

На правах рукописи

Сверчков Иван Павлович



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

Специальность 25.00.36 – Геоэкология
(в горно-перерабатывающей промышленности)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Пашкевич Мария Анатольевна

Официальные оппоненты:

Эпштейн Светлана Абрамовна

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра физики, профессор

Таловская Анна Валерьевна

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение геологии, доцент

Ведущая организация – НПК «Механобр-техника» (АО)

Защита состоится 25 сентября 2019 г. в 11 ч. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Санкт-Петербургского горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ДЕМЕНКОВ
Пётр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 объёма 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.

В связи с этим, **целью работы** является 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 работы:

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. Разработана технология утилизации отходов углеобогащения в виде топливных суспензий с получением наилучших энергетических и экологических характеристик при их сжигании.

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

3. Обоснована эколого-экономическая эффективность 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 конференции «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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность, основная цель, идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрено негативное влияние объектов размещения отходов обогащения угля на компоненты окружающей природной среды, а также проведен анализ основных существующих способов утилизации отходов углеобогащения.

Во **второй главе** проведено определение характеристик отходов углеобогащения для установления возможности их термической утилизации, а также проведены предварительные лабораторные исследования по установлению зависимости образования оксидов азота, оксидов серы и углеводородов от температуры сжигания.

В **третьей главе** изучено влияние параметров приготовления (гранулометрический состав, соотношение твердой и жидкой фаз, влияние добавок горючего компонента) и сжигания (температура, коэффициент избытка воздуха, размер капель суспензии после распыла) топливных водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения, на состав отходящих газов при их термической утилизации, и проведено сравнение количества выбросов

загрязняющих веществ при водоугольном и пылеугольном способах сжигания отходов обогащения угля.

Четвертая глава посвящена установлению возможности использования водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения в качестве топлива на котельной рассматриваемого предприятия, разработке аппаратного оформления мероприятия по утилизации отходов углеобогащения, а также обоснованию эколого-экономической эффективности.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

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.

Одним из ведущих предприятий по добыче угля открытым способом в Кемеровской области является АО «Междуречье». Обогащение добываемых на предприятии энергетических и коксующихся углей марок СС, ТР, ОС, КС и А осуществляется на ОФ «Междуреченская». В результате деятельности предприятия, ежегодно образуется свыше 950 тыс. тонн углесодержащих отходов (шлам, отсев, штыб и т.д.), которые накапливаются в земляном шламонакопителе. После удаления гравитационной воды, отходы вывозятся для размещения во внешний отвал. Сформированные таким образом техногенные объекты, являются источниками загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, почв, поверхностных и подземных вод. Помимо этого, высокое содержание тонкодисперсных угольных частиц в теле отвала приводит к увеличению вероятности их возгорания.

В настоящее время разработано большое количество возможных способов утилизации отходов углеобогащения – это брикетирование, газификация, пылеугольное сжигание и др., однако, приведенные способы не позволяют сразу перерабатывать образующиеся отходы и требуют предварительного удаления влаги. Одним из наиболее перспективных способов утилизации отходов обогащения угля на сегодняшний день является их использование в качестве сырья для

получения топливных суспензий. Данный способ позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, управлять процессом термической утилизации в широких диапазонах и перерабатывать отходы непосредственно после их образования, без взаимодействия с компонентами окружающей природной среды. Использование отходов переработки угля для получения топливных суспензий позволяет упростить и удешевить процесс приготовления топлива из-за отсутствия затрат на первичную подготовку топлива, связанную с помолом и сушкой, а также снизить выплаты предприятия за негативное воздействие на компоненты окружающей природной среды.

Горение водоугольных суспензий после распыления в разогретую топку котельного агрегата происходит следующим образом: из приповерхностного слоя капли происходит испарение воды, а также выделение из органической массы угля летучих компонентов. При достижении концентрации газообразных горючих веществ в окрестности капли критических значений, происходит их зажигание. Теплота, выделяющаяся при газофазном горении, прогревает коксовый остаток, его температура повышается и происходит возгорание углерода (рисунок 1). Из-за высокого содержания воды в составе суспензии (45 – 60 %), удельная теплота сгорания такого топлива невелика. По этой причине к содержанию летучих веществ, удельной теплоте сгорания и зольности углесодержащих отходов, используемых в качестве сырья для получения топливных суспензий, предъявляются особые требования. Согласно литературным источникам, зольность исходного сырья должна составлять не более 40 %, содержание летучих компонентов не менее 20 % и удельная теплота сгорания не менее 14 МДж/кг.

Для оценки возможности утилизации отходов углеобогащения в виде топливных суспензий, были отобраны пробы отходов из земляного шламонакопителя предприятия АО «Междуречье» в соответствии с ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03. Схема отбора проб представлена на рисунке 2.

Определение характеристик отходов углеобогащения проводилось на базе Центра коллективного пользования Горного университета. Анализ по определению зольности и выхода летучих веществ проводился при помощи термогравиметрического анализатора. Для этого навеска абсолютно сухой пробы помещалась в тигель, который нагревался до температуры 900 ± 5 °С и выдерживался в инертной

атмосфере в течении 7 мин. Для определения зольности та же проба выдерживалась при температуре 815 ± 10 °С в окислительной атмосфере до постоянной массы. Пересчет результатов на различные состояния топлива осуществлялся автоматически, при помощи программного обеспечения анализатора. Определение удельной теплоты сгорания производилось при помощи бомбового калориметра, при постоянном объеме. Для этого навеска аналитической пробы сжигалась в атмосфере кислорода. Выделяющееся тепло нагревало термостат с водой. По изменению температуры воды рассчитывалось количество выделившейся энергии. Расчёт высшей теплоты сгорания производился автоматически, а низшая теплота сгорания топлива рассчитывалась по формуле:

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

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

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

В таблице 1 представлены основные характеристики объединенной пробы отходов углеобогащения, а также нормативные документы, в соответствии с которыми проводилось их определение.

Таблица 1 – Основные характеристики отходов углеобогащения

| Характеристика | Значение | Нормативный документ |
|--|----------|----------------------|
| Зольность на сухое состояние, % | 29,9 | ГОСТ Р 53357-2009 |
| Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг | 17,5 | ГОСТ 147-2013 |
| Выход летучих на сухое беззольное состояние, % | 45,8 | ГОСТ Р 53357-2009 |
| Углерод, % | 56,8 | ГОСТ 32979-2014 |
| Водород, % | 3,5 | |
| Азот, % | 1,6 | |
| Сера, % | 0,3 | ГОСТ 32465-2013 |
| Кислород, % | 7,9 | ГОСТ Р 53355-2009 |

Как видно из таблицы 1, исследуемые отходы обогащения угля соответствуют приведенным выше требованиям и могут использоваться качестве сырья для получения топливных водоугольных суспензий.

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 $950^{\circ}\text{C} - 1050^{\circ}\text{C}$ и коэффициенте избытка воздуха $1,2 - 1,3$.

Для выбора параметров термической утилизации отходов, позволяющих сократить выбросы загрязняющих веществ, были определены основные характеристики приготовления и сжигания топливных суспензий, полученных из отходов углеобогащения (рисунок 3). Приведенные показатели позволяют управлять процессом термической утилизации и контролировать основные экологические и энергетические характеристики при сжигании.



Рисунок 3 – Основные параметры термической утилизации отходов углеобогащения

Исследование процесса термической утилизации отходов углеобогащения проводилось при помощи испытательного стенда с возможностью отбора газовых проб, регулировки и контроля подачи топлива, параметров распыла суспензии, расхода дутья и температуры сжигания. Схема стенда представлена на рисунке 4. Для определения параметров термической утилизации проводились эксперименты по факельному сжиганию водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения с регистрацией основных энергетических и экологических характеристик в зависимости от параметров приготовления и сжигания топливных суспензий.

Опыты проводились при следующих параметрах: средняя температура в топке $900 \pm 20^{\circ}\text{C}$, избыток воздуха 30 %, средний диаметр частиц отходов 47 мкм, массовое соотношение отходы углеобогащения / вода равно $40 / 60$, средний размер капель суспензии

при распылении 128 мкм. При выявлении зависимостей энергетических и экологических характеристик термической утилизации отдельно изменялись значения только одной из исследуемых характеристик при неизменных остальных параметрах.

Для приготовления топливных водоугольных суспензий, отходы углеобогащения измельчались до требуемого размера частиц и смешивались с водопроводной водой. Гомогенизация проводилась при помощи верхнеприводной мешалки при скорости вращения 500 об./мин в течение 5 мин.

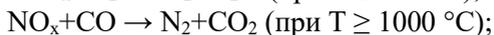
Приготовление органоводоугольных суспензий с добавкой отработанного масла проводилось в два этапа. На первом подготавливалась водомасляная эмульсия, для чего в лабораторном стакане в течение 3 мин. смешивались отработанное масло и вода. После этого в стакан добавлялись измельченные отходы углеобогащения. Длительность гомогенизации суспензии составляла 5 мин.

Основными параметрами приготовления топливных водоугольных суспензий являются гранулометрический состав исходного сырья и соотношение дисперсной фазы и дисперсионной среды (рисунок 3).

Крупность помола исходного сырья не является основной характеристикой, определяющей состав отходящих газов, однако в ходе экспериментов (рисунок 5) было установлено снижение количества загрязняющих веществ при увеличении среднего диаметра топливных частиц в составе суспензии. Это связано с увеличением коэффициента недожога топлива. При среднем диаметре частиц свыше 120 мкм, выгорание угольных частиц происходит не полностью. Это приводит к снижению энергетической эффективности топлива, а также усложняет использование золошлаковых отходов, образующихся после сжигания. Также степень помола влияет на седиментационную устойчивость топливных суспензий. В ходе экспериментов было выявлено, что суспензии со средним диаметром частиц менее 47 мкм, являются стабильными в течение длительного периода времени (рисунок 6).

Присутствие воды в составе топливных суспензий снижает температуру в зоне активного горения факела, что приводит к уменьшению количества образующихся оксидов азота и серы. Помимо этого, пары воды под действием высоких температур разлагаются на кислород и водород. При этом кислород, образовавшийся в ходе

реакции, интенсифицирует процесс горения, а водород способствует снижению количества оксидов азота и серы в отходящих газах:



Несмотря на это, 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, что негативно сказывается на топливных характеристиках получаемых суспензий. При проведении экспериментов было выявлено что наилучшие характеристики сжигания наблюдаются при содержании твердой части 55 – 60 масс. % (рисунок 7).

К основным параметрам сжигания топливных водоугольных суспензий относятся: температура сжигания, коэффициент избытка воздуха и размер капель суспензии при распылении (рисунок 3).

Температурный режим сжигания имеет определяющее влияние на состав отходящих газов, образующихся при сжигании суспензионных топлив. С ростом температуры в камере сгорания снижается количество углеводородов в составе отходящих газов. Это связано с более полным и быстрым окислением органических соединений при увеличении температуры. Однако рост температуры приводит к увеличению концентраций оксидов азота и серы в составе отходящих газов. При высоких температурах скорость протекания реакции окисления увеличивается, происходит интенсификация процесса взаимодействия серы топлива с кислородом дутья. Оксиды азота при горении топлив образуются из молекулярного азота воздуха и азотосодержащих компонентов топлива. Наименьшее суммарное количество удельной массы образования загрязняющих веществ наблюдается при температуре 950 – 1050 °C (рисунок 8).

Наряду с температурой, одним из основных показателей, определяющих состав отходящих газов является коэффициент избытка воздуха. 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 снижается количество канцерогенных ПАУ, таких как антрацен, пирен, бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен, нафталин и др. При сокращении в камере сгорания доли кислорода и

азота путем изменения расхода дутья, снижаются и объемы образующихся термических оксидов азота, однако регулирование образования оксидов азота путем изменения коэффициента избытка воздуха может интенсифицировать высокотемпературную сульфидную коррозию в топочной камере. При недостаточном содержании окислителя в топке, сжигание может происходить не полностью. Избыток воздуха свыше 20 % обеспечивает коэффициент недожога составляет менее 1 %. Из рисунка 9 видно, что наименьшее количество загрязняющих веществ в отходящих газах при сжигании топливных суспензий из отходов углеобогащения наблюдаются при коэффициенте избытка воздуха 10 – 20 %, однако из-за неполного сжигания топлива и возможных негативных последствий для котельного агрегата, коэффициент избытка воздуха был выбран в пределах от 1,2 до 1,3.

Степень распыления суспензии незначительно влияет на состав отходящих газов. Увеличение среднего размера капель при диспергации приводит к снижению удельной массы образования оксидов азота и серы. Это связано с тем, что при увеличении диаметра капли, требуется большее время на ее разогрев и воспламенение. Крупные капли при сжигании суспензий не успевают полностью прогорать, в результате чего увеличивается коэффициент недожога топлива. При распылении суспензии до капель диаметром менее 300 мкм недожог топлива не превышает 1 % (рисунок 10).

Таким образом, проведенные исследования позволили выбрать параметры термической утилизации отходов углеобогащения в виде водоугольных суспензий, при которых обеспечивается наименьшее количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

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.

В ходе проводимых экспериментов в качестве добавки использовалось отработанное моторное масло, поскольку оно имеет высокое значение удельной теплоты сгорания и образуются в значительных объемах в ходе деятельности горнодобывающих предприятий. При добавлении к топливным суспензиям 5 % отработанного моторного масла, состав отходящих газов меняется

незначительно в сравнении со сжиганием водоугольных суспензий (рисунок 11), однако упрощается их поджиг благодаря относительно низкой температуре воспламенения масла (менее 250 °С). Кроме того, при использовании добавки в виде отработанных минеральных масел значительно возрастает седиментационная устойчивость суспензий (рисунок 6). Поскольку топливные характеристики образующихся на предприятии отходов обогащения угля могут существенно отличаться даже в течении одной смены, то для стабильности горения и получения требуемых параметров, возможно их контролировать путем добавления отработанных минеральных масел.

В таблице 2 приведены удельные массы образования основных групп углеводородов в зависимости от способа сжигания. Наибольшее количество углеводородов образуется при пылеугольном сжигании отходов углеобогащения. При сжигании водоугольных и органоводоугольных суспензий количество зарегистрированных соединений и их массы примерно равны, 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.

Как видно из рисунка 12, при сжигании органоводоугольных суспензий состав отходящих газов изменяется незначительно в сравнении со сжиганием водоугольных суспензий. При пылеугольном способе сжигания удельная масса образования оксидов азота увеличивается на 95,4 %, оксидов серы – на 77,8 %, суммы углеводородов – на 45,8 % в сравнении со сжиганием водоугольных суспензий.

Для установления возможности замены угля, используемого котельной предприятия в настоящее время, на сжигание водоугольных суспензий, полученных из отходов углеобогащения, был произведен тепловой расчет имеющегося на предприятии котельного агрегата ДКВр-10-13. Исходя из полученных в результате расчета данных можно сделать вывод, что котельная предприятия может быть использована для термической утилизации отходов обогащения угля. При этом КПД работы котлоагрегата составит 80,1 %. Также в ходе расчетов было установлено, что при сжигании органоводоугольных суспензий при номинальной производительности и заданных параметрах перегретого пара, не происходит нарушения технологических характеристик работы котла. Проведенные расчеты

показывают, что работа котельного агрегата на органоводугольном топливе возможна без модернизации поверхностей нагрева с незначительным снижением производительности.

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 13 представлена предлагаемая схема утилизации отходов обогащения угля.

Утилизация отходов углеобогащения должна происходить следующим образом: отходы углеобогащения влажностью 30 – 35 % и диаметром частиц менее 3 мм поступают в приемный бункер, откуда при помощи шнекового питателя они подаются в дезинтегратор мокрого помола, где происходит их измельчение. Раздробленная до размеров менее 120 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 горючее может подаваться сразу на стадию утилизации, а может отправляться в обогреваемый бак запаса, обеспечивающий объем топлива, необходимый для одного дня работы котельной. Сжигание полученных суспензий должно осуществляться в котельном агрегате. Для этого топливная суспензия при помощи перистальтического насоса перекачивается к соплам пневматических форсунок, куда также подается сжатый воздух для распыления топлива. Суспензия сгорает в топочной камере с температурой в зоне активного горения 950 – 1050 °С, при коэффициенте избытка воздуха 1,2 – 1,3.

Сравнение затрат на топливо до и после внедрения предлагаемого мероприятия по утилизации отходов углеобогащения представлено в таблице 3. Смена топлива позволит ежегодно экономить предприятию свыше 4 млн руб.

В таблице 4 представлены суммарные капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение разработанного природоохранного мероприятия по утилизации отходов углеобогащения. Внедрения такого мероприятия приведет к снижению платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух и за складирование отходов, а также к сокращению потребления угля котельной предприятия. Срок окупаемости составит 3,9 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлены значения основных топливно-энергетических характеристик отходов обогащения угля (зольность, содержание летучих компонентов, удельная теплота сгорания, концентрация горючих элементов и др.), значения которых позволяют использовать рассматривать данный вид отходов как сырьё для получения топливных суспензий, пригодных для дальнейшей термической утилизации на энергогенерирующих объектах.

2. Спроектирован и изготовлен испытательный стенд для моделирования процесса термической утилизации отходов углеобогащения, позволяющий выполнять отбор проб отходящих газов, регулировку и контроль подачи топлива, параметров распыла суспензии, расхода дутья и температуры сжигания.

3. В ходе укрупненных лабораторных испытаний определены параметры приготовления и сжигания топливных суспензий, полученных из отходов обогащения угля, обеспечивающие снижение количества загрязняющих веществ в отходящих газах по сравнению с их пылеугольным сжиганием: оксидов азота – до 48,8 %, оксидов серы – до 43,7 % и суммы углеводородов – до 31,4%.

4. На основании экспериментальных исследований предложена принципиальная технологическая схема утилизации отходов углеобогащения, включающая в себя стадии по измельчению, гомогенизации, транспортированию, накоплению и сжиганию получаемых топливных суспензий.

5. На основании эколого-экономических расчетов, определен срок окупаемости природоохранного мероприятия с учетом капитальных и эксплуатационных затрат на внедрение разработанных природоохранных мероприятий, составляющий 3,9 года.

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.

2. Сверчков И.П. Перспективы использования отходов углеобогащения // Материалы научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» ч. 2, СПб: изд. Политехнического университета, 2015. С 206-208.

3. 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.

4. 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

5. 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.

6. 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.

7. 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 – 434.

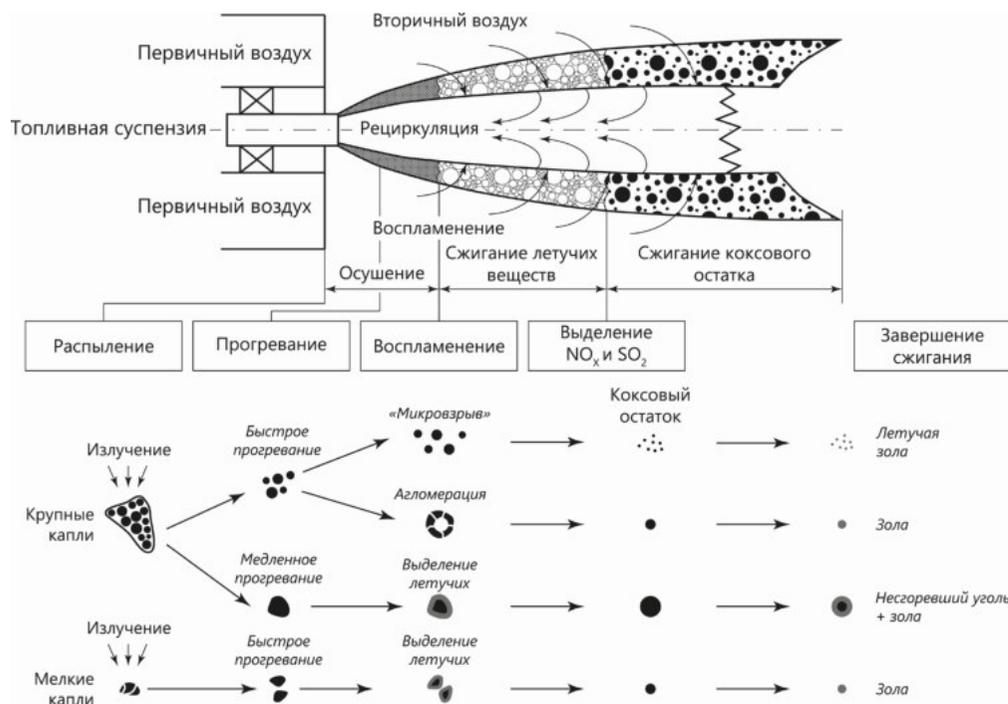


Рисунок 1 – Горение водоугольного топлива при факельном сжигании

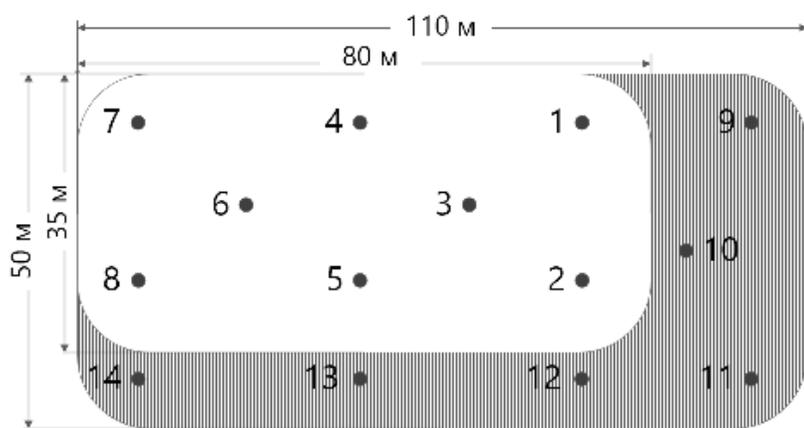


Рисунок 2 – Схема отбора проб отходов углеобогащения

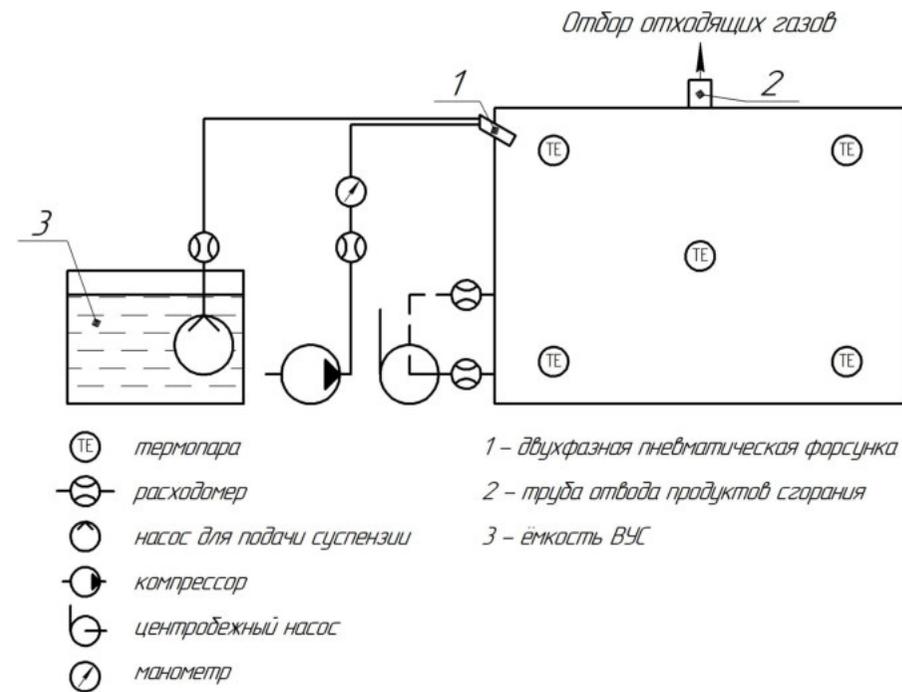


Рисунок 4 – Схема установки по сжиганию топливных водоугольных суспензий в факеле

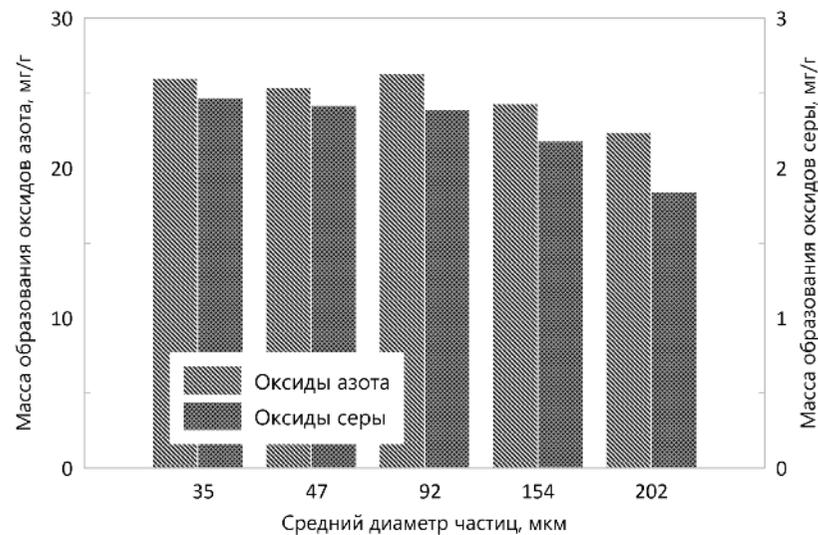


Рисунок 5 – Влияние крупности помола исходного топлива на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

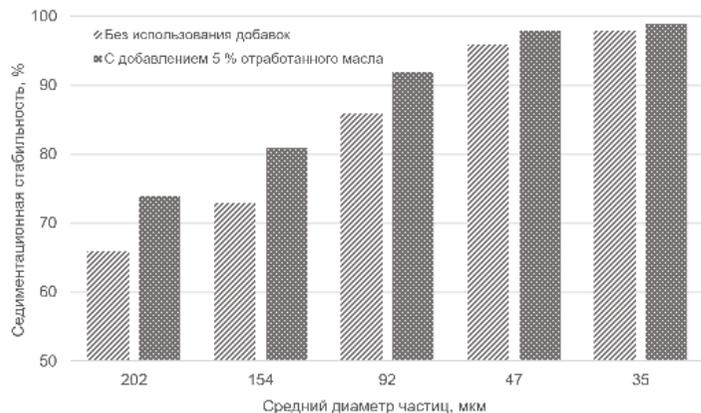


Рисунок 6 – Седиментационная стабильность суспензий с частицами различной степени помола спустя 7 дней эксперимента

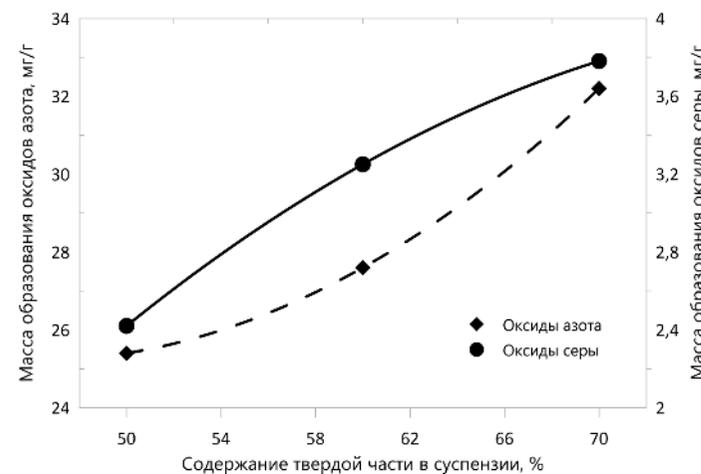


Рисунок 7 – Влияние содержания твердой фазы на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

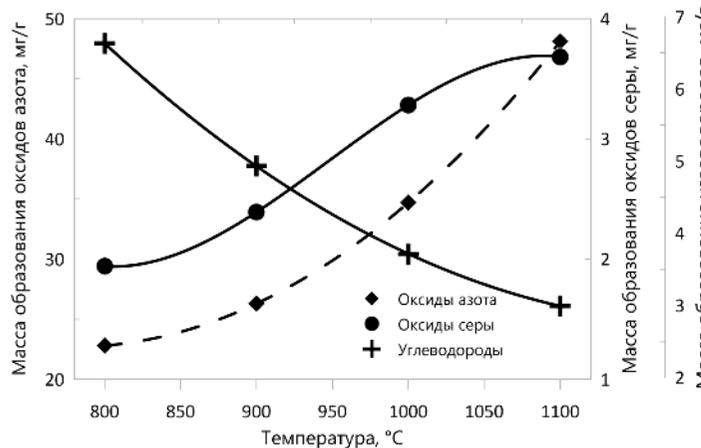


Рисунок 8 – Влияние температуры в камере сгорания на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

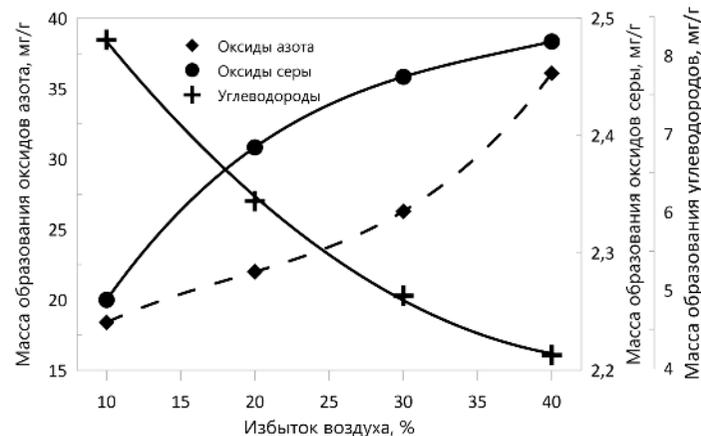


Рисунок 9 – Влияние избытка воздуха на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

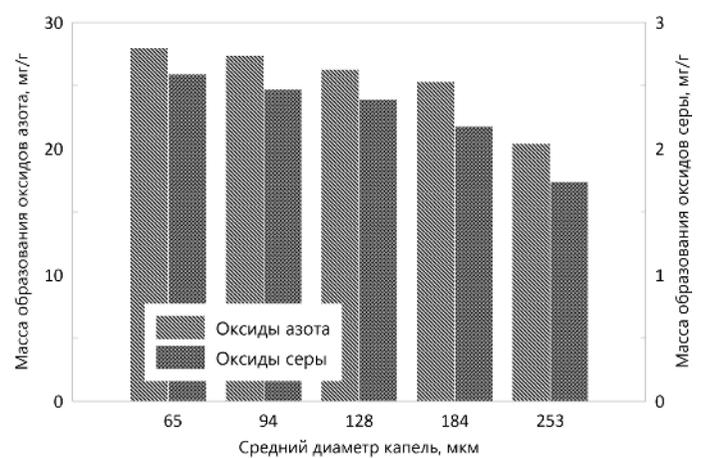


Рисунок 10 – Влияние степени распыла суспензии на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

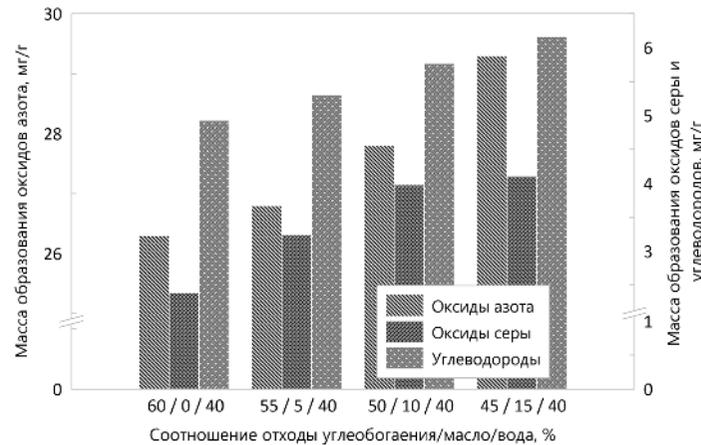


Рисунок 11 – Влияние содержания отработанного моторного масла на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

Таблица 2 – Удельная масса образования углеводородов в зависимости от применяемого способа сжигания отходов углеобогащения, мг/г

| Группа соединений | Параметры сжигания | | |
|--|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | Водоугольные суспензии | Органоугольные 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 |

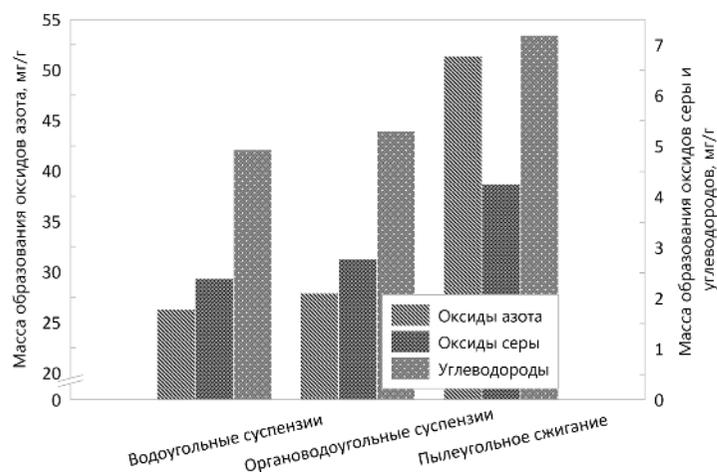


Рисунок 12 – Влияние способа сжигания на удельную массу образования загрязняющих веществ при термической утилизации

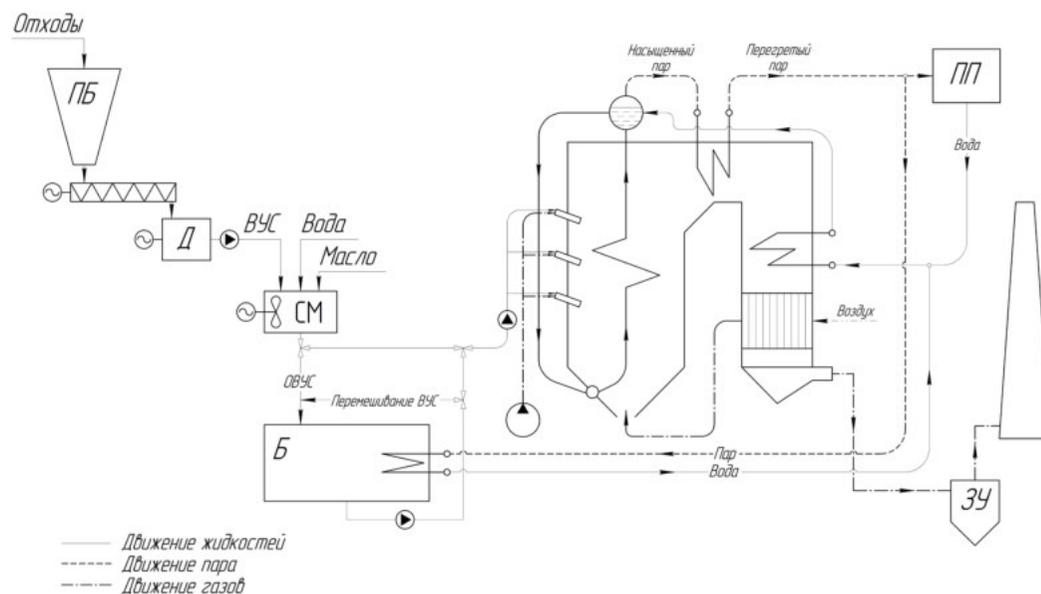


Рисунок 13 – Схема утилизации отходов углеобогащения (ПБ – приемный бункер; Д – дезинтегратор; СМ – смеситель (гомогенизатор); Б – бак запаса ВУС; ЗУ – золоуловитель; ПП – потребитель пара)

Таблица 3 – Сравнение стоимости угля и водоугольного топлива.

| Топливо | Уголь | 5 % Уголь | 95 % ВУС |
|---|---------|-----------|----------|
| 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 | | |

Таблица 4 – Капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение разработанного водоохранного мероприятия

| 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 |