

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»  
(наименование кафедры полностью)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему: «Оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической  
переработки ТКО»

Обучающийся

И.А. Квасова  
(Инициалы, Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.х.н., С.А. Соков  
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

## **Аннотация**

Выпускная квалификационная работа посвящена оптимизации технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО для снижения воздействия на окружающую среду. Актуальность темы обусловлена образованием вредных дымовых газов при термической переработке органических отходов, в частности ТКО, и необходимостью разработки эффективных мероприятий по их утилизации и очистке для минимизации воздействия на окружающую среду.

Целью работы является оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО для снижения воздействия на окружающую среду.

В рамках поставленной цели были решены следующие задачи: проведен литературный обзор в области использования технологий по термической переработке ТКО и способах очистки дымовых газов, предложена оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО, составлен материальный баланс оптимизированной технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО, проведено эколого-экономическое обоснование предложенной технологии.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем пояснительной записки составляет 43 страницы, включая 7 таблиц, 6 рисунков и 26 источников в списке литературы.

## **Abstract**

The final qualifying work is devoted to optimizing the technology of flue gas purification during thermal processing of MSW to reduce the impact on the environment. The relevance of the topic is due to the formation of harmful flue gases during the thermal processing of organic waste, in particular MSW, and the need to develop effective measures for their disposal and purification to minimize the impact on the environment.

The aim of the work is to optimize the flue gas purification technology during the thermal processing of MSW to reduce the environmental impact.

Within the framework of this goal, the following tasks were solved: a literature review was conducted in the field of using technologies for thermal processing of MSW and flue gas purification methods, optimization of flue gas purification technology for thermal processing of MSW was proposed, a material balance of optimized flue gas purification technology for thermal processing of MSW was compiled, an ecological and economic justification of the proposed technology was carried out.

The work consists of an introduction, three chapters, a conclusion, and a list of references. The total volume of the explanatory note is 43 pages, including 7 tables, 6 figures and 26 sources in the list of references.

## Содержание

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                                     | 3  |
| 1 Литературный обзор.....                                                                                                                         | 5  |
| 1.1 Проблемы загрязнения атмосферного воздуха при термической переработке ТКО.....                                                                | 5  |
| 1.2 Патентный поиск и литературный обзор в области использования технологий по термическим переработкам ТКО и способам очистки дымовых газов..... | 8  |
| 1.3 Выбор и обоснование технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО.....                                                     | 13 |
| 2 Оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО.....                                                               | 20 |
| 2.1 Описание и анализ технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО.....                                                       | 20 |
| 2.2 Требования к составу и количественным характеристикам дымовых газов при термической переработке ТКО.....                                      | 24 |
| 2.3 Предложение оптимизации технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО.....                                                 | 25 |
| 2.4 Технологический расчет скруббера до и после модернизации.....                                                                                 | 27 |
| 2.5 Эколого-экономическое обоснование предложенной технологии.....                                                                                | 34 |
| Заключение .....                                                                                                                                  | 39 |
| Список используемой литературы.....                                                                                                               | 40 |

## Введение

Источниками образования отходов, содержащих в своем составе органических вещества, является как жизнедеятельность населения, так и производственная и административно-хозяйственная деятельность предприятий.

В практике утилизации и обезвреживания отходов, содержащих органические вещества, нашли широкое применение три основных метода термического воздействия.

В связи с этим актуальность разработки мероприятий по утилизации и очистки дымовых газов при переработке ТКО очень велика.

Цель бакалаврской работы – оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО для снижения воздействия на окружающую среду

Задачи бакалаврской работы:

- ~ провести литературный обзор в области использования технологий по термической переработки ТКО и способах очистки дымовых газов;
- ~ предложить оптимизацию технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО;
- ~ составить материальный баланс оптимизированной технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО;
- ~ провести эколого-экономическое обоснование предложенной технологии.

Объектом исследования является термический способ утилизации ТКО.

Предметом исследования – процесс очистки отходящих газов после переработки ТКО.

## **1 Литературный обзор**

### **1.1 Проблемы загрязнения атмосферного воздуха при термической переработке ТКО**

Управление твердыми коммунальными отходами стало серьезной проблемой в городских районах развивающихся стран из-за урбанизации и индустриализации. Это становится все большей угрозой для живых организмов и окружающей среды. По оценкам, в мире производится 2,6 миллиона тонн твердых коммунальных и бытовых отходов в день, а к 2050 году это количество может достичь 4,5 миллионов тонн в день [1].

Неправильная и несвоевременная деятельность управления твердыми коммунальными отходами может ухудшить качество воздуха, почвы и воды, поскольку максимальное количество биоты поступает по пищевой цепи или попадает в организм через носовую полость. Управление твердыми отходами связано с контролем их производства, сбора и хранения и, наконец, их транспортировкой на места захоронения с соблюдением основных правил экологии.

Сжигание твердых коммунальных отходов на сегодняшний день самый эффективный метод для утилизации.

Сжигание твердых коммунальных отходов является распространенной практикой из-за удобства и небольших финансовых затрат, но такой процесс влечет за собой выброс загрязняющих веществ, образование парниковых газов, тяжелых металлов и летучих органических соединений.

Процесс термической утилизации твёрдых коммунальных отходов (ТКО) предполагает строгое соблюдение температурного режима, обеспечивающего полное разрушение органических соединений и минимизацию вторичных выбросов в окружающую среду. Согласно установленной практике и техническим регламентам, сжигание ТКО должно осуществляться при температурных значениях, варьирующихся в пределах

1000–1200 °С. Именно данный интервал температур является критическим для обеспечения полной минерализации органической компоненты, входящей в состав твердых бытовых фракций, и предупреждения образования устойчивых органических токсикантов [2].

Нарушение температурного режима, в частности осуществление сжигания при температурах ниже 1000 °С, сопряжено с высоким экологическим риском и способствует интенсификации процессов неполного окисления. Это приводит к формированию широкого спектра опасных химических соединений, включая монооксид углерода (СО), диоксид углерода (СО<sub>2</sub>), метан (СН<sub>4</sub>), формальдегид и другие летучие органические соединения (ЛОС), способных к дальнейшему вторичному загрязнению воздушной среды.

Анализ эмпирических данных и литературных источников указывает на наличие превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) данных веществ в районах, прилегающих к объектам неэффективной термической утилизации. В частности, в исследованиях [7], проведённых вблизи установок, работающих при температуре ниже 1000 °С, была зафиксирована аномально высокая концентрация оксида углерода, метана и других продуктов неполного сгорания, что свидетельствует о нарушении санитарно-гигиенических нормативов и необходимости ужесточения технологического контроля.

Выбросы таких парниковых газов как углекислый газ, метан, оксид углерода, оксид азота очень опасны, вызывая глобальное потепление. Среди них метан является мощным парниковым газом, имеющим в 25 раз больший потенциал глобального потепления, чем углекислый газ, и ежегодно его концентрация увеличивается (1–2 %) [3].

Сжигание твердых коммунальных отходов органического содержания приводит к образованию выбросов представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Наименование выбросов и их коэффициенты

| Наименование выбросов            | Коэффициент выбросов |
|----------------------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub> (углекислый газ) | 40                   |
| CH <sub>4</sub> (метан)          | 50                   |
| N <sub>2</sub> O (окись азота)   | 20                   |

На сегодняшний день для экологии данный метод вытесняется новыми технологиями и модернизациями на производствах, где выстроен процесс термической утилизации отходов.

Так же выбросы твердых коммунальных отходов оказывают негативное воздействие на здоровье населения и окружающую среду. Они попадают в организм человека при вдыхании, проникают в легкие и вызывают различные заболевания, такие как легочные и сердечно-сосудистые заболевания, желудочно-кишечные заболевания, астма и преждевременные роды.

В целом рассматривая процесс термической переработки отходов можно сказать, что данный метод представляет собой несколько процессов, в совокупности позволяющих избавиться от любого токсичного отхода или максимально свести к минимуму их объем и массу [4,5].

«Проблемы, возникающие при термической утилизации твердых коммунальных отходов, требует особое внимание и регулировании политики управления отходами на государственном уровне и сертификации защиты населения и окружающей среды.

Для урегулирования такой проблемы как, превышения ПДК загрязняющих веществ при сжигании твердых коммунальных отходов существует ряд решений, одно из них заключается в рекуперации выбросов в процессе переработки отходов. В настоящей работе будут рассмотрены технологический процесс, и схема, в которой будет внедрена линия рекуперации, способствующая уменьшению количеству образующих выбросов» [10].

## **1.2 Патентный поиск и литературный обзор в области использования технологий по термические переработки ТКО и способах очистки дымовых газов**

Для улучшения процесса термической переработки ТКО и способов очистки дымовых газов был произведен анализ патентного ведомства и научных журналов РФ. Вся информация содержится в таблице 2.

Таблица 2 – Утвержденные патенты в области технологий переработки ТКО

| Номер Патента  | Наименование                                                                                                                 | Обладатель патента  | Изобретатель        | Описание патента                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1              | 2                                                                                                                            | 3                   | 4                   | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| № 2654664 РФ   | Способ термической переработки и утилизации углеродосодержащих веществ для эффективного повышения экологической безопасности | ООО «Новая энергия» | ООО «Новая энергия» | Патент относится к области термической переработки и утилизации веществ, содержащих углеводородные компоненты. Утилизация отходов осуществляется при давлении в газовом тракте ниже атмосферного с последующим удалением продуктов сгорания в атмосферу посредством компрессора. |
| № 2111057С1 РФ | Способ утилизации отходов                                                                                                    | Марков В.С          | Марков В.С          | Термическая утилизация отходов при котором получают жидкий азот в воздухоразделительной установки, используемый для охлаждения отходов тем самым уменьшая себестоимость процесса и снижая количество вредных выбросов в атмосферу.                                               |

Продолжение таблицы 2

| Номер Патента | Наименование                                                                                                                          | Обладатель патента | Изобретатель                          | Описание патента                                                                                                                                                                                |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1             | 2                                                                                                                                     | 3                  | 4                                     | 5                                                                                                                                                                                               |
| №91409U1 РФ   | Установка для термической переработки твердых бытовых отходов                                                                         | ООО «МПК-Сервис»   | Кобзов А.Н, Кобзов А.А, Буданова М.А. | Разработка установки для термической переработки твердых отходов, позволяющая обеспечить полную экологическую безопасность и полную безотходность технологического процесса переработки отходов |
| № 2666559 РФ  | Установка для термической переработки отходов                                                                                         | Чернин С.Я         | Чернин С.Я                            | Разработка новой установки для термической переработки отходов с целью повышения эффективности обеззараживания опасных отходов.                                                                 |
| № 2353856 РФ  | Способ термической переработки бытовых и промышленных отходов и устройство для термической переработки бытовых и промышленных отходов | Кокарев В.А        | Кокарев В.А                           | Изобретение описывает термическую переработку промышленных отходов методом пиролиза без выброса вредных веществ в окружающую среду.                                                             |

Патентное изобретение № 2654664 РФ включает в себя описание новой технологии переработки отходов при давлении в газовом тракте ниже атмосферного, продукты сгорания удаляются с помощью компрессора. По сравнению с другими патентными изобретениями в данной области данный патент является наиболее эффективным в плане переработки и утилизации углеродосодержащих веществ, что дает высокую экологическую безопасность. При реализации данной технологической схемы коэффициенты выбросов составят значениям представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты выбросов при реализации патентного изобретения №265464

| Наименование выбросов            | Коэффициент выбросов |
|----------------------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub> (углекислый газ) | 30                   |
| CH <sub>4</sub> (метан)          | 30                   |
| N <sub>2</sub> O (окись азота)   | 15                   |

«Среди инновационных подходов, направленных на оптимизацию процессов утилизации отходов, заслуживает особого внимания решение, представленное в патенте Российской Федерации № 2111057С1. В данном изобретении предложен технологически обоснованный способ предварительной подготовки отходов к термической переработке посредством их глубокой криогенной обработки – охлаждения с использованием жидкого азота, синтезируемого на базе воздухоразделительной установки» [10].

Применение данного метода позволяет существенно повысить термодинамическую эффективность утилизационного цикла за счёт рационального использования вторичных энергетических потоков. Принципиальное отличие данной технологии заключается в том, что энергия, затрачиваемая на производство холода, компенсируется за счёт более эффективного разрушения структуры органических веществ при последующем сжигании, что в совокупности снижает общие энергозатраты и повышает рентабельность процесса переработки.

В отличие от традиционных методов, не предусматривающих этап криогенного воздействия, рассматриваемая технология демонстрирует снижение себестоимости утилизации отходов, в том числе за счёт минимизации износа оборудования, стабилизации параметров сжигания и улучшения экологических характеристик выбросов. Эффект достигается за счёт структурной деструкции молекул и предварительного разрушения сложных органических полимеров, что облегчает их последующую минерализацию на стадии высокотемпературного окисления.

Патентное изобретение №91409U1 РФ включает в себя разработку установки для термической переработки твердых отходов. Известные

установки, используемые при переработке отходов, имеют следующие недостатки:

- ~ большие площади;
- ~ не эффективность шлакоприёмники и его обогрев;
- ~ отходящие газы не подвергаются нейтрализации.

Результатом патентного изобретения №91409U1 РФ послужила конструкция, которая будет содержать приемно-разгрузочное устройство, последовательно расположенные мусоросжигательные котлы, двухступенчатую газоочистную систему, котел-утилизатор, фильтр для улавливания паров, плавильное отделение, котел утилизатор. Данная спецификация конструкции позволит уменьшить концентрацию выбросов и повысить экологическую безопасность (таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты выбросов при реализации патентного изобретения №91409U1

| Наименование выбросов            | Коэффициент выбросов |
|----------------------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub> (углекислый газ) | 35                   |
| CH <sub>4</sub> (метан)          | 40                   |
| N <sub>2</sub> O (окись азота)   | 20                   |

Патент РФ № 2666559 представляет собой усовершенствованную установку для термической переработки ТКО, включающую функционально завершённую цепочку оборудования. Конструкция охватывает: узел подачи отходов, реактор термолизной деструкции, основную камеру сжигания, узел транспортировки и удаления дымовых газов, камеру сжигания парогазовой смеси и камеру дожигания.

Реактор термолиза обеспечивает первичное разложение органических фракций с образованием парогазовой смеси и твёрдого остатка. Последующее многоступенчатое окисление в камерах сжигания и дожигания способствует полному обезвреживанию токсичных соединений и снижению выбросов. Комплексная схема обеспечивает высокую экологическую и энергетическую эффективность, а также может быть адаптирована к различному

морфологическому составу ТКО [6].

Данная установка позволяет эффективно обеззараживать органические, нефтесодержащие отходы, данные по выбросам представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты выбросов при реализации патентного изобретения № 2666559

| Наименование выбросов            | Коэффициент выбросов |
|----------------------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub> (углекислый газ) | 15                   |
| CH <sub>4</sub> (метан)          | 20                   |
| N <sub>2</sub> O (окись азота)   | 10                   |

В дальнейшем при написании работы основное внимание будет направлено на патентное изобретение № 2666559 РФ рассматриваемое конструкцию установки для термической переработки твердых коммунальных отходов и очистки парогазовой смеси.

Технологическая схема, отображенная в данном патенте, имеет не сложное оформление и самые эффективные показатели по очистке дымовых газов, образующихся после переработки ТКО. Эффективность очистки при реализации данной технологической схемы представлена в виде таблицы 5 где показаны коэффициенты выбросов. При сравнении со средними показателями выбросов при переработке ТКО эффективность очистки по углекислому газу увеличится на 37,5 %, по метану на 40 %, по оксиду азота на 50 % [10]. – «Сравнение показателей коэффициентов выбросов 3-5 таблиц со стандартными таблица 1, отсюда и приходим к выводу что в дальнейшем рассматриваем патент, выбранный выше и производим расчеты для скруббера» [7].

### **1.3 Выбор и обоснование технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО**

Одним из наиболее востребованных методов термодеструкции в химических технологиях выступает процесс сжигания, также известный как огневой метод. Его активно используют для обработки и нейтрализации различных видов отходов, будь то жидкие, твёрдые или пастообразные материалы. Основные задачи этого метода можно разделить на два ключевых направления.

Первое направление связано с обезвреживанием отходов. Здесь речь идёт об уменьшении их объёма, изменении состава и трансформации физико-химических характеристик для минимизации вредного воздействия на окружающую среду и здоровье людей. Такой подход направлен на снижение экологической угрозы, которая может возникнуть в случае неправильной утилизации отходов [8.9].

Второе направление заключается в переработке отходов с целью извлечения энергии, образующейся при их термическом разрушении. Это позволяет конвертировать материальные остатки в энергию полезного назначения, что одновременно способствует экономической выгоде и снижению нагрузки на экологию.

Для визуализации этих процессов применяются блок-схемы, отражающие различные аспекты задач: обезвреживание материалов и получение энергии из них.

На рисунках 1 и 2 представлены графические схемы данных подходов к целеполаганию процесса сжигания отходов.

Процесс сжигания твердых отходов остается одной из наиболее востребованных технологий в области термической переработки, что объясняется его универсальной применимостью, стабильной эксплуатацией и высокой результативностью по сравнению с другими методами.

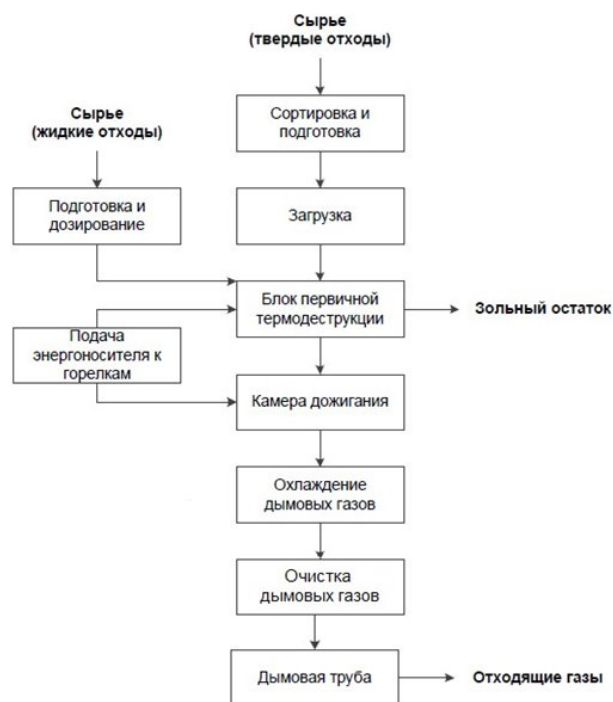


Рисунок 1 - Общая схема сжигания отходов с целью обезвреживания

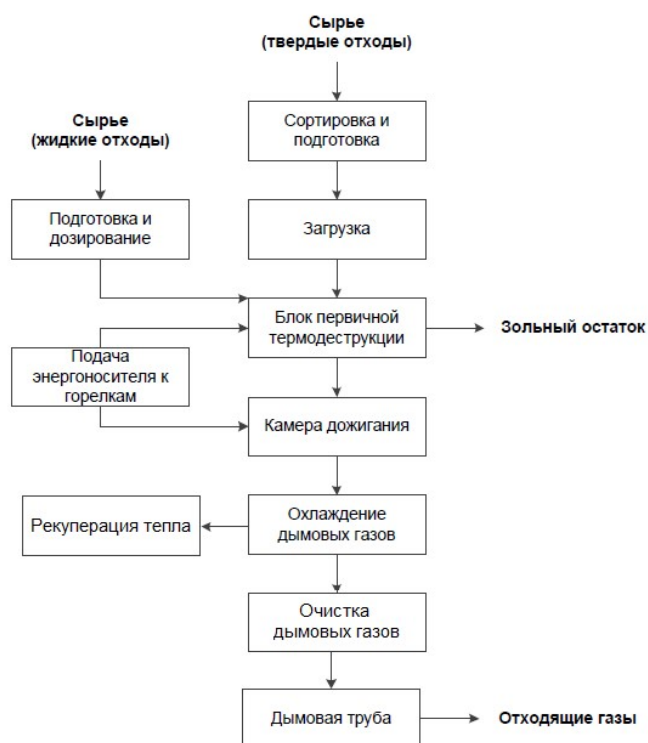


Рисунок 2 - Общая схема сжигания отходов с целью получения различных видов энергии

В зависимости от состава исходных материалов, а также особенностей

оборудования, выделяют несколько типов термического уничтожения отходов, каждый из которых отличается своей технологической спецификой. На основании мирового опыта классификация методов сжигания разделяется на пять основных категорий; каждая группа характеризуется определенными технологическими процессами и использованием специализированного оборудования [11].

Сжигание смешанных коммунальных отходов. Этот подход предполагает переработку бытовых остатков населения без предварительной сортировки или обработки. Такие материалы обычно включают как органические соединения, так и неорганические вещества. Иногда возможно их совместное уничтожение с промышленными остатками для повышения общей эффективности процесса утилизации.

Сжигание предварительно обработанных материалов. Данный метод основан на подготовке сырья перед его термическим уничтожением: это может быть сортировка или другая обработка для улучшения теплотворных характеристик материала. Такой способ чаще применяется к отходам раздельного сбора, что позволяет повысить энергетическую эффективность процесса и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу.

Термическая переработка опасных материалов. Уничтожение токсичных остатков осуществляется исключительно на специализированных объектах или установках промышленного назначения. Из-за потенциальной угрозы окружающей среде такие материалы требуют особого подхода – начиная от выбора метода переработки до строгого контроля за выбросами загрязняющих веществ [12].

Утилизация осадков сточных вод через сжигание. Остаточные продукты очистки сточных вод могут быть подвергнуты термической обработке на специально предназначенных установках для снижения воздействия на природу. Эти установки часто позволяют обрабатывать одновременно разные типы отходов (например, коммунальные), что способствует экономии ресурсов и повышению общей эффективности утилизационной системы.

Сожжение медицинских остатков. Материалы здравоохранения – использованные инструменты, биологически активные компоненты и прочее – представляют значительный риск как для экологии, так и для здоровья человека; их ликвидация требует применения узкоспециализированного оборудования высокого уровня надежности. Подобные технологии гарантируют устранение патогенных микроорганизмов и снижение вероятности их распространения [26,27].

В зависимости от типа обрабатываемых веществ могут применяться дополнительные этапы подготовки: это может включать использование фильтров тонкой очистки либо других систем сокращения вредоносных выбросов в атмосферу при реализации процесса утилизации методом горения.

«Конверсионные технологии», «химическая конверсия» и большинство форм процессов «усовершенствованной переработки» и «химической переработки» не являются реальными методами переработки.

Говоря о процессе сжигания, можно сказать, что он идет ненадлежащим и неэффективным образом используя смешанные твердые бытовые отходы в качестве сырья для мусоросжигательных заводов или печей замедленного сжигания (например, пиролиз и другие «технологии конверсии», которые создают синтетический газ, который позже сжигается).

Для каждого типа материала в твердых бытовых отходах существует экологически оптимальный путь утилизации/переработки (то есть наиболее эффективный). устойчивый способ выбрасывания и переработки), который почти всегда представляет собой переработку. Сюда входит традиционная механическая переработка, а также переработка органических веществ, такая как компостирование или анаэробное сбраживание.

На рисунке 3 изображена технологическая схема сжигания и переработка твердых коммунальных отходов рассматриваемого нами патентного изобретения.



функциональный элемент в виде смесителя (позиция 2) допускается исключить из схемы без нарушения технологической целостности процесса.

«Камера высокотемпературного сжигания твёрдых остатков термолиза (позиция 10) сконфигурирована с загрузочным модулем (позиция 8), сопряжённым посредством шнекового транспортера с выгрузочным узлом золоприемника (позиция 23), и оснащена автономным горелочным устройством (позиция 5). Дополнительно, в переднюю часть камеры инжектируется реагентная смесь, подаваемая по специально выделенной технологической линии, включающей станцию приготовления реагентов (позиция 22) и дозирующий насос (позиция 21). Отработанные газы из камеры 10 направляются в нижнюю часть камеры дожигания пирогазов и остаточных твёрдых включений (позиция 13), которая, в свою очередь, соединена через гидрозатвор (позиция 9) с верхней частью реактора термолизной деструкции (позиция 6), обеспечивая тем самым замкнутый газодинамический цикл» [13].

Финальная стадия включает в себя узел удаления и глубокой очистки дымовых газов, в состав которого входят: инжекционный форсуночный скруббер (позиция 14) для химической нейтрализации кислотных компонентов, батарейный циклон-пылеуловитель (позиция 15) для инерционного осаждения механических фракций и рукавный фильтр (позиция 16), обеспечивающий тонкую фильтрацию остаточных аэрозольных включений [15,16].

Ключевым технологическим ограничением данной схемы является отсутствие узла рекуперации тепловой энергии дымовых газов, что существенно снижает общую энергетическую эффективность процесса термической переработки ТКО.

При введении данного процесса в технологическую схему возможно увеличение производительности агрегата, что приведет за собой улучшенную переработку ТКО и дымовых газов. Линия рекуперации будет вводиться на стадии выхода дымовых газов и скруббера, через который будет проходить повторная очистка [17].

## 2 Оптимизация технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО

### 2.1 Описание и анализ технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО

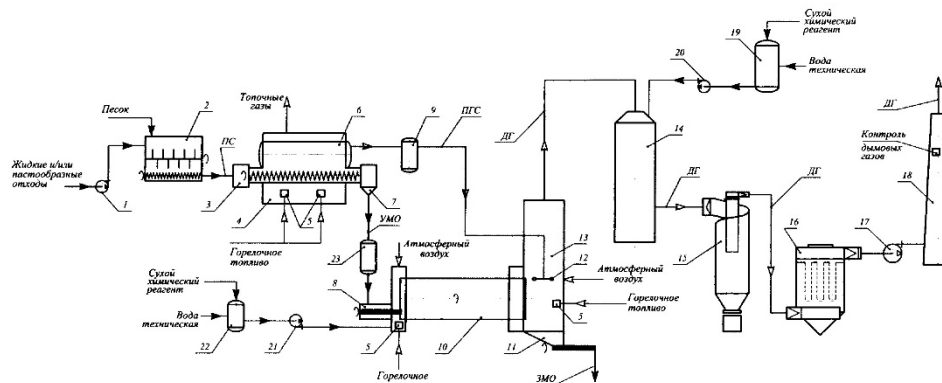


Рисунок 4 – Технологическая схема очистки газов и переработки ТКО

При описании технологической схемы очистки дымовых газов при термической переработке ТКО за основу взято патентное изобретение № 2666559. Эффективность и актуальность данного процесса описывается ранее в 1 главе бакалаврской работы.

Согласное представленной на рисунке 4 технологической схеме термическая переработка твердых коммунальных отходов описывается следующим образом.

Твердые коммунальные отходы в различном агрегатном состоянии поступают на насосное оборудование 1 после чего попадают в смеситель лопаточного типа 2, режим работы смесителя непрерывный. В смеситель 2 параллельно из шнекового транспортера поступает определенное количества

песка или зольных остатков (ЗМО). Песок или зольные остатки получают в ходе сжигания, термической деструкции, в камере 10. Подача данных материалов контролируется и регулируется с помощью частотного преобразователя электропривода. Контроль на данной этапе позволяет добиться смешения 1 к 0,8 [18].

Добавление песка к твердым коммунальным отходам гарантирует улучшение физико-химических, теплофизических, механических свойств при дальнейшей обработке, термической деструкции.

Полученный отход благодаря перемешиванию компонентов с помощью шнека поступает в герметичную конструкцию 3 реактора 6 где протекает процесс термолиз. «Оборудование 6 где протекает термолиз состоит из горизонтальной герметичной камеры, в которую включены двухваловые шнековые транспортеры.

Такое оформление оборудования и наличие шнекового транспортера позволяют перемещать переработанные компоненты внутри реактора 6, при этом компоновка отходов происходит строго определенного порядка с распределением тонкого слоя по теплопередающей поверхности. Распределение по слоям отходов позволяет равномерно подводить тепло на поверхности, а также регулировать вращение шнека и изменять производительность реактора 6» [13].

Агрегат 6 имеет в своем составе герметичный шлюзовой узел загрузки 3 отходов и выгрузки 7 углерод-минерального остатка (УМО). Реактор 6 оснащен топочным устройством, которое позволяет быстро его разогревать с помощью горелочных устройств 5. В реакторе 6 протекает конвективный нагрев с ограниченным поступлением кислорода и температурой 300-500 °С. «При данных условиях происходит испарение и деструкция органических соединений, входящие в состав твердых коммунальных отходов. Весь термический процесс нагрева происходит равномерно и плавно за счет вращения шнека в камере. Параметры давления при термолизе, протекающем в реакторе 6 должны не выходить за 5-6 кПа. Давление регулируется за счет

измерения расхода горелочного топлива, который подается в устройство 5.

В процессе термолиза протекающий в реакторе 6 образуется твердый УМО, который поступает в закрытый золоприемник 23. После золоприемника твердый УМО подается с помощью шнека на загрузочное устройство 8 камеры 10 сжигания» [19].

«В процессе термолиза образующаяся парогазовая смесь, содержащая низкомолекулярные продукты деструкции органических соединений, пары воды, поступают через газоотводные трубопроводы из реактора 6 через гидрозатвор 9 в газораспределительный коллектор 12 камеры 13 дожигания.

Газотранспортный водоотвод 12 приспособлен для поддержания давления ПГС при перекачке ее напрямую в пламя горелочного приспособления 5. В термокамере 13 дожигания осуществляется автотермический режим воспламенения. Устранение парогазовой смеси из печи агрегата 6 термолиза осуществляется через дымовую арматуру с эжектором. Термокамера 10 приспособлена для сгорания остаточного углерода УМО и прокаливания термального зольного остатка ЗМО. Сгорание и прокалка протекает при температуре 900-1000°C с передачей вспомогательного атмосферного кислорода. Прокалка минерального зольного осадка целиком очищает отход от органических соединений, входящих в состав. Термокамера 10 снабжена горелочными приспособлениями 5 для обеспечения стабильной температуры внутри печки на уровне 900 - 1000°C, сенсорами температуры и давления, узлами перекачки кислорода» [19]. «Образующие в термокамере 10 парогазовые смеси распределяются в камеру 13 дожигания, где при температуре 900-1000°C и экспозиции не менее 2 секунд полностью очищаются от органических соединений и побочных продуктов сгорания. В камеру 13 дожигания также распределяется газовая смесь из агрегата 6 термолиза. Камера 13 дожигания имеет следующую конструкционную особенность: вертикально металлический агрегат, внутри агрегат обработан огнеупорным и теплоизоляционным материалом. Конструкция камеры включает в себя горелочные приспособления 5,

приспособления, которые позволяют дополнительно подавать атмосферный воздух, приемная часть 11 с встроенным шнеком, узел выгрузки ЗМО, камера снабжена автоматикой - датчиками температуры, давления, предохранительный клапан» [20].

«После термокамеры 13 дымовые газы с температурой 900-1000 °С направляются на узел транспортировки и очистки дымовых газов. Узел включает в себя скруббер 14, циклон-пылеуловитель 15 и рукавной фильтр 16.

Дальнейшее охлаждение дымовых газов до 200-250 0С происходит за счет внутренней теплоты и испарения воды, которая подается в скруббер 14 через маленькие форсунки. В скруббер 14 параллельно с водой подается химический компонент – гидроксид кальция. Раствор гидроксида кальция изготавливается на автоматизированной системы 19. Конструкция системы предназначена для приготовления и подачи гидроксида кальция. Гидроксид кальция подается с помощью центробежного насоса 20. Эффективность очистки скруббера при реализации данной технологической схемы должна составлять не менее 0.9 по кислым компонентам дымовых газов, а степень очистки от твердых включений входящих в состав отходов не менее 0,55. При наличии рецикла в данной технологии на этапе очистки в скруббере, эффективность очистки могла достигать до 0,98-0,99.

Образующийся сухой водонерастворимый осадок в виде солей кальция и золь по мере накопления перемещается из нижней части скруббера 14 с помощью шнекового транспортера в бункер-накопитель. Резкое охлаждения дымовых газов в системе позволяют не допустить образование диоксинов и фуранов» [21].

«Охлажденные и очищенные химические компоненты дымовых газов перемещаются в воздушный циклон-пылеуловитель 15, где с помощью центробежной силы, возникающие при вращении газового потока внутри оборудования, циклона, происходит разделение твердых частиц от пыли. При центробежных силах частицы пыли прилипают к стенкам корпуса и под силой тяжести опускаются вниз к отверстию корпуса, а затем попадают в

пылеприемник. При накоплении пыль забирается из приемника с помощью транспортера и уже поступает в бункер-накопитель. Эффективность по очистки циклона-пылеуловителя 15 должна составлять не менее 0,80.

Завершающий этап очистки от частиц пыли, которая не осела в реакторе 15, дымовые газы поступают в рукавный фильтр 16. Эффективность очистки рукавного фильтра 16 должно составлять не менее 0,99.

Охлажденные и очищенные газы при температуре 200 °С центробежным вентилятором 17 направляются в дымовую трубу 18» [21].

Проанализировав технологическую схему, можно сделать вывод, что для более эффективной очистки дымовых газов и отходов, необходимо высокоэффективную систему очистки замкнуть, тем самым токсичные компоненты будут проходить через скруббер повторно.

## **2.2 Требования к составу и количественным характеристикам дымовых газов при термической переработке ТКО**

«В процессе сгорания твердого топлива, как известно, образуется остаток-зола в виде мелких (порошкообразных) частиц и крупных кусков - шлака. При слоевом сжигании топлива различных видов основная масса золы (примерно 75-90%) остается в топке и газоходах котла, а остальная часть (более мелкая) уносится дымовыми газами в атмосферу» [22]. Состав дымовых газов после переработки должен соответствовать значениям, представленным в таблице 6.

Таблица 6 – Состав дымовых газов после переработки

| Наименование переработанных отходов | Состав дымовых газов |                  |                |                 |
|-------------------------------------|----------------------|------------------|----------------|-----------------|
|                                     | CO <sub>2</sub>      | N <sub>2</sub> O | O <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |
| ТКО                                 | 12                   | 15               | 55             | 18              |

Состав дымовых газов может изменяться из-за технологического

решения и их переработки. Для более эффективного результата и получения минимальных значений дымовых газов в следующем разделе будет рассмотрена технологическая схема с дополнительным узлом, который позволяет осуществлять дополнительную очистку и минимизировать выбросы в окружающую среду.

### **2.3 Предложение оптимизации технологии очистки дымовых газов при термической переработке ТКО**

Для повышения эффективности очистки дымовых газов и работы установки термической переработки твердых коммунальных отходов необходимо провести реконструкцию технологической схемы процесса термической переработки (рисунок 5).

Предлагается внедрить дополнительно узел для возвращения выбросов (дымовых газов) на повторную очистку на стадии прохождения через скруббер для уменьшения коэффициента выбросов.

«В промышленности очень часто используется комбинированный метод. В этом случае скруббер для очистки пыли имеет мокрые перегородки и форсунки для подачи жидкости. Смачивание частиц загрязнений и их дальнейшее удаление осуществляется при соприкосновении жидкости и твердой пыли на поверхности перегородок и динамического контакта в турбулентном потоке газа» [5].

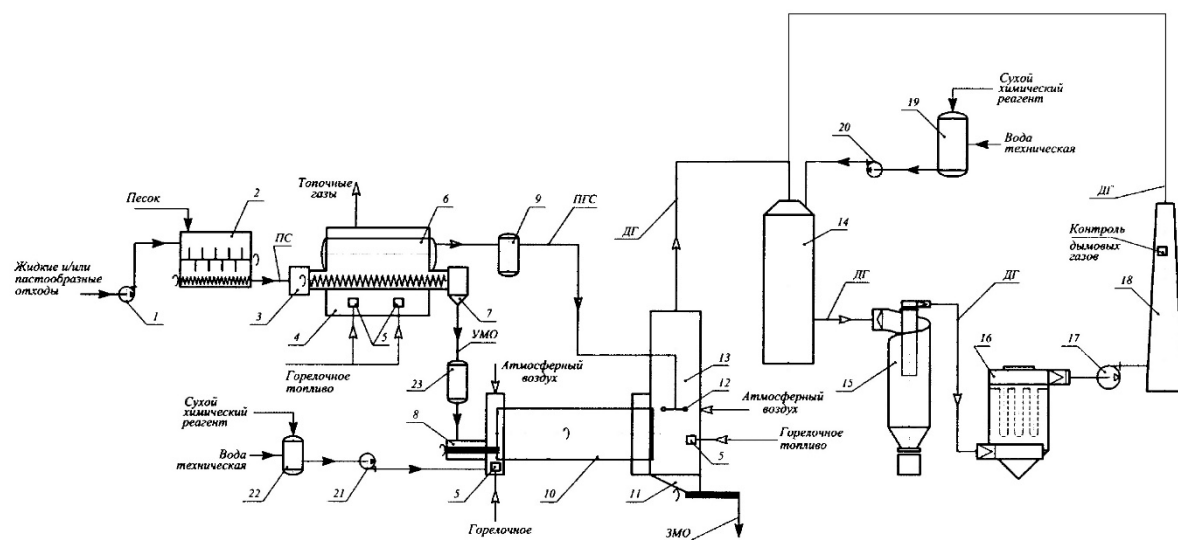


Рисунок 5 – Технологическая схема с внедряемой установкой для очистки газов и переработки ТКО

Предлагаемое оформление технологической схемы полностью описывается ниже и включает особенности предложенной установки [23].

«Технологическая схема процесса термической утилизации твердых коммунальных отходов построена в два этапа, на первом этапе подготовленные жидкие или твердые смеси отходов проходят через реактор 6 и подвергаются термической деструкции.

В результате термической деструкции образуются сложные высокомолекулярные органические компоненты, которые в свою очередь разлагаются без добавления кислорода на низкомолекулярные легкогорючие вещества и минеральные остатки. Второй этап включает в себя окисление (сжигание) в термокамерах 10 и 13 с избытком атмосферного воздуха и получение негорючего нетоксичного минерального остатка и дымовых газов, которые в свою очередь поступают в эффективную очистную систему начиная со скруббера. Проходя все этапы переработки и очистки повторно до выхода из дымовой трубы количество выбросов уменьшается до минимума» [24].

Таблица 7 – Коэффициенты выбросов после модернизации технологической схемы

| Наименование выбросов            | Коэффициент выбросов |
|----------------------------------|----------------------|
| CO <sub>2</sub> (углекислый газ) | 10                   |
| CH <sub>4</sub> (метан)          | 10                   |
| N <sub>2</sub> O (окись азота)   | 10                   |

На основе проведенной модернизации были получены данные представленные в таблице 7.

## 2.4 Технологический расчет скруббера до и после модернизации

Рассматриваемый скруббер в технологической схеме относится к оборудованию для пылеулавливания. «Скрубберу имеют большое распространение в промышленности, так как обладают высокой эффективностью очистки от различных мелких дисперсных систем – пыли, твердые частицы и т.д. Скрубберы так же имеют возможность очищать газы от различной пыли. Помимо всех преимуществ любой оборудование имеет свои недостатки, рассматривая недостатки скруббера можно отметить, что область применения их ограничивается, образование шламов в оборудовании, выносная система влаги в атмосферу приводящая к образованию отложения в газовых трубах при охлаждении, требует наличия оборотной системы подачи воды в пылеуловитель» [25].

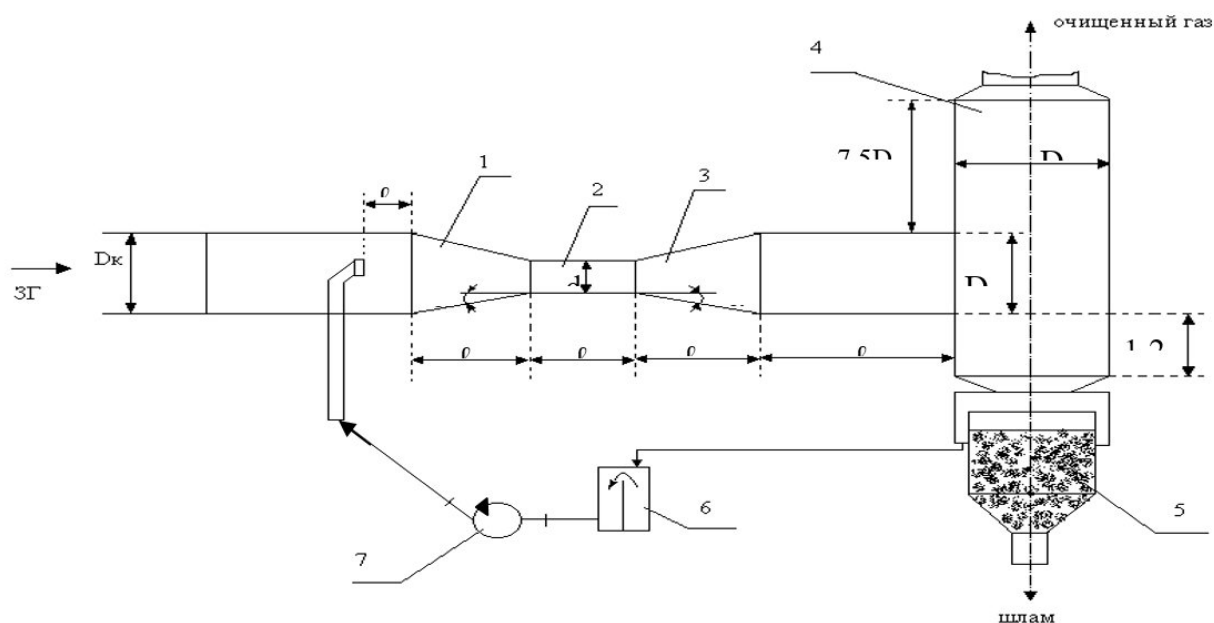
«Скруббер работает по следующему принципу. Осаждения твердых частиц происходит либо на поверхности капель, либо пленки жидкости. Осаждение твердых частиц происходит за счет сил инерции и броуновского движения. Вблизи капель и твердых частиц силы инерции скрепляют их. Силы инерции зависимы от массы жидкости и твердой частицы, а также скорости их передвижения.

На процессы, проходящие в скруббере, сильно влияют такие факторы как: турбулентная диффузия, электрические заряженные частицы, конденсация, испарение.

Основной фактор, который отвечает за эффективность мокрых пылеуловителей является смачиваемость частиц жидкостью.

Ниже представлен принцип работы скруббера. Дымовой газ поступает в приемный цилиндр скруббера. На входе скруббера расположена форсунка. В форсунку центробежным насосом под давлением 3-5 атм. подается вода, которая захватывает частички пыли, очищая от них газ и сливается в отстойник. Частицы, попавшие в отстойник, осаждаются на дно и постепенно удаляются» [25].

Технологический расчет скруббера определяется геометрическими параметрами трубы оборудования. Схема скруббера представлена на рисунке 6.



1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – скруббер центробежного типа (сепаратор); 5 – отстойник; 6 – бак для осветления жидкости; 7 – насос

Рисунок 6 – Схема скруббера

Рассматриваемые параметры при расчетах скруббера следующие:

Количество пыли: 25 кг/т

Дымовых газов: 20 кг/т

Температура парогазовой смеси: 250 °С

Температура окружающей среды: 20 °С

Физико-химические параметры пыли и отходящих газов:

- плотность ПГС,  $\rho_{\text{г}} = 1,35 \text{ кг/м}^3$ ;
- плотность пыли,  $\rho_{\text{п}} = 3500 \text{ кг/м}^3$ ;
- размеры твердых частиц,  $d_{\text{м}} = 20 \text{ мкм}$ ;
- дисперсия частиц,  $\sigma_{\text{п}} = 0,468$ ;
- начальное давление газа,  $P_{\text{г}} = 150 \text{ кПа}$ ;
- динамическая вязкость воздуха,  $\mu = 22,23 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ .

Расчетный диаметр горловины скруббера и длина рассчитывается по следующим формулам (1) и (2) соответственно:

$$d_{\text{г}} = \sqrt{4 \cdot V_1 / \pi \cdot \omega_1} = \sqrt{4 \cdot 2,0 / 3,14 \cdot 40} = 0,357 \text{ м}, \quad (1)$$

$$l_{\text{г}} = 1,25 \cdot d_{\text{г}} = 1,25 \cdot 0,357 = 0,44625 \text{ м}, \quad (2)$$

где  $\omega_1$  – скорость очищаемого газа в горловине трубы,  $\omega_1 = 40 \text{ (м/с)}$ .

Расчетные диаметры конфузора и диффузора рассчитаем по следующим формулам:

$$D_{\text{к}} = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 / \omega_2} = 1,12 \cdot \sqrt{2,0 / 20} = 0,354 \text{ м}, \quad (3)$$

$$D_{\text{д}} = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 / \omega_3} = 1,12 \cdot \sqrt{2,0 / 30} = 0,284 \text{ м}, \quad (4)$$

где  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – скорости газа поступающий через диаметр конфузора и диффузора;

$$\omega_2 = 20 \text{ м/с}, \quad \omega_3 = 30 \text{ м/с}.$$

Рассчитываем диаметр форсунки по следующей формуле (5):

$$d_{\text{ф}} = \sqrt{4 \cdot \xi \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot L_{\text{ж}} / n_{\text{ф}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot P} \quad (5)$$

где  $\xi$  – справочный коэффициент расхода жидкости;  $\xi = 0,75$ ;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$L_{\text{ж}}$  – расход смеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяется по формуле (2.8);

$m$  – удельный расход жидкости;  $m = 0,001$

$P$  – рабочее давление жидкости,  $P = 6000 \text{ Па}$ ;

$n_{\text{ф}}$  – количество форсунок, учитывая что максимальный диаметр орошения 200 мм, количество форсунок определяется по формуле (7).

$$L_{\text{ж}} = m \cdot V_1 = 0,001 \cdot 2,0 = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

$$n_{\text{ф}} = D_{\text{к}}^2 / 0,2^2 = 0,354^2 / 0,2^2 = 3,1329, \quad (7)$$

$$d_{\text{ф}} = \sqrt{4 \cdot 0,75 \cdot 1000 \cdot 0,002 / 3,1329 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 150000} = 0,00143 \text{ м};$$

Рассчитываем параметр длины  $l_3$  и  $l_4$ :

$$l_3 = 1,5 \cdot D_{\text{к}} = 1,5 \cdot 0,3998 = 0,599 \text{ м}, \quad (8)$$

$$l_4 = 0,5 \cdot D_{\text{д}} = 0,5 \cdot 0,3452 = 0,1726 \text{ м}, \quad (9)$$

Диаметр сепаратора в скруббере рассчитываем по следующей формуле:

$$D_{\text{с}} = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 \cdot (1 + m) / \omega_{\text{с}}} = 1,12 \cdot \sqrt{2,0 \cdot (1 + 0,001) / 2,0} = 1,12 \text{ м}, \quad (10)$$

Где  $\omega_{\text{с}}$  – скорость смеси;

$$\omega_{\text{с}} = 2,0 \text{ м/с}.$$

Гидравлический расчет сопротивления скруббера определяется сопротивлением трубы:

$$\Delta P = 0,12 \cdot (\rho_{\text{г}} \cdot \omega_1^2 / 2) + 0,6(m \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_3^2 / 2), \quad (11)$$

$$\Delta P = 0,12 \cdot (1,35 \cdot 40^2 / 2) + 0,6 \cdot (0,001 \cdot 1000 \cdot 30^2 / 2) = 399,6 = 400 \text{ Па}$$

Эффективность очистки применяемого скруббера рассчитаем по следующей формуле:

$$\eta = 1 - e^{-E_{\text{м}}}, \quad (12)$$

где  $n$  – коэффициент;

$$n = 0,25;$$

$E$  – параметр, определяемый по формуле:

$$E = \Delta P + P \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_c^2 / 2 = 400 + (6000 \cdot 0,001 \cdot 1000 \cdot 2,0^2 / 2) / 1000 = 12 \quad (13)$$

$$\eta = 1 - e^{-12 \cdot 0,25} = 0,95.$$

#### 2.4.1 Расчет скруббера после модернизации

После модернизации технологической схемы путем создания рециклинга, производительность скруббера увеличилась соответственно эффективность очистки дымовых газов и отходов должна вырасти. Произведем необходимые расчеты:

Расчетный диаметр горловины скруббера и длина рассчитывается по следующим формулам (15) и (16) соответственно:

$$d_r = \sqrt{4 \cdot V_1 / \pi \cdot \omega_1} = \sqrt{4 \cdot 2,5 / 3,14 \cdot 50} = 0,252 \text{ м}, \quad (14)$$

$$l_r = 1,25 \cdot d_r = 1,25 \cdot 0,252 = 0,315 \text{ м}, \quad (15)$$

где  $\omega_1$  – скорость очищаемого газа в горловине трубы;

$$\omega_1 = 50 \text{ м/с}.$$

Расчетные диаметры конфузора и диффузора рассчитаем по следующим формулам:

$$D_k = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 / \omega_2} = 1,12 \cdot \sqrt{2,5 / 20} = 0,396 \text{ м}, \quad (16)$$

$$D_d = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 / \omega_3} = 1,12 \cdot \sqrt{2,5 / 30} = 0,323 \text{ м}, \quad (17)$$

где  $\omega_2, \omega_3$  – скорости газа поступающий через диаметр конфузора и диффузора;

$$\omega_2 = 20 \text{ м/с}, \omega_3 = 30 \text{ м/с}.$$

Рассчитываем диаметр форсунки по следующей формуле (2.7):

$$d_{\text{ф}} = \sqrt{4 \cdot \xi \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot L_{\text{ж}} / n_{\text{ф}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot P}, \quad (18)$$

где  $\xi$  – справочный коэффициент расхода жидкости;  $\xi = 0,75$ ;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$L_{\text{ж}}$  – расход смеси,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяется по формуле (20);

$m$  – удельный расход жидкости;  $m = 0,001$

$P$  – рабочее давление жидкости,  $P = 15000 \text{ Па}$ ;

$n_{\text{ф}}$  – количество форсунок, учитывая что максимальный диаметр орошения 200 мм, количество форсунок определяется по формуле (21).

$$L_{\text{ж}} = m \cdot V_1 = 0,001 \cdot 2,5 = 0,0025 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (19)$$

$$n_{\text{ф}} = D_{\text{к}}^2 / 0,2^2 = 0,396^2 / 0,2^2 = 3,861, \quad (20)$$

$$d_{\text{ф}} = \sqrt{4 \cdot 0,75 \cdot 1000 \cdot 0,0025 / 3,861 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 15000} = 0,00454 \text{ м},$$

Рассчитываем параметр длины  $l_3$  и  $l_4$ :

$$l_3 = 1,5 \cdot D_{\text{к}} = 1,5 \cdot 0,396 = 0,594 \text{ м}, \quad (21)$$

$$l_4 = 0,5 \cdot D_{\text{д}} = 0,5 \cdot 0,323 = 0,1615 \text{ м}, \quad (22)$$

Диаметр сепаратора в скруббере рассчитываем по следующей формуле:

$$D_{\text{с}} = 1,12 \cdot \sqrt{V_1 \cdot (1 + m) / \omega_{\text{с}}} = 1,12 \cdot \sqrt{2,5 \cdot (1 + 0,001) / 2,0} = 1,4 \text{ м}, \quad (23)$$

где  $\omega_{\text{с}}$  – скорость смеси;

$$\omega_{\text{с}} = 2,0 \text{ м/с}.$$

Гидравлический расчет сопротивления скруббера определяется сопротивлением трубы:

$$\Delta P = 0,12 \cdot (\rho_{\text{г}} \cdot \omega_1^2 / 2) + 0,6 \cdot (m \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_3^2 / 2), \quad (24)$$

$$\Delta P = 0,12 \cdot (1,35 \cdot 40^2 / 2) + 0,6 \cdot (0,001 \cdot 1000 \cdot 30^2 / 2) = 399,6 = 400 \text{ Па},$$

Эффективность очистки применяемого скруббера рассчитаем по следующей формуле:

$$\eta = 1 - e^{-E_{\text{м}}}, \quad (25)$$

где  $n$  – коэффициент,  $n = 0,25$ ;

$E$  – параметр, определяемый по формуле:

$$E = \Delta P + P \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_c^2 / 2 = 400 + (15000 \cdot 0,001 \cdot 1000 \cdot 2,0^2 / 2) / 1000 = 30,400 \quad (26)$$

$$\eta = 1 - e^{-30,400 \cdot 0,25} = 0,99.$$

Вывод: при внедрении в технологическую схему рециклинг, повторное возвращение дымовых газов и отходов от ТКО в скруббер дает большую степень очистки и эффективность работы  $\eta = 0,99 > \eta = 0,95$  применяемого скруббера.

## 2.5 Эколого-экономическое обоснование предложенной технологии

Эффективность предложенной технологии определяем, как соотношение между достигнутым полезным результатом и затратами, которые пошли для реализации технологии.

Важный показатель эффективности технологического процесса это его природоёмкость, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{P}{\Xi} \cdot 100\% \quad (27)$$

где:

$P$  – суммарная стоимость технологического процесса,

$P = 5000000$  руб.

$\Xi$  – суммарный экономический эффект.

$\Xi = 6000000$  руб.

При расчете данная величина и характеризует эффективность всего производства.

$$E = \frac{5000000}{6000000} \cdot 100\% = 83,3 \%$$

Загрязнение окружающей среды от процесса производства еще один важный фактор. Общий экономический ущерб рассчитывается по следующей

формуле:

$$\text{ЭУ} = \text{У}_{\text{зн}} \cdot R_i + \text{У}_{\text{кх}} \cdot R_i + \text{У}_{\text{сх}} \cdot S + \text{У}_{\text{пр}} \cdot \Phi \# (28)$$

$$\text{ЭУ} = 1,5 \cdot 450 + 3,5 \cdot 450 + 1 \cdot 550000 + 2,5 \cdot 100000 = 802250 \text{ руб}$$

где:  $\text{У}_{\text{зн}}$  – ущерб населению;

$\text{У}_{\text{кх}}$  - ущерб коммунальному хозяйству;

$\text{У}_{\text{сх}}$  – ущерб, наносимый природе;

$\text{У}_{\text{пр}}$  – ущерб, наносимый промышленности;

$R_i$  – численность людей в зоне выбросов и загрязнения;

$S$  – площадь промышленной области;

$\Phi$  - стоимость основных промышленно-производственных фондов.

Для подсчета эколого-экономической эффективности ( $\text{Э}_1$ ) производства, следует учитывать (в денежном выражении):

- ~ общий экономический эффект ( $\text{Э}_0$ );
- ~ использованные средства на технологию ( $P$ );
- ~ прогнозируемые убытки от загрязнения окружающей среды, или эколого-экономический ущерб ( $\text{ЭУ}$ );
- ~ стоимость природоохранных мероприятий ( $C$ ).

Эколого-экономическая эффективность ( $\text{Э}_1$ ) производственных процессов определяется по формуле:

$$\text{Э}_1 = \text{Э}_0 - (P + \text{ЭУ} + C) \# (29)$$

$$\text{Э}_1 = 3500000 - (5 + 802250 + 100000) = 2597745 \text{ руб}$$

Общие затраты на проведение природоохранной деятельности можно представить в виде формулы:

$$B = T_3 + K_3 \cdot \text{Э}_n \# (30)$$

$$B = 250000 + 2500000 \cdot 0,12 = 330000 \text{ руб}$$

где:  $T_3$  – текущие денежные затраты на оборудование;

$K_3$  – денежные затраты на внедрения новой установки направленная на переработку ТКО;

$\Theta_H$  – коэффициент эффективности равный 0,12.

Предотвращенный экономический ущерб рассчитывается как разность между рассчитанной величиной убытков от загрязнения природы до внедрения очистной установки и после.

Эффективность природоохранных мероприятий рассчитывается по следующей формуле:

$$\Theta_{\text{пм}} = \frac{\Delta \Theta \text{У}}{B} \# (31)$$

где:  $\Delta \Theta \text{У}$  – недопустимый экономический ущерб за счет внедряемой установки;

$B$  – общие денежные затраты на реализацию технологии переработки отходов.

$$\Theta_{\text{пм}} = \frac{802250 - 550000}{330000} = 0,764 * 100\% = 76,4$$

Для обеспечения предприятием переработки отходов необходимо соблюдение следующего неравенства:

$$З_{\text{под}} < (П_{\text{ут}} + Н_{\text{л}} + К_{\text{л}} + Ц_{\text{н}}) \# (32)$$

где:  $З_{\text{под}}$  – затраты на обеспечение экологической безопасности;

$П_{\text{ут}}$  – прибыль от процесса переработки отходов;

$Н_{\text{л}}$  – затраты на налоги;

$К_{\text{л}}$  – денежные средства, полученные с помощью кредитования;

$Ц_{\text{н}}$  – наценка производства.

$$802250 + 330000 < (350000 + 350000 + 250000 + 150000 + 56100) \\ 1132250 < 1156100$$

Данное условие выполняется, предприятие полностью обеспечивает переработку производственных отходов.

Эколого-экономическое обоснование внедряемой технологии достигается только при разумном денежном вложении и контролем выбросов в окружающую среду [26].

Плата за загрязнение естественной среды должна стимулировать осуществление природоохранных мероприятий на предприятиях, финансирование этих мероприятий, а также возмещение (компенсация) хозяйственных и экологических убытков, причиненных в результате загрязнения.

Плата за загрязнение атмосферы источниками загрязнения (от технологических процессов производства) рассчитывается по формуле:

$$П_A = (H_{Bi} \cdot M_{Li} + K_n \cdot H_{Bi} \cdot M_{СЛi}) K_T \cdot K_{инд} \# (33)$$

$$\begin{aligned} П_A &= (56,1 \cdot 95 + 0,45 \cdot 0,55 \cdot 155) 0,9 \cdot 0,25 = \\ &= 5338 \text{ руб за 1 тонну отходов} \end{aligned}$$

где:  $H_{Bi}$  – базовый норматив платы за выброс в атмосферу 1 тоны  $i$ -того загрязняющего вещества в пределах лимита;

$M_{Li}$  – масса выбросов  $i$ -го компонента в пределах лимита;

$K_n$  – коэффициент кратности платы за сверхнормативный выброс;

$M_{СЛi}$  – масса сверхнормативных выбросов  $i$ -го загрязнителя;

$K_T$  – коэффициент, который учитывает территориальные, социально-экономические особенности;

$K_{инд}$  – коэффициент индексации.

$$K_T = K_{НАС} \cdot K_{\Phi} \# (34)$$

$$K_T = 4,5 \cdot 0,2 = 0,9$$

где:  $K_{НАС}$  – коэффициент, который зависит от численности людей в области выбросов;

$K_{\phi}$  - коэффициент, который учитывает народнохозяйственное значение.

Размер платы за загрязнение атмосферы определяется по формуле:

$$P_A = N_{Bi} \cdot M \cdot K_T \cdot K_{\text{инд}} \# (35)$$

$$P_A = 561000 \cdot 95 \cdot 0,9 \cdot 0,25 = 1199140 \text{ руб}$$

где:  $N_{Bi}$  – базовый норматив платы за выбросы загрязняющих веществ в результате сжигания 1 тонны топлива;

$M$  – годовой объем использованного топлива;

$K_{\text{инд}}$  – коэффициент равный 0,25.

По полученным расчетам можно утверждать, что эколого-экономическая эффективность предприятия составляет 2597745 рублей. Предприятие отвечает нормативным требованиям по переработки отходов и отвечают неравенству, которое следует соблюдать при производственных работах при переработке отходов.

Эффективность природоохранных мероприятий и технологического процесса по переработки отходов составляет не менее 70%, что подтверждает о целесообразности производственных работ.

## Заключение

В ходе выполнения квалификационной работы было предложено внедрить в технологическую схему переработки твердых коммунальных отходов рециклинг дымовых газов, который позволяет достичь эффективной производительности скруббера и большей степени очистки за счет возвращения отходов обратно в цикл на стадии работы скруббера. Рециклинг дымовых газов реализуется за счет замкнутого цикла подачи газов в скруббер, где происходит их многоступенчатая фильтрация, что значительно снижает концентрацию вредных примесей.

При внедрении в технологическую схему процесса рециклинг дымовых газов, повторное возвращение дымовых газов и отходов от ТКО в скруббер дает большую степень очистки и эффективность работы применяемого скруббера. Показатель производительности скруббера при модернизации технологической схемы переработки твердых коммунальных отходов достигает 99% при изначальных заложенных 95 % ( $\eta = 0,99 > \eta = 0,95$ ). Данные показатели подтверждены расчетами в расчетном разделе. Эффективность внедряемого метода так же была подтверждена эколого-экономическими обоснованиями. По полученным расчетам можно утверждать, что эколого-экономическая эффективность предприятия составляет 2597745 рублей. Анализ показал, что данная технология может быть адаптирована для других предприятий отрасли с аналогичными параметрами отходов, обеспечивая сопоставимую эффективность. Предприятие отвечает нормативным требованиям по переработке отходов и отвечает неравенству, которое следует соблюдать при производственных работах при переработке отходов. Эффективность природоохранных мероприятий и технологического процесса по переработке отходов составляет не менее 70%, что подтверждает целесообразность производственных работ.

## Список используемой литературы

1. Бернадинер И. М., Бернадинер М. Н. Обезвреживание опасных отходов: выбор оптимальной технологии. Твердые бытовые отходы, 2010. 18-26 с.
2. Бернадинер М. Н., Бернадинер И. М. Высокотемпературная переработка и обезвреживание жидких, пастообразных и твердых промышленных и медицинских отходов. Экология и промышленность России, 2011. 19-21 с.
3. Бернадинер М. Н., Бернадинер И. М. Высокотемпературная переработка отходов. Плазменные источники энергии (часть 1), Твердые бытовые отходы, 2011. 16-19 с.
4. Бернадинер М. Н., Бернадинер И. М. Высокотемпературная переработка отходов. Плазменные источники энергии (часть 2), Твердые бытовые отходы, 2011. 24-27 с.
5. Билитевски Б. Сжигание отходов: опыт Германии // Твердые бытовые отходы, 2007. 47-49 с.
6. Гонопольский А.М., Федоров О. Л. Обезвреживание отходов медицинских учреждений в герметичной плазменной печи. Чистый город, 1999. 28-31 с.
7. Гонопольский А. М., Малышев Н. А., Ланин В. М., Федоров О. Л. Опыт внедрения системы сбора, транспортировки и плазменной переработки медицинских отходов (на примере Московской городской инфекционной клинической больницы № 1). Чистый город, 1999. 16-20 с.
8. ГОСТ Р 54097-2010. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации.
9. ГОСТ Р 54198-2010. Ресурсосбережение. Промышленное производство. Руководство по применению наилучших доступных технологий для повышения энергоэффективности.

10. ГОСТ Р 54205-2010. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности при сжигании.
11. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». - М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2021. 123 с.
12. Ершов А. Г., Шубников В. Л. Диоксинофобия: факты и домыслы // ЭкоПрогресс, 2009. 26-32 с.
13. Ершов А. Г., Шубников В. Л. Термическое обезвреживание отходов: теория и практика, мифы и легенды. Журнал ТБО, 2014. 47-52 с.
14. Ершов А. Г., Шубников В. Л., Шульц Л. А. Термическое обезвреживание отходов: теория и практика, мифы и легенды. Журнал ТБО, 2014. 54-60 с.
15. И.М. Бернадинер, М. Н. Бернадинер Реакторы термического обезвреживания твердых и пастообразных органических отходов. Состояние и перспективы. Высокотемпературные процессы и аппараты. Сборник научных статей к 100-летию С. Н. Шорина. - М.: МГУИЭ, 2003. 124-144 с.
16. Малышевский А. Ф. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России. М.: МПР Российской Федерации, 2012. 41-45 с.
17. Мочалова, Л. А., Гриненко, Д. А., Юрак, В. В. Система обращения с твердыми коммунальными отходами: зарубежный и отечественный опыт // Известия УГГУ, 2017. 33-75 с.
18. Моссэ А. Л., Горбунов А. В., Савчин В. В. Электродуговые плазменные устройства для переработки и уничтожения токсичных отходов. Материалы 4-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Ивановский государственный технологический университет, 13-18 мая 2005 г.
19. Процесс Ромелт / Под ред. В. А. Роменца. - М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. 400 с.

20. Силин В. Е., Рыжков А. Ф. Особенности низкотемпературного горения древесного топлива в современных энергоустановках. - Промышленная энергетика, 2008.
21. Скриган, А. Ю., Шилова, И. В., Мельникова, И. С., Щур, А. В. Сравнительная оценка системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Беларуси, России и Казахстане // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2017. 45-59 с.
22. Цыганков А. П., Цыганкова О. Е. и др. Перспективы плазмохимического уничтожения ПХБ-содержащих конденсаторов и других токсичных отходов. Экология производства, 2004. 75-79 с.
23. Mamun, A.A., Hayat, N., Malarvizhi, C.A.N. and Zainol, N.R.B. «Economic and environmental sustainability through green composting: a study among low-income households», Sustainability (Switzerland), 2020. 12-16 с.
24. Noor, T., Javid, A., Hussain, A., Bukhari, S.M., Ali, W., Akmal, M. and Hussain, S.M. «Types, sources and management of urban wastes», Urban Ecology, Elsevier, 2020. 239-263 с.
25. Peng, T., K. Kellens, R. Tang, C. Chen, and G. Chen. «Sustainability of Additive Manufacturing: An Overview on Its Energy Demand and Environmental Impact». Additive Manufacturing 21, 2018. 694-704 с.
26. Rajeev., A., R. K. Pati, and S. S. Padhi. "Sustainable Supply Chain Management in the Chemical Industry: Evolution, Opportunities, and Challenges." Resources, Conservation and Recycling 149, 2019. 275-291 с.
27. Romano G, Molinos-Senante M. Factors affecting eco-efficiency of municipal waste services in Tuscan municipalities: An empirical investigation of different management models. Waste Management, 2020. 384-394 с.