1 КВт энергии.

Для получения количества энергии необходимой предприятию в год, понадобится около 18360 тонн отходов углеобогащения с влажностью 30 %.

Энергия, потребляемая гидроударным узлом мокрого помола, составляет 41,4 КВт · час, а его производительность – 5 тонн/час.

$$C_{\text{Гуумп}} = \frac{M_{\text{ВУТ}} \cdot P_{\text{Гуумп}} \cdot C_{\text{э}}}{P_{\text{Гуумп}}} = \frac{18360 \cdot 41,4 \cdot 3,6}{5} = 547,3 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.36)$$

$M_{\text{ВУТ}}$ - расходуемая за год масса водоугольного топлива;

$P_{\text{Гуумп}}$ - производительность гидроударного узла мокрого помола;

$P_{\text{Гуумп}}$ - энергия, потребляемая гидроударным узлом мокрого помола;

Гомогенизация топливных суспензий осуществляется при помощи турбинной мешалки МТО-300/1-500-5,5-380В-Ст08Х18Н9Е. Электроэнергия, потребляемая турбинной мешалкой – 5,5 КВт · час. Стоимость электроэнергии, потребляемой гомогенизатором за год можно посчитать по формуле:

$$C_{\text{МТО}} = P_{\text{МТО}} \cdot C_{\text{э}} \cdot 8760 = 5,5 \cdot 3,6 \cdot 8760 = 173,4 \text{ тыс. руб/год} \quad (4.37)$$

$P_{\text{МТО}}$ – энергия, потребляемая турбинной мешалкой.

Для подачи водоугольного топлива в котел предлагается использовать перистальтический насос НПА-32-2,2/3 и поршневой компрессор Fias АВТ 500-1300В. Подача водоугольного топлива должна осуществляться постоянно, поэтому во время проверки, ремонта или выхода из строя основного насоса/компрессора будет включаться резервный насос/компрессор.

При реализации технологической схемы утилизации отходов углеобогащения, представленной на рисунке 4.2, используется два винтовых насоса. Энергия, потребляемая винтовыми насосами Унитех ПВ302, составляет 1,5 КВт · час. Стоимость электроэнергии, потребляемой насосами за год можно посчитать по формуле:

$$C_{\text{ПВ}} = 2 \cdot P_{\text{ПВ}} \cdot C_{\text{э}} \cdot 8760 = 2 \cdot 1,5 \cdot 3,6 \cdot 8760 = 94,6 \text{ тыс. руб/год} \quad (4.38)$$

$P_{\text{НПА}}$ – энергия, потребляемая насосом Унитех ПВ302.

Энергия, потребляемая насосом НПА-32-2,2/3, составляет 2,2 КВт · час. Стоимость электроэнергии, потребляемой насосом за год можно посчитать по формуле:

$$C_{\text{НПА}} = P_{\text{НПА}} \cdot C_{\text{э}} \cdot 8760 = 2,2 \cdot 3,6 \cdot 8760 = 69,4 \text{ тыс. руб/год} \quad (4.39)$$

$P_{\text{НПА}}$ – энергия, потребляемая насосом НПА-32-2,2/3.

Энергия, потребляемая компрессором Fias АВТ 500-1300В, составляет 5 КВт · час. Стоимость электроэнергии, потребляемой компрессором за год можно посчитать по формуле:

$$C_{\text{АВТ}} = P_{\text{АВТ}} \cdot C_{\text{э}} \cdot 8760 = 5 \cdot 3,6 \cdot 8760 = 157,7 \text{ тыс. руб/год} \quad (4.40)$$

Суммарные затраты на электроэнергию в год составляют: 1121,2 тыс. руб.

Затраты на воду:

Объем воды для приготовления водоугольного топлива в необходимом количестве составляет 7400 м³/год. Расход воды на прочие нужды равен 500 м³/год.

Стоимость воды для предприятия составляет 20 руб./м³.

Общие затраты на воду рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{общ}} = (Z_{\text{топл}} + Z_{\text{проч}}) \cdot C_{\text{в}} = (7400 + 500) \cdot 20 = 158 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.41)$$

$Z_{\text{топл}}$ - объем воды, затрачиваемый в год на приготовление топлива;

$Z_{\text{проч}}$ - объем воды, затрачиваемый в год на прочие нужды;

$C_{\text{в}}$ - стоимость 1 м³ воды

Суммарные затраты на воду в год составляют: 158 тыс. руб.

Для использования в качестве добавки к топливным суспензиям из отходов углеобогащения 5 % отработанного масла для улучшения топливных характеристик, необходимо 165,7 тонн отработанного масла. В 2017 году согласно проекту нормативов образования отходов и лимитов на их размещение, на предприятии АО «Междуречье» было образовано 128,8 тонн отработанного моторного масла, 59,0 тонн – отработанного трансмиссионного масла, 39,9 тонн – отработанного гидравлического масла и 5,3 тонн – отработанных дизельных масел. Суммарное количество – 233,0 т/год. На сегодняшний день все отработанные масла передаются сторонней организации для переработки. Принимающая организация при этом платит 6 руб./дм³. Таким образом затраты на отработанное масло можно рассчитать по формуле:

$$Z_{\text{масло}} = \frac{M_{\text{для ВУС}} \cdot C_{\text{М}}}{\rho} = \frac{165,7 \cdot 6}{0,0009} = 1104,7 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.42)$$

$M_{\text{для ВУС}}$ – масса отработанного масла, затрачиваемого в год на приготовление топлива, т/год;

$C_{\text{М}}$ - стоимость отработанного масла, по которой его покупает принимающая организация, руб./дм³;

ρ – плотность моторного масла, т/ дм³.

Расчет заработной платы рабочих представлен в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Расчет заработной платы

Наименование должности	Количество, шт.	Размер заработной платы, руб./мес.
Рабочий	1	40 000
Лаборант	0,5	35 000
Итого заработная плата всех рабочих за год:		690,0 тыс. руб.
Начисления на оплату труда (34 %)		234,6 тыс. руб.
Итого:		924,6 тыс. руб.

Амортизационные отчисления:

Амортизационные отчисления вычисляются по формуле:

$$Z_{\text{ам}} = Z_{\text{КАП}} \cdot N_a = 2699 \cdot 0,1 = 269,9 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.43)$$

$Z_{\text{КАП}}$ – стоимость основных фондов, руб.;

N_a – норма амортизации, %.

Норму амортизационных отчислений принимаем в размере 10 % т.к. расчётный срок эксплуатации оборудования, представленного в таблице 35 составляет 10 лет.

Прочие затраты:

Прочие затраты составляют около 3 % от суммы всех затрат (не учитывая амортизационные отчисления):

$$Z_{\text{проч}} = 0,03 \cdot (1245,8 + 158,0 + 924,6) = 69,9 \text{ тыс. руб./год} \quad (4.44)$$

Все эксплуатационные расходы представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Эксплуатационные затраты

Наименование статьи затрат	$Z_{\text{эсп}}$, тыс. руб./год
Затраты на электроэнергию	1 121,2
Затраты на воду	158,0
Потери прибыли от продажи отработанного моторного масла	1 104,7
Заработная плата обслуживающего персонала	924,6
Начисления на оплату труда	479,4
Амортизационные отчисления	269,9
Прочие затраты	69,9
Итого:	4 127,7

Затраты на производство одной тонны водоугольного топлива из отходов углеобогащения можно рассчитать следующим образом:

$$Z_{\text{на 1 т.}} = \frac{\Sigma Z_{\text{эксп}}}{M_{\text{ВУС}}} = \frac{4127700 \text{руб/год}}{20183 \text{т/год}} = 204,5 \text{руб./т} \quad (4.45)$$

$\Sigma Z_{\text{эксп}}$ – суммарные эксплуатационные затраты руб/год;

$M_{\text{ВУС}}$ – масса водоугольной суспензии из отходов углеобогащения, используемая на предприятии для отопления, т/год.

4.3.3 Расчет экономического эффекта

Экономический эффект от внедрения предлагаемого природоохранного мероприятия будет складываться из снижения платежей за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, уменьшения затрат на топливо и сокращения объемов образования отходов.

Фактический выброс оксидов азота от котельной основной промплощадки составляет 65,25 т/год, оксидов серы – 33,81 т/год. После внедрения мероприятий по сжиганию водоугольного топлива ожидается уменьшение выбросов оксидов азота – до 28,95 т/год, оксидов серы – до 24,67 т /год.

Снижение платы в пределах временно разрешенных выбросов за выбросы в окружающую среду для i -го компонента определяется по формуле:

$$P_i = (M_0 - M_1) \cdot K_{\text{вр}} \cdot C_i \cdot K_{\text{ин}} \quad (4.46)$$

C - ставка платы за загрязнение в пределах установленных лимитов, руб./т [183];

M_0, M_1 – выбросы i -го загрязняющего вещества в атмосферный воздух при использовании угля в качестве топлива на котельной предприятия и после внедрения технологии утилизации отходов углеобогащения, т/год;

$K_{\text{вр}}$ – коэффициент к ставкам платы за выброс загрязняющего вещества в пределах установленных временно разрешенных выбросов, равный 5.

$K_{\text{ин}}$ – коэффициент индексации платы за негативное воздействие на окружающую среду (в 2019 год этот коэффициент составил 1,04).

В таблице 4.20 представлены значения снижения плат за выбросы диоксида серы и диоксида азота.

Таблица 4.20 – Снижение плат за выбросы диоксида серы и диоксида азота

Вещество	Снижение платы, руб.
Диоксид азота	131 000
Диоксид серы	10 790

Сейчас на основном котлоагрегате котельной предприятия используется 6 956 тонн угля в год. При переводе одного из котлоагрегатов для сжигания водоугольного топлива, потребление угля снизится на 95 %, что составляет 6 608 тонн. Около 5 % угля будет использоваться для розжига. Стоимость одной тонны угля составляет 1 250 руб. Остальная часть необходимого топлива будет изготавливаться из шламов углеобогащения и составит 20 183 т/год.

Выгода от смены угля на водоугольное топливо в представлена ниже, в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Сравнение стоимости угля и водоугольного топлива.

Топливо	Уголь	5 % Уголь	95 % водоугольное топливо
Расходуемое количество топлива в год, т	6 956,0	347,8	20 183
Стоимость 1 тонны топлива, руб.	1250,0	1250,0	204,5
Затраты на топливо, тыс. руб./год	8 695,0	4 562,2	
Выгода, тыс. руб./год	4 132,8		

Отходы углеобогащения углеобогащения относятся к отходам 5 класса опасности. Ставка платы при размещении таких отходов предприятиями перерабатывающей промышленности составляет 40,1 руб. за тонну. Предлагаемые мероприятия позволят сократить количество таких отходов примерно на 13 100 т/год.

Снижение плат за размещение отходов рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{отх}} = M \cdot C \cdot K_{\text{ин}} = 13100 \cdot 40,1 \cdot 1,04 = 546,3 \text{ тыс. руб.} \quad (4.47)$$

C – ставка платы при размещении отходов V класса опасности для перерабатывающей промышленности (40,1 руб./т);

M – уменьшение массы захораниваемых отходов, т/год;

$K_{ин}$ – коэффициент индексации платы за негативное воздействие на окружающую среду. В 2019 году этот коэффициент составил 1,04.

Суммарные выгоды предприятия от внедрения технологии использования водоугольного топлива составляют 4 820,9 тыс. руб./год.

Срок окупаемости внедряемого природоохранного мероприятия рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{Z_{\text{кап}}}{\Pi - Э_3} = \frac{2699,0}{4820,9 - 412,7} \approx 3,9 \text{ года} \quad (4.48)$$

Основные технико-экономические показатели внедряемого мероприятия сведены в 4.22.

Таблица 4.22 – Основных технико-экономические показатели

Наименование статьи затрат	Затраты
Капитальные затраты, руб.	2 699 000
Эксплуатационные затраты, руб./год	4 127 700
Годовой экономический эффект, руб./год	4 820 900
Срок окупаемости, лет	3,9

Внедрение предлагаемого мероприятия по утилизации отходов углеобогащения приведет к снижению платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, плат за складирование отходов, а также к сокращению потребления угля котельной предприятия. Срок окупаемости природоохранного мероприятия составит 3,9 года.

Выводы по четвертой главе

1. Определены показатели эффективности работы котельного агрегата ДКВр-10-13 при использовании в качестве топлива органоводоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения. Коэффициент полезного действия при сжигании водоугольного топлива с добавкой 5 % отработанного моторного масла составляет 80,1 %, секундный расход топлива – 0,64 кг/с, полезная мощность котельного агрегата при этом составляет 5659,3 кВт.
2. Разработана технологическая схема по термической утилизации отходов обогащения угля и выбрано оборудование, необходимое для проведения операций по измельчению, гомогенизации, транспортированию, хранению и сжиганию получаемого суспензионного топлива.
3. Капитальные затраты на внедрение разработанного природоохранного мероприятия составят 2 699 тыс. руб., эксплуатационные – 4 128 тыс. руб./год, при этом годовой экономический эффект от снижения плат за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, плат за складирование отходов, а также от сокращения потребления угля котельной предприятия составляет 4 821 тыс. руб./год, а срок окупаемости природоохранного мероприятия – 3,9 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-производственной задачи: снижение техногенной нагрузки на компоненты окружающей природной среды от отходов обогащения угля путем внедрения комплекса технологических решений, направленных на их утилизацию.

Основные научные и практические выводы:

1. Выявлены значения основных топливных характеристик отходов обогащения угля, такие как зольность, выход летучих компонентов, удельная теплота сгорания, содержание горючих элементов и др., которые показывают, что данный вид отходов имеет высокий потенциал при его использовании в качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий.

2. Спроектирован и изготовлен лабораторный стенд для моделирования процесса термической утилизации отходов углеобогащения, с возможностью регулировки и контроля: подачи топлива, параметров распыла суспензии, расхода дутья, температуры сжигания, а также возможностью отбора газовых проб.

3. Определены параметры приготовления и сжигания топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угольного сырья, позволяющие сократить количество загрязняющих веществ в отходящих газах: оксидов азота – до 48,8 %, оксидов серы – до 43,7 % и суммы углеводородов – до 31,4%.

4. На основании лабораторных исследований предложена принципиальная технологическая схема утилизации отходов углеобогащения, включающая в себя стадии по измельчению, гомогенизации, транспортированию, накоплению и сжиганию получаемого топлива.

5. Эколого-экономическими расчетами определен срок окупаемости природоохранного мероприятия с учетом капитальных и эксплуатационных затрат на внедрение разработанных природоохранных мероприятий, составляющий 3,9 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical Review of World Energy June 2017 // <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> (дата обращения: 15.09.2017).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Министерство энергетики Российской Федерации. 13.11.2009.
3. Статистический сборник ТЭК России – 2017 // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. 01.06.2018. [Электронный ресурс]: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/17267.pdf> (дата обращения: 17.09.2017).
4. Программа развития кластера «Комплексная переработка угля и техногенных отходов» на период 2015–2020 гг. // <https://map.cluster.hse.ru/file/571/Кластер%20по%20комплексной%20переработке%20угля.%20Программа%20развития.pdf> (дата обращения: 19.09.2017).
5. Журавлева Н.В. Обоснование, разработка и развитие методов оценки влияния добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды: дисс. д.т.н. – Кемерово: ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН, 2017. – 330 с.
6. Переработка и утилизация углеотходов методом фильтрационного горения со сверхадиабатическими разогревами: научно-технический отчет – Черноголовка: ИПХФ РАН, 2012. – 35 с.
7. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиулина Е.С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // Теория и технология металлургического производства. – №2 (17) – Магнитогорск, 2015. – С. 69-76.
8. Чередниченко В.С. Плазменная переработка углеродсодержащих техногенных образований и отходов / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, В.А. Фалеев, А.А. Даниленко // Электрометаллургия. – 15/12/2007. – № 12. – С. 32-34.

9. Анисимов В.Н. Глубокая безотходная переработка природно-техногенных месторождений автономными мобильными технологическими комплексами // ТЭК и ресурсы Кузбасса. 2009. N 2 (55). С. 36 - 43.
10. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 37-2017 Добыча и обогащение угля. 01.06.2018. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/556173717> (дата обращения 11.09.2018).
11. ГОСТ 10100-84 (СТ СЭВ 4386-83). Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости.
12. Авдохин В.М. Обогащение углей. Том 1. Процессы и машины. – М.: Горная книга, 2012. - 218 с.
13. Усольцева И.О., Передерин Ю.В., Крайденко Р.И. Обогащение углей: современное состояние технологий // Ползуновский вестник. - №3 – Барнаул, 2017. – С. 131-136.
14. Лейбович Р.Е., Яковлева Е.И., Филатова А.Б. Технология коксохимического производства. М.: Металлургия, 1982. - 360с.
15. Королев И.А. Моделирование технологии повторного обогащения промпродукта ОФ «Междуреченская» // Горный информационно-аналитический бюллетень. - №10 – М., 2015. – С. 406-410.
16. Авдохин В.М. Обогащение углей. Том 2. Технологии. – М.: Горная книга, 2012. - 475 с.
17. Ефимов В.И., Никулин И.Б., Рыбак В.Л. Использование отходов углеобогащения и оптимизация ресурсов по экологическому фактору // Известия ТулГУ. – Вып. 1 – Тула, 2014. – С. 85-95.
18. Коновалова Т.А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углеобогачительных фабрик / Т.А. Коновалова, Г.Б. Векслер, А.А. Лавриненко, Г.Ю. Гольберг // Известия московского государственного технического университета. - №1(19) – М., 2014. – С. 5-10.

19. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Том 1. Обогащительные процессы. – М.: Горная книга, 2006. – 417 с.
20. Крылов Д.А. Тяжелые металлы в летучей золе ТЭС // Энергия: экономика, техника, экология. - №4 – М.,2010. – С. 44-50.
21. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году».– М.: Минприроды России; НИАПрирода, 2018. – 888 с.
22. Гайдай М.Ф. Геоэкологические аспекты рационального использования ресурсного потенциала терриконов угледобывающих предприятий (на примере Кизеловского угольного бассейна): дисс. к.т.н. – Пермь: ПНИПУ, 2016. – 160 с.
23. Пчелкин Г.Д., Кустов В.В., Кустов А.В. Управление устойчивостью отвалов посредством эффективности сегрегации скальной вскрыши на откосе // Геотехническая механика: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. – Вып. 107. – С. 179-187.
24. Попович В.В. Снижение техногенного прессинга полиэлементных аномалий девастированных ландшафтов путем фитомелиоративного восстановления // Біологічний вісник МДПУ. 2016. № 1. – С. 94–114.
25. Журавлева Н.В. Обоснование, разработка и развитие методов оценки влияния добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды: дисс. д.т.н. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2017. – 341 с.
26. Брагина П.С. Самовозгорание угольных отвалов в Кемеровской области // Вестник Кузбасской государственной педагогической академии. - №4(29) – Новокузнецк, 2013. – С. 57-64.
27. Прохоров Д.О., Сушков С.Л. Оценка экологической опасности породных отвалов угольных шахт на основе данных дистанционного зондирования // Известия ТулГУ. – Вып. 1 – Тула, 2018. – С. 51-63.
28. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

29. Воробьев Е.А. Сокирка С.А., Сухарь Е.А. Влияние породных отвалов на окружающую среду // Материалы VI международной конференции по открытой и подводной добыче полезных ископаемых. – Варна, 2010. – С. 83-88.
30. Стрекалова Т.А., Стрекалова В.А., Меренкова Е.С. Мероприятия, снижающие вредное воздействие отвалов на окружающую среду // Успехи современного естествознания. - № 4. – Пенза, 2013. – С. 118-121.
31. Banerjee S.C. Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires, Oxford & IBN Publishing Co, 1985 1985, pp 70-82.
32. Техника и технология обогащения углей. Справочное руководство. Под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Молявко. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1995. – 622 с.
33. Баранова М.П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: дисс. д.т.н. – М., 2014. – 275 с.
34. Никишанин М.С., Загрутдинов Р.Ш., Сеначин П.К. Брикетирование местных топлив и отходов для систем энергообеспечения в сельской местности // Ползуновский вестник. - №1 – Барнаул, 2016. – С. 88-95.
35. Никулин А.Н. Ресурсосберегающие технологии получения тепловой энергии на основе использования твердых горючих отходов углеродсодержащих материалов: дисс. к.т.н. – СПб, 2008. – 205 с.
36. Бенин А.А. Рациональное использование ресурсов на основе производственных комплексов по переработке твердых горючих отходов добывающих отраслей Северо-Западного региона: дисс. д.т.н. – СПб, 2003. – 322 с.
37. Фоменко А.И. Научное обоснование технологий утилизации дисперсных твердых отходов производств промышленного комплекса: дисс. д.т.н. – Череповец, 2006. – 424 с.
38. Карпачева А.А. Стеновые керамические изделия на основе отходов углеобогащения и железосодержащих добавок: дисс. к.т.н. – Новосибирск, 2009. – 161 с.

39. Структурообразование и свойства пористой строительной керамики на основе отходов углеобогащения / А. И. Шуйский, А. В. Козлов, В. Д. Котляр [и др.]; М-во образования Рос. Федерации. Ростов. гос. строит. ун-т. - Ростов н/д : Рост. гос. строит. ун-т, 2003. – 185 с.

40. Панова В.Ф., Панов С.А. Отходы углеобогащения как сырье для получения строительных материалов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. - №2(12) – Новокузнецк, 2015. – С. 71-72.

41. Ходыкин Е.И. Использование отходов углеобогащения Коркинского разреза в производстве цемента: дисс. к.т.н. – Челябинск, 1998. – 206 с.

42. Кравцов В.П., Папин А.В. Актуальность технологии брикетирования коксовой пыли // Вестник КузГТУ. - № 4 – Кемерово, 2012. – С. 112-113.

43. Кусков В.Б, Бажин В.Ю. Использование маловостребованных углеродсодержащих продуктов с целью получения тепловой энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. - вып. 7 – М., 2015. – С.651-658.

44. Бижанов А.М. Структурообразование в брикетах экструзии (брэксах) из углеродсодержащих материалов / А.М Коновалов, И.Ф. Курунов, Д.В. Ивонин, В.И. Ефимов // Известия ТулГУ. – Вып. 2 – Тула, 2013. – С. 102-112.

45. Сухомлинов Д.В. Подбор оптимальных параметров брикетирования угольных отсевов и шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - №5 – М., 2013. – С. 4-10.

46. Александрова Т.Н., Рассказова А.В. Исследование зависимости качества угольных топливных брикетов от технологических параметров их производства // Записки Горного института. – Т. 220 – СПб, 2016. – С. 573-577.

47. Рейшахрит Е.И. Обоснование экономической эффективности инвестиций в производство топливных брикетов из отходов углеобогащения Воркутского горнопромышленного района / Е.И. Рейшахрит, И.А. Малых, А.А. Иванов, Л.Ф. Чемерова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - вып. 3 – М., 2001. – С. 156-160.

48. Ивашкина Е.Н., Левашова А.И., Юрьев Е.М. Теоретические основы химической технологии топлива и углеродных материалов: Учебное пособие. – Томск, ТПУ, 2012. – 232 с.
49. Тимофеева С.С., Мингалеева Г.Р. Исследования режимных параметров поточного газогенератора при газификации твердого топлива // Вестник Казанского технологического университета. - №16 – Казань, 2011. – С. 216-224.
50. Русьянова Н.Д. Угলেখимия. М.: Наука, 2003. – 317 с.
51. Белов А.А. Гидравлическое транспортирование обводненного топлива в виде водоугольной суспензии // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 103 – 111.
52. Sacks M.E., Romney M.J., Jones J.F. Some pumping characteristics of coal char slurries. *Ind Eng Chem Process Des Develop* 9, 1970. – pp. 148 – 155.
53. Делягин Г.Н., Кулинич А.И., Кирсанов В.И. Экспериментальное исследование процесса горения капли водоугольной суспензии из бурого и газового углей // Горение дисперсных топливных систем: Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1965. – С. 55 – 67.
54. Вессельман С.Г., Лугинин Н.Е., Дробышев Л.В. Циклонная топка для исследования процесса сжигания обводненной каменноугольной мелочи // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 184–186.
55. Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука. 1965. – С. 78-88.
56. Делягин, Г.Н. Метод рационального использования высокообводнённых углей путем их сжигания в виде водоугольных суспензий в топочных устройствах (Инф. письмо № 1). – М.: ИГИ, 1962 – С.11.
57. Z. Huang, C. Qin, and J. Gao, Theoretical analysis on CWM drop combustion history, *Proc. 8th Int. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization*, USA, Orlando, Part 1, 1986, pp. 343 – 358.

58. Делягин Г.Н. Дисперсные топливные системы в энергетике и химической технологии. // Химия твердого топлива, №1, М., 1973. С. 127 – 134.
59. Хидиятов А.М. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев, др. // М., Теплоэнергетика. – 1987. – №1. – с. 5 – 11
60. Олофинский Е.П. Вопросы использования водоугольного топлива на тепловых электростанциях // М., Теплоэнергетика. 1989. -№12.- с. 64 – 66.
61. Рукин Э.И. Исследование свойств водоугольных суспензий из каменных углей в присутствии поверхностно-активных веществ / Э.И. Рукин, Т.П. Горская, Г.Н. Делягин, В.В. Исаев // Химия и переработка топлив. – 1975. – Т.30, вып.2. – с. 19–26.
62. Берг Б.В., Богатова Т.Ф. Тепло-и массоперенос в топках с кипящим слоем при сжигании водоугольной смеси // Инженерная Физика. 1996. Том. 69. №6. с. 993-999.
63. Seki M., Kiyama K., Nishino J. Effects of coal property and additive on rheological characteristics of coal water mixture. Proc 7th Int Symp Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, New Orleans, 1985, pp 136–145.
64. Atal A., Levendis Y.A. Combustion of CWF agglomerates from pulverized or micronized bituminous coal, carbon black, and diesel soot // Combustion and Flame. – 1994. – Vol. 93, №. 4. – pp 326–342.
65. Lammel, G. and Novakov, T.: Water nucleation properties of carbon black and diesel soot particles, Atmos. Environ. 1995. – Vol. 29. – pp 813–823.
66. Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) // М., Теплоэнергетика. 2016. - №10. - с. 31 – 41.
67. Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива // М., Теплоэнергетика. 2015. - №10. - с. 16 – 21.

68. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions, *Fuel*, 2011. – Vol. 90(2). – pp 865-877.
69. Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива // *Химия твердого топлива*. 2015. - № 6. - с. 16 – 21.
70. Федорова Н.И. Анализ характера горения композиционных топлив, полученных кавитационным методом / Н.И. Федорова, Ю.Ф. Патраков, В.Г. Сурков, А.К. Головки // *Вестник КузГТУ*. 2007. - № 4. - с. 38 – 41.
71. Law C.K. Combustion characteristics of droplets of coal/oil and coal/oil/water mixtures / C.K. Law, H.K. Law, C.H. Lee // *Energy*. 1979. – Vol. 4. – pp. 329–339.
72. Sakai T., Saito M. Single-droplet combustion of coal slurry fuels // *Combustion and Flame*. 1983. – Vol. 51. – pp. 141–154.
73. Murdoch P.L., Pourkashanian M., Williams A. The mechanism of combustion of coal-water slurries // *20th International Symposium on Combustion*. 1985. – Vol. 20. – pp. 1409–1418.
74. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива // *Горение и плазмохимия*. 2007. - № 3. с. 178 – 188.
75. Yao S.C., Manwani P. Burning of suspended coal-water slurry droplet with oil as combustion additive // *Combustion and Flame*. 1986. – Vol. 66. – pp. 87–89.
76. Miyasaka K., Law C.K. Combustion and Agglomeration of Coal-Oil Mixtures in Furnace Environments // *Combustion Science and Technology*. 1980. – Vol. 24, № 1-2. – pp. 71–82.
77. Liu G.E., Law C.K. Combustion of coal-water slurry droplets // *Fuel*. 1986. – Vol. 65, № 2. – pp. 171–176.
78. Деягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий*. – М: «Наука». – 1967. – С. 45–55.

79. Няшина Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы: дисс. к.т.н. – Томск, 2018. – 201 с.
80. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении – М: Изд-во Академии наук СССР, 1947. – 147 с.
81. Бабий В.И., Котлер В.Р. Вербовецкий Э.Х., Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах. «Энергетик», 1996, №6, С. 8-13.
82. Орлов С.В. Повышение эффективности сжигания твердого топлива // Тезисы докладов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 50-летию первого полета человека в космос «Молодёжь и наука». Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – С. 1–4.
83. Efstathiou A.M. Olympiou G.G. Industrial NO_x control via H₂-SCR on a novel supported-ptnanocatalyst // Chemical Engineering Journal – 2017. – Vol. 170. – pp. 424–432.
84. Daood S.S. Fuel additive technology – NO_x reduction, combustion efficiency and fly ash improvement for coal fired power stations / S.S. Daood, G. Ord, T. Wilkinson, W. Nimmo // Fuel. – 2014. – Vol. 134. – pp. 293–306.
85. Lee B.H., Eddings E.G., Jeon C.H. Effect of coal blending methods with different excess oxygen on unburned carbon and NO_x emissions in an entrained flow reactor // Energy Fuels. – 2016. – Vol. 26. – pp. 6803–6814.
86. Feng T. Reduction of SO₂ to elemental sulfur with H₂ and mixed H₂/CO gas in an activated carbon bed / T. Feng, M. Huo, X. Zhao, T. Wang, X. Xia, C. Ma // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – Vol. 121. – pp. 191–199.
87. Bacskay G.B. Mackie J.C. Oxidation of CO by SO₂: a theoretical study // The Journal of Physical Chemistry. – 2005. – Vol. 109, № 9. – pp. 2019–2025.

88. Патент 2249029 РФ. Способ получения водоугольного топлива и технологическая линия для его осуществления / Петраков А.Д. Радченко С.М. Яковлев О.П. Опубл. 22.03.2005.

89. Горлов Е.Г., Сафиев О.Г., Серегин А.И. Физико-химические свойства угольных шламов и их переработка // Химия твердого топлива. 2008. №1. С. 54–57.

90. Ходаков Г.С., Горлов Е.Г., Головин Г.С. Производство и трубопроводное транспортирование суспензионного водоугольного топлива // Химия твердого топлива. – 2006. – №4. – С. 22–39.

91. Мурко В.И. Результаты исследования вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, Д.А. Дзюба. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. - № 5. – С. 512–519.

92. Морозов А.Г. Практические результаты измерения выбросов от сжигания ВУТ // Экологический вестник России. 2014. - №6. – С. 33-37.

93. Ванцлова А.Р. Формирование инновационной экономики (на примере Кемеровской области) // Международный студенческий научный вестник КемГУ. 2018. С. 818-821.

94. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь - декабрь 2017 года. Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал Уголь. 2018. - №3. – С. 58—72.

95. ПНД Ф 12.15.1-08 «Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод».

96. М-02-2406-13 «Методика количественного химического анализа. Определение элементов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом».

97. М-02-1805-09 «Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов NO_2^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , PO_4^{3-} , Br^- в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионообменной хроматографии»

98. ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02»

99. Сверчков И.П. Перспективы использования отходов углеобогащения ОАО «Междуречье» // Сборник статей международной научно-практической конференции «Современный взгляд на будущее науки», ч. 3, Уфа: изд. АЭТЕРНА, 2014 - С. 216-219

100. Стоящева Н.В. Проблема загрязнения малых рек Кузбасса сточными водами промышленных предприятий // Вестник Кемеровского государственного университета, 2015. - № 4 (64) Т. 3. - С. 156 -163.

101. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче и переработке угля / ВНИИОСуголь. - Пермь, 1990. - 42 с.

102. ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03 «Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений».

103. Мурко В.И. Совершенствование технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива на основе отходов углеобогащения / В.И. Мурко, В.И. Федяев, Х.Л. Айнетдинов, А.В. Яковленко, П.С. Воскобойников // Уголь. 2013. - № 4. – С.50-52.

104. Мурко В.И. Исследования технологии сжигания суспензионного угольного топлива в вихревой камере / В.И. Мурко, Ю.А. Сенчунова, В.И. Федяев, В.И. Капренок // Вестник КузГТУ. - № 2 – Кемерово, 2013. – С. 103-105.

105. В/Т 18856.3-2002 水煤浆质量试验方法 第3部分：水煤浆筛分试验方法 (В/Т 18856.3-2002 «Методы определения качества водоугольных суспензий часть 3: Методы анализа размера частиц»)

106. ГОСТ Р 52911-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги»

107. ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности»

108. Мурко В.И. Исследование получения суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения / В.И. Мурко, Г.Д. Вахрушева, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, В.П. Мاستихина, Д.А. Дзюба // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. - 2011. – Том 4, №5. - С.522-526.

109. Горлов Е.Г., Андриенко В.Г., Нефедов К.Е.. Прямочная газификация водоугольных суспензий с сухим шлакообразованием высокозольных углей // Химия твердого топлива. 2009. - № 2. С. – 37-42.

110. ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ».

111. Ермакова Л.А. Механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников, А.А. Пермяков // Вестн. КемГУ. - 2012. – Том 2, № 4(52). – С.164-169.

112. Свечникова Н.Ю. Комплексное использование отходов углеобогащения ОАО ЦОФ "Беловская" / Н.Ю Свечникова, Н.С. Коновницына, Е.А. Игуменшева, О.Г. Кухаренко // Молодой ученый - 2016. – № 23(127). – С.89-91.

113. GB/T 18856.7-2002 水煤浆质量试验方法 第7部分：水煤浆工业分析方法 (GB/T 18856.7-2002 «Методы определения качества водоугольных суспензий часть 7: Методы анализа размера частиц»).

114. ГОСТ 147-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания»

115. Сверчков И.П. Хвосты углеобогащения как источник сырья для энергогенерирующих предприятий // Сборник трудов XXII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» – Томск: ред. ТПУ, 2018, с. 848 – 850.

116. Мурко В.И. Сжигание водоугольного топлива в теплогенерирующих установках малой мощности / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, Д.А. Дзюба, В.Н. Делягин, Н.М. Иванов, В.Я. Батищев // Ползуновский вестник. - №4-1 – Барнаул, 2014. – С. 59-63.

117. ГОСТ 32979-2014 «Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота».

118. ГОСТ 32465-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии».

119. Сверчков И.П. Перспективы использования отходов углеобогащения на примере ОАО «Междуречье» // Сборник статей международной конференции «Наука XXI века: новый подход», СПб: изд. Открытие, 2014. С. 41-44

120. ГОСТ Р 53355-2009 «Топливо твердое минеральное. Элементный анализ».

121. Сверчков И.П. Перспективы использования отходов углеобогащения // Материалы научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» ч. 2, СПб: изд. Политехнического университета, 2015. С 206-208.

122. Сверчков И.П. Снижение негативного воздействия на окружающую природную среду в районе расположения предприятий переработки угля // Сборник трудов XX Международного симпозиума им. Академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» - Томск: ред. ТПУ, 2016 С. 239 – 241.

123. Сверчков И.П., Пашкевич М.А. Отходы углеобогащения как сырье для получения водоугольного топлива // Научно-технический журнал «Горный аналитический бюллетень» №11. М.: изд. Горная книга, 2015 С. 561 – 567

124. ГОСТ Р 55879-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии».

125. ГОСТ 32977-2014 «Топливо твердое минеральное. Определение микро-элементов в золе атомно-абсорбционным методом».

126. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России / Под ред. В.Ф. Череповского - М.: Недра, 1996. - 238 с.

127. Сверчков И.П., Пашкевич М.А., Петрова Т.А. Свойства обводненных отходов обогащения угля и перспективы их рециклинга // Научно-технический журнал «Обогащение руд» №1. СПб: изд. Руда и металлы, 2017 С. 46 – 51.

128. Сверчков И.П., Пашкевич М.А., Чукаева М.А. Исследование технологических свойств суспензий, полученных из шламов углеобогащения // Научно-технический журнал «Обогащение руд» №6. СПб: изд. Руда и металлы, 2017; С. 54 – 57.

129. Сверчков И.П. Отходы обогащения угля как сырье для получения топливных суспензий // Материалы 7-ой международной научно-практической конференции «Опыт прошлого – взгляд в будущее» - Тула: изд. ТулГУ, 2017; С. 297 – 302.

130. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России / Под ред. В.Ф. Череповского - М.: Недра, 1996. - 238 с.

131. Блинов Е.А. Топливо и теория горения // Учебное пособие, Изд-во СЗТУ, СПб. – 2007. – 120 с.

132. Sources and environmental fate. Hazards to health and the environment. Present and future regulations // Proc. on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH). November 11 – 13. Oslo, 1991.

133. Скалкин Ф.В., Канаев А.А., Копп И.З. Энергетика и окружающая среда // Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. - 280 с.

134. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справочник / Под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунд. М.: Металлургия. 1988 Ч.1. 760 с.

135. РД 52.04.792-2014 «Массовая концентрация оксида и диоксида азота в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом с использованием сульфаниловой кислоты и I-нафтиламина».

136. Бусев А.И., Симонова Л.Н. Аналитическая химия серы. АН СССР, Ордена Ленина институт геохимии и аналит. химии им. В.И. Вернадского. – М.: Наука, 1975. – 270 с.

137. Sverchkov I.P., Matveeva V.A., Isakov A.E. The reduction of negative impact on the area of coal processing enterprises // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – Netherlands, Leiden, published by CRC Press/Balkema, 2018 – pp. 431 - 437

138. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства: учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1976. – 486 с.

139. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов. / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов, М.Н. Конович, Ю.Н. Корчунов, Ю.А. Рундыгин, С.Л. Шагалова, С.М. Шестаков. – Под ред. В.В. Померанцева. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

140. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.

141. Архипов А.М., Путилов В.Я. Ступенчатое факельное сжигание кузнецких углей на ТЭС// Теплоэнергетика, 2009, № 8, С. 52-57.

142. Сенчурова Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского Политехнического Университета. - Т.312, № 4. - 2008. - С. 37-40.

143. Осинцев В.В. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. - №11. 2002. - С. 14-19.

144. Морозов А.Г., Коренюгина Н.В. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. - №7. 2010. - С. 18-21.

145. Малкин А.И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера (Обзор) // Коллоидный журнал, 2012. Том 74, №2 - С. 239-256.

146. Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: дисс. к.т.н. Томск, 2014. – 130 с.

147. Son S.Y. Kihm K.D. Effect of coal particle size on coal-water slurry (CWS) atomization. *Atomization Sprays*. 1998. №8 - pp. 503-519.
148. Boylu F., Dinçer H., Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries // *Fuel Processing Technology*. 2004. №85 - pp. 241- 250.
149. Эшметов И.Д., Агзамходжаев А.А. Исследование вязкости водоугольных топливных суспензий, полученных на основе кондиционных товарных углей Ангренского месторождения Республики Узбекистана // *Химическая промышленность*. 2014. Том 91, №3 - С.118-122.
150. Самойлик В.Г. Основные технологические параметры водоугольного топлива // *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.* 2015. Вып. 61(102) - С.58-65.
151. Shirley C.T., Everett W.K. Viscometry and rheology of coal water slurry // *Fuel*, Vol. 65, 1986 – pp. 566-571.
152. Mishra S.K., Senapati P.K., Panda. D Rheological Behavior of Coal-Water Slurry // *Energy Sources*. – 2012. – Vol. 24, № 2. – pp. 159–167.
153. Watanabe S., Katabe K. Effekt of several factors on high concentrated coal-water slurry reological properties // *Symp. On Coal Slurry Combastion*. Florida. – 1984. – pp. 467–478.
154. Самойлик В.Г., Елишевич А.Т., Макаров А.С. Влияние состава минеральных примесей на реологические свойства водоугольных суспензий // *Химия твердого топлива*. – М., 1990. №5. – С. 76-81.
155. Jianzhong L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / Jianzhong L, Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C. // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 115. – pp. 309–319.
156. Islam A.K., Naser J.A. Review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace. // *Energy Inst.* - 2018, - Vol. 91. – pp. 1–18.

157. Алексеенко С.В. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности / С.В. Алексеенко, Л.И. Мальцев, А.Р. Богомоллов, М.Ю. Чернецкий и др. // Известия Томского Политехнического Университета. - Т.328, № 12. - 2017. - С. 16-28.

158. Рыбенко И.А. Математическое моделирование процессов горения суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке / Рыбенко И.А., Мочалов С.П., Мочалов П.С., Калашников С.Н. // Вестн. Сиб. гос. индустр. ун-та. - 2012. - № 1. - С.52-56

159. Сенчурова Ю.А., Заречнева Е.В. Математическое моделирование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива в вихревой топке // Вестн. Кузбас. ГТУ. - 2012. - №6 (94). - С.122-127.

160. Каверин А.А. Исследование факельного сжигания низкосортного твердого топлива угрубленного помола в системе прямоточных турбулентных струй: дисс. к.т.н. – М: НИУ «МЭИ», 2017. – 212 с.

161. Glushkov D.O. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D.O. Glushkov, S.Y. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak // Energy & Fuels. – 2016. – Vol. 30, No. 4. – pp. 3441–3450.

162. Хилько С.Л. Особенности реологического поведения коллоидных топлив // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. - Днепропетровск: НПВК "Триакон". - 2011. - Вып. 1(6). - С. 47 - 51.

163. Круть А.А. Совершенствование технологии приготовления водоугольных суспензий // Прикладная гидромеханика. – 2014. - Том 16 (88) №2. - С. 36-47.

164. Аничков С.Н. Метод отбора проб на содержание полиароматических углеводородов в продуктах сгорания различных видов топлив / С.Н. Аничков, В.Ф. Бабий, С.Г. Козлова и др. // Малоотходная технология в энергетике - М., 1985. - С. 114-119.

165. Ведрученко В.Р. Вредные выбросы и методы их огневого дожигания в неэкранированных котельных топках / В.Р. Ведрученко, В.В Крайнов,

Е.В. Галимский, Д.А. Мещеряков, М.В. Кокшаров // Омский научный вестник. - 2012. - № 3(113). - С. 187-192.

166. Вершинина К.Ю. Низкотемпературное зажигание отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций: дисс. к.ф-м.н. – Томск: ТПУ, 2016. – 191 с.

167. Nyashina G.S. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal / G.S. Nyashina, K.Yu. Ver-shinina, M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // Journal of Hazardous Materials. - 2018. - Vol. 347. - pp. 359-370.

168. Филиппов С.П. Экспериментальное определение выбросов сажи и ПАУ котельными и домовыми печами / С.П. Филиппов, П.П. Павлов, А.В. Кейко, А.Г. Горшков, Л.И. Белых // Известия Академии Наук. Энергетика – М., 2000. - №3. - С. 107-117.

169. Косой Х.Г. Хесина А.Я. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) в загрязнении атмосферного воздуха крупного промышленного центра // Довкілля та здоров'я. – 1997. – № 2. – с.28–32.

170. Li J., Zhang X., Yang W., Blasiak W. Effects of Flue Gas Internal Recirculation on NO_x and SO_x Emissions in a Co-Firing Boiler // International Journal of Clean Coal and Energy. – 2013. - Vol. 2, № 2. - pp. 13-21.

171. Hu Y, Naito S, Kobayashi N, Hasatani M. CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases // Fuel. – 2000 Vol. 79(15). – pp. 1925–1932.

172. Паровые котлы типа Е (ДКВР): 0302.020.ТО: техническое описание, инструкция по монтажу и эксплуатации. - Бийск: ОАО «Бийский котельный завод», 2006. - 52 с.

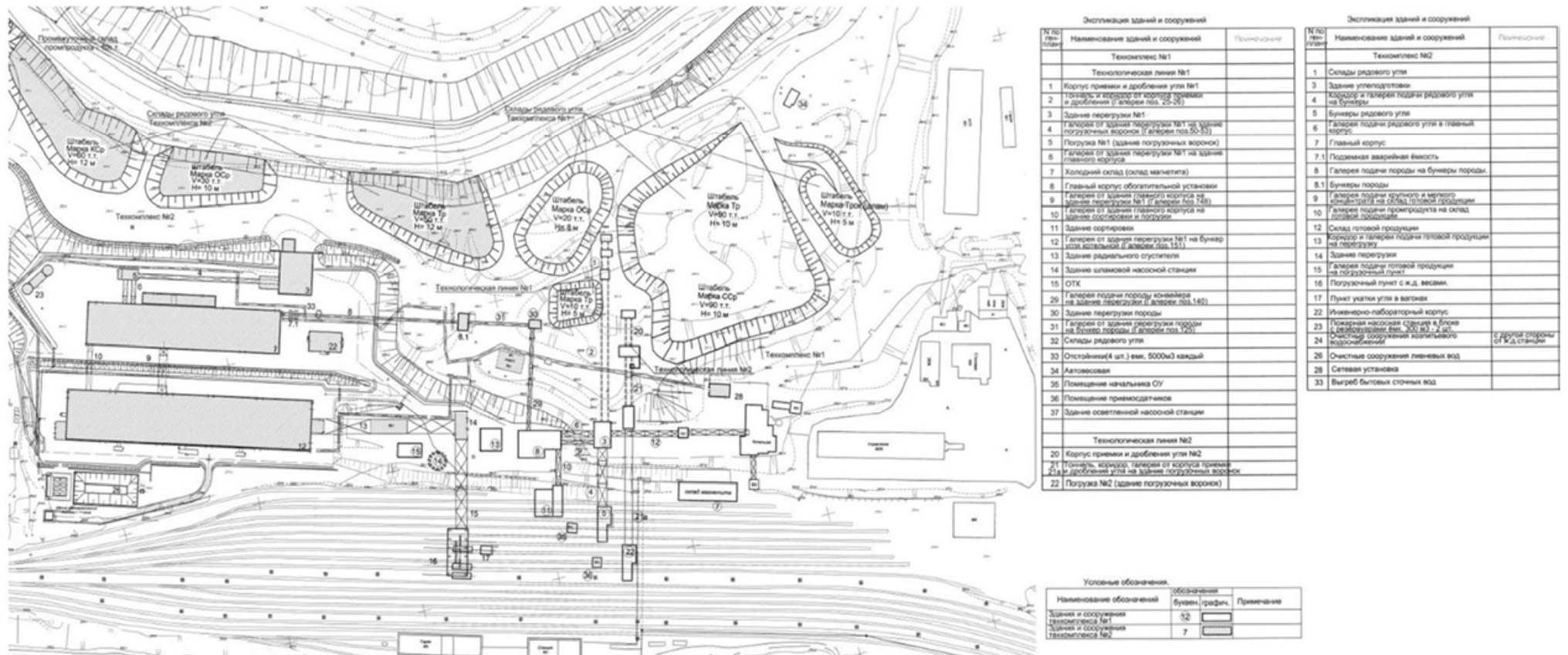
173. Цепенюк А.И. Разработка, исследование новой технологии использования на ТЭС кавитационного жидкоугольного топлива: дисс. к.т.н. – Новосибирск: НГТУ, 2013. – 173 с.

174. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под ред. Кузнецова Н.В. - М.: Энергия, 1973. - 295 с.

175. Соколов Б.А. Паровые котлы малой и средней мощности: учеб. пособие для ВУЗов. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 128 с.
176. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1980. - 425 с.
177. Шабардин Д.П. Разработка автоматизированной системы управления процессом подготовки композиционного жидкого топлива к сжиганию в топке котла // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодёжного форума. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Том 1. – С. 194-198.
178. Мосин С.И., Морозов А.Г., Делягин Г.Н. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. - 2008. - №9(97). - С.22-28.
179. Лысак Д.В., Ростовщикова Д.В., Перминова Л.Г. Водоугольное топливо в теплоэнергетике // Сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции. Красноярск: СФУ. 2011. С. 1-4.
180. Выскребенец А.С., Кибизов С.Г. Подготовка угольного топлива в центробежных дробильно-измельчительных установках / Горный информационно-аналитический бюллетень. - №1 – М., 2014. – С. 129-133.
181. Дезинтегратор мокрого помола «Горизонт-3000 МК-ВА» Руководство по эксплуатации. Д 83-1530.00.000 РЭ. Тула. – 2007 – 39 с.
182. Архипкин О.О., Морозов А.Г. Современные подходы к использованию водоугольного топлива // Экол. вестн. России. 2011. - №9. С. 40-45.
183. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 №913 (ред. от 29.06.2018) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах"

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Общий вид технологического комплекса ОФ «Междуреченская»



M 1:25000

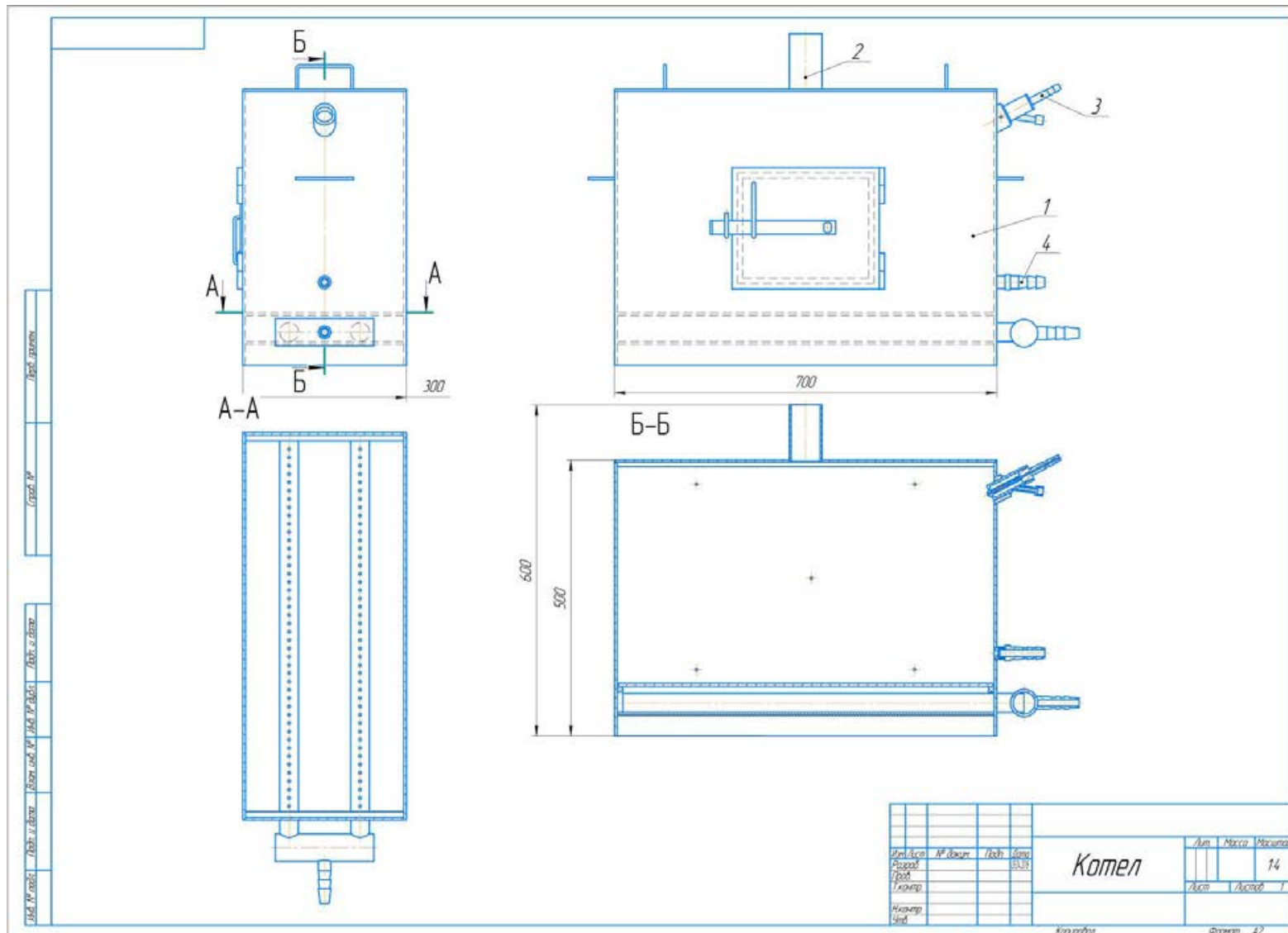
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты анализа проб отходов углеобогащения

Измеряемые показатели		Номер пробы													
		Обводненные пробы из шламонакопителя								Пробы с бортов шламонакопителя					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Основные топливные показатели	A^d , %	28,0	28,1	27,4	27,2	27,7	26,8	26,4	28,6	31,4	31,1	34,2	35,2	33,4	33,7
	Q_t^a , МДж/кг	17,9	17,8	18,2	18,4	17,9	18,1	18,6	18,0	16,9	16,9	16,4	16,3	16,5	16,5
	V^{daf} , %	44,0	43,4	45,2	44,6	45,1	46,2	45,1	43,9	47,2	46,9	47,1	46,5	48,3	48,0
Содержание топливных элементов, %	C	58,0	58,7	60,1	59,2	59,4	60,2	60,3	58,4	55,2	54,9	52,8	52,2	53,4	53,0
	H	3,6	3,6	3,7	3,7	3,6	3,8	3,7	3,7	3,5	3,4	2,9	3,0	2,9	3,2
	N	1,7	1,6	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6	1,4	1,3	1,2	1,4	1,4
	S	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
	O	8,5	7,7	6,7	7,8	7,0	7,1	7,6	7,3	7,9	9,0	8,5	8,2	8,7	8,4
Содержание макроэлементов в отходах углеобогащения, %	Fe ₂ O ₃	11,3	11,7	10,9	11,0	11,4	10,8	10,4	12,0	11,2	9,0	10,6	11,7	11,0	11,4
	SiO ₂	6,1	6,1	5,8	6,1	5,7	6,4	5,8	6,1	7,0	6,2	6,8	7,0	7,0	6,2
	Al ₂ O ₃	2,4	2,5	2,4	3,1	3,0	3,1	2,8	2,6	3,6	3,6	3,6	3,2	3,0	3,6
	CaO	1,6	1,4	1,4	1,2	1,7	1,4	1,8	1,8	1,6	1,5	1,9	1,7	1,8	1,2
	BaO	1,2	1,4	1,3	1,9	2,0	1,8	1,6	1,6	1,9	1,7	1,7	1,6	1,8	2,0
	SrO	0,8	1,0	1,4	0,9	1,1	0,6	1,3	1,1	0,9	0,8	1,3	1,2	0,8	0,6
	TiO	1,15	0,57	0,81	0,92	0,53	0,62	0,95	0,55	0,95	1,01	0,63	1,11	0,69	1,19
	K ₂ O	0,45	0,36	0,50	0,31	0,51	0,33	0,37	0,31	0,51	0,49	0,34	0,52	0,51	0,41
	Na ₂ O	0,46	0,37	0,42	0,34	0,51	0,39	0,43	0,42	0,50	0,34	0,51	0,41	0,50	0,42
	MgO	0,24	0,22	0,31	0,24	0,18	0,13	0,31	0,23	0,24	0,17	0,26	0,21	0,30	0,22
	MnO	0,16	0,07	0,14	0,12	0,09	0,07	0,16	0,10	0,07	0,15	0,15	0,13	0,07	0,10

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Сборочный чертёж испытательного стенда



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Сборочный чертеж пневматической форсунки

