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)

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) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка оптимального технологического решения по переработке ТКО термическим способом

Обучающийся А.И. Шахов
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель Ю.Н. Шевченко
(ученая степень, ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Бакалаврскую работу выполнил студент: Шахов А.И., группа ЭРТб–1801а.

Тема бакалаврской работы: «Разработка оптимального технологического решения по переработке ТКО термическим способом».

Целью работы является снижение антропогенной нагрузки ТКО на окружающую среду путем разработки оптимального технологического решения по переработке ТКО термическим способом.

Актуальность работы связана с отсутствием мероприятий по переработки ТКО в г.о. Тольятти.

Задачи: предложить оптимальное технологическое решение по переработке ТКО термическим способом и снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 80 страницах, введения, трех разделов, включает 4 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 36 источников, включая 5 иностранных источников.

В первом разделе проведен анализ масштабности загрязнения, выбрана оптимальная технологическая схема переработки ТКО, разобраны аппараты, включающиеся в схему, проведен патентный анализ на выявление оптимальной камеры термической переработки ТКО.

Во втором разделе проведена расчетная часть, на основе которой выявлен состав загрязненного дымового газа с последующей его многоступенчатой очисткой.

В третьем разделе проведен эколого – экономический анализ технологической схемы.

Abstract

The title of the graduation work is Development of an optimal technological solution for thermal recycling of MSW.

The graduation work consists of an explanatory note on 80 pages, an introduction, including 4 figures, 12 tables, the list of 36 references including 5 foreign sources.

The key issue of the graduation work is to reduce the anthropogenic burden of MSW on the environment by developing an optimal technological solution for recycling MSW by thermal method.

The aim of the work is to give some information about the lack of MSW processing activities in Togliatti.

The graduation work describes in details proposal of the optimal technological solution for the processing of waste by the thermal method and the reduction of the technogenic load on the environment.

We first analyze the scale of pollution and select the optimal technological scheme of MSW processing. Then we disassemble the devices included in the scheme, conduct a patent analysis to identify the optimal chamber for thermal processing of MSW.

The special part of the project gives details about the calculation part, on the basis of which the composition of the polluted flue gas with its subsequent multistage purification is revealed.

Finally, we present the work on the environmental and economic analysis of the technological scheme.

Содержание

Перечень сокращений и обозначений 6
Введение 7
1 Описание технологической схемы процесса переработки ТКО термическим способом 8
1.1 Анализ состояния проблемы масштабности несанкционированных свалок 8
1.3 Камера термической переработки ТКО 9
1.4 Аппаратная часть системы многоступенчатой очистки дымовых газов 17
2 Расчетная часть предлагаемого технологического решения по переработке ТКО термическим способом 19
2.1 Расчет материального баланса 19
2.2 Тепловой баланс камеры сжигания отходов 38
2.3 Расчет топлива 42
2.4 Технологический расчет циклона 50
2.5 Распылительный абсорбер. Аппарат очистки от кислых компонентов 58
3 Эколого–экономическое обоснование выбранного технологического решения по переработке ТКО термическим способом 72
3.1 Эксплуатация золошлаков 72
3.2 Анализ стоимости предложенного технологического процесса переработки ТКО термическим способом 73
Заключение 74
Список используемых источников 75
Приложение А Морфологический состав ТКО и после сортировки 81
Приложение Б Виды камер сжигания 82
Приложение В Проведенный патентный поиск способа термической переработки ТКО 84
Приложение Г Камера термической переработки отходов 88

Приложение Д Патентный поиск системы очистки дымовых газов……89
Приложение Е Схема конусной дробилки……..91
Приложение Ж Аппаратная часть системы очистки газов……92
Приложение И Химический состав и свойства природного газа (топлива)... 94
Приложение К Конструктивные параметры циклона ЦН–15 95
Приложение Л Патентный поиск по применению золошлаковых отходов…96

Перечень сокращений и обозначений

ТКО – твердые коммунальные отходы

Введение

В настоящее время на территории г.о. Тольятти отмечается рост ТКО, а, следовательно, рост таких проблем, как увеличение числа несанкционированных свалок, загрязнение окружающих территорий. Данная ситуация негативно сказывается на экологической обстановке города.

«Ежегодно в России образуется около 7 млрд.т. отходов, из которых используется или перерабатывается порядка лишь 2 млрд.т. или 28,6% от общего количества отходов. На территории страны на полигонах, в отвалах или хранилищах накоплено порядка 80 млрд.т. только твердых коммунальных отходов. Под полигоны твердых коммунальных отходов ежегодно выделяется около 10 т. га пригодных для использования или возделывания земель» [1].

Актуальность данной проблемы связана с воздействием ТКО на окружающую среду. Она заключается в том, что объем переработки отходов в России в течение 10 лет остается на одном и том же уровне [4].

Таким образом, целью данной работы является снижение антропогенного воздействия на окружающую среду путем разработки оптимального технологического решения по переработке ТКО термическим способом.

Задачи:

– выбрать оптимальную технологическую схему переработки ТКО термическим способом;

– провести расчёт на выявление состава загрязненного дымового газа с последующей многоступенчатой очисткой;

– провести эколого–ценовой анализ технологического решения.

1 Описание технологической схемы процесса переработки ТКО термическим способом

1.1 Анализ состояния проблемы масштабности несанкционированных свалок

Одна из актуальных проблем г.о. Тольятти – несанкционированные свалки. Их ликвидация ежегодно планировалась за счет средств городского бюджета в рамках программных мероприятий [13]. Объем ликвидированных свалок представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Ликвидированные свалки г.о. Тольятти

Год	Количество несанкционированных свалок, шт	Затраты, тыс. рублей	Объём, тыс. $м^3$
2014	17	1013,3	1,80
2015	13	3092,8	2,87
2016	2	1905,0	2,29
2017	3	1097,4	3,15
2018	7	810,9	1,34
2019	16	12658,0	12,24

Так же, администрацией города была осуществлена работа по привлечению организаций Тольятти к реализации мероприятий по очистке общественных мест от несанкционированных свалок. Была организована акция по ликвидации отходов Осенний марафон «Тольятти против мусора», где принять участие мог любой желающий.

«В данном мероприятии приняли такие организации и предприятия, как ПАО «КуйбышевАзот», ООО «СИБУР Тольятти», ПАО «Тольяттиазот», ПАО «АВТОВАЗ», ООО «ПОВТОР», ОАО «Волгоцеммаш"», ООО «Эколайн», ПАО «Т Плюс». Общими силами были устранены и вывезены 10 несанкционированных свалок, объем которых составил более 3000 $м^3$» [13].

«Помимо этого, администрация города реализовала работу по принуждению владельцев земельных участков, на которых были расположены

несанкционированные свалки, к последующей их ликвидации. В результате были устранено 2 несанкционированного складирования, объем которых составил ориентировочно 1100 м^3» [13].

Так же администрация г.о. Тольятти в 2018 году организовала субботники на полуострове Копылово. В ходе работы была очищены береговая полоса протяженностью около 13 километров, выполнялся раздельный сбор ПЭТ–бутылок, которые после были отданы на утилизацию. На данном мероприятии принимали участие более 250 волонтеров, которые ликвидировали ориентировочно 315 м^3 мусора [3].

«Для предотвращения последующего потенциального образования свалок были установлены 2 плаката, предупреждающих об административной ответственности за сброс отходов в несанкционированных местах» [13].

Согласно федеральному закону "Об отходах производства и потребления" от 24.06.1998 N 89–ФЗ (последняя редакция), запрещено сжигать отходы до извлечения из них полезных свойств. Документ вступил в силу с 1 января 2020 года [30].

В процессе сортировки необходимо извлечь все полезные вторичные ресурсы, такие как черные и цветные металлы, макулатуру, пластик и стекло [6].

Пример сортировки отходов представлен в Приложении А в таблице А.1. Из пробы объемом 560 кг было извлечено 98 кг полезных ресурсов. Остальные 462 кг отправятся на захоронение [13]. В предложенной схеме эта масса отправится на термическую переработку.

1.3 Камера термической переработки ТКО

«Чем совершеннее организован процесс сжигания в топке, тем меньше запыленность уходящих дымовых газов и мельче взвешенные в них частицы» [2].

Термическая переработка ТКО осуществляется следующими процессами: пиролиз, газификация и сжигание. Рассмотрим их.

«Пиролиз основан на способности утилизируемой массы при нагревании в инертной среде выделять продукты термического разложения (CO, CO_2, H_2, CH_4) Процесс протекает при подводе тепла (эндотермический процесс). В наиболее общем случае при пиролизе отходов протекают связанные между собой процессы – сушка, пиролиз, газификация и горение коксового остатка, взаимодействие образовавшихся газообразных продуктов. В результате пиролиза образуются газы, смолистый остаток, углеродистый твердый остаток и водные растворы» [2]. Соотношение количества получаемых газообразных, жидких и твердых продуктов, а также их состав зависят от условий пиролиза и состава исходного продукта.

Пиролизный газ после очистки представляет собой высококачественный газ, который можно использовать для отопления.

Основной недостаток пиролиза – необходимость в точном подборе сырья для переработки, однородный фракционный размер сырья для интенсивного и эффективного горения. Не подходит для утилизации смешанных отходов [7].

«При газификации получают частично окисленные газы (CO, альдегиды, фенолы, эфиры, кислоты, углеводороды) за счет восстановительных реакций, в которые вступают продукты полного окисления (CO_2, H_2O, HCl) с углеродом или водородом, содержащимися в отходах, а также за счет неполного или частичного окисления углерода отходов. Газификация может протекать как с подводом тепла (эндотермический процесс), так и с выделением тепла (экзотермический процесс). В результате газификации углерод твердого остатка под воздействием окислителя (воздуха, кислорода или водяных паров) превращается в газообразное топливо. Оставшийся после этого твердый остаток содержит лишь минеральную часть отходов» [8].

Недостаток газификации также заключается в определенном морфологическом составе на входе, с целью эффективного выхода продуктов,

и в одинаковом фракционном размере сырья. Не подходит для утилизации смешанных отходов.

Наиболее подходящим для переработки смешанных отходов является сжигание. Сжигание проводят в окислительной среде при температуре не ниже 650 ^{o}C. Конечном продуктом сжигания является золошлаки, которые могут применяться в качестве сырья для производства стройматериалов, и основные загрязняющие вещества, такие как CO_2, SO_2, бенз(а)пирен, дикосины и фураны. «Однако бенз(а)пирен, дикосины и фураны при температуре 600 ^{o}C начинают разлагаться, а при выдержке более 3 секунд при температуре свыше 1000 ^{o}C полностью распадаются» [27]. Для образующихся загрязняющих веществ необходимо предусмотреть эффективную очистку для полной нейтрализации дымовых газов.

Оптимальным вариантом переработки ТКО смешанного состава подходит сжигание, так как нет необходимости при сортировке отходов отбирать определенную фракцию с целью получения каких-либо полезных газообразных и жидких продуктов. Необходимо выбрать камеру сжигания.

Критерии выбора камеры сжигания отходов:

– габариты камеры сжигания;

– энергоемкость камеры сжигания;

– способ сжигания ТКО;

– температурный режим сжигания отходов;

– расход топлива;

– объем образования загрязняющих веществ;

– эффективность сжигания отходов.

В таблице Б.1 Приложения Б представлены и проанализированы преимущества и недостатки видов камер сжигания, на основе которых будет сделан выбор подходящей камеры [2], [6], [10], [12], [29], [36].

Вывод: оптимальная камера сжигания ТКО имеет следующие параметры: вертикальный способ расположения, так как занимает меньшую площадь (камера подходит для реализации эксплуатации на

мусоросортировочных заводах, так как отсортированные на предприятии отходы будут поступать непосредственно на утилизацию, а не на захоронение, тепловой коэффициент полезного действия составляет 0,8–0,9), неподвижные решетки (разница спекаемости между подвижными и неподвижными решетками составляет 5 %, однако разница в цене составляет в размере 200 тыс. руб., так как подвижные решетки оснащаются подвижным жаростойким механизмом), непрерывный тип работы (поддерживается постоянная температура 1000–1200 ^{o}C, следовательно, не требуется дополнительный расход топлива, расход уменьшается на 10–15 %, меньшее потребление энергии, в сравнении с другими способами сжигания, концентрация дымовых газов снижена за счет поддержания высокой температуры 1000–1200 ^{o}C).

Проведен патентный поиск, проанализирован объем патентной литературы на предмет подбора оптимальной камеры. Патентный поиск представлен в Приложении В в таблице В.1 [16], [22], [24], [25].

Изучив способы переработки ТКО, их преимущества и недостатки, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным и эффективным способом является способ термической переработки твердых коммунальных отходов в камере кипящего слоя, так как способ подходит для переработки смешанных отходов (за счет эффекта «кипения» происходит перемешивание отходов и равномерное горение; при «кипении» слой отдает тепло отходам, что приводит к экономии топлива) и при температуре 1150 ^{o}C происходит полное разложение вредных соединений, что в дальнейшем облегчает очистку дымовых газов.

На рисунке 1 представлена общая схема процесса термической переработки ТКО.

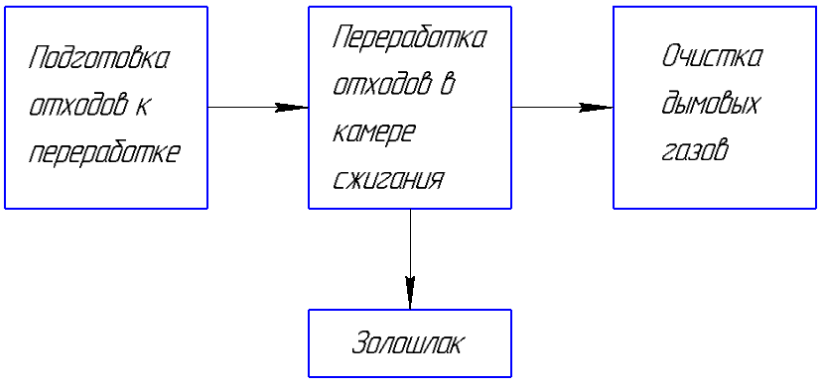


Рисунок 1 – Общая схема процесса термической переработки ТКО

Исходя из выбранного способа используем предлагаемую в патенте камеру сжигания отходов (конструкция камеры обеспечивает получение высоких температур (до 1200 °С) по всему ее объему, что позволяет достичь полного разложения вредных соединений; за счет эффекта «кипения» происходит перемешивание отходов и равномерное горение; при «кипении» слой отдает тепло отходам, что приводит к экономии топлива).

На рисунке Г.1 в Приложении Г представлена камера термической переработки отходов. «Камеры кипящего слоя представляют собой футерованную камеру. Насыпается слой агента (песок), создающего кипящий слой. При продувании газов (воздуха) слоя агента образуется кипящий слой. Горение нагревает агент, который интенсивно перемешивается с сжигаемыми отходами» [12].

«В камеру через окна загрузочного устройства подают твердые отходы на решетку температурой 20 °С и воздух температурой 20 °С. В самой камере находится песок, разогретый до 250 °С, включают в работу топливные горелки. Создается кипящий слой, температурой 1150 °С. Из горелок через трубопроводы продолжают поступать продукты сгорания топлива. Образующийся шлак, температурой 950 °С непрерывно выливается из желоба. Образующиеся газообразные продукты, температурой 1150 °С, поступают в аппарат охлаждения газов» [16].

«Конструкция камеры обеспечивает получение высоких температур (до 1200 °С) по всему ее объему, что позволило достичь полного разложения вредных соединений, получить твердую фазу, пригодную для дальнейшей переработки, и повысить её долговечность. Потребление энергии данной камеры составляет 20 кВт/ч.» [16].

«Камера снабжена теплоотводящими элементами, прикрепленными к внутренним стенкам корпуса и свода, при этом они выполнены в виде паяных оребренных медностальных пластин с внутренними каналами для прохождения охладителя и снабжены коллекторами и патрубками для входа и выхода охладителя, топливные горелки расположены в нижней части боковых стенок корпуса на расстоянии 0,2–0,3 м от уровня подины камеры и укреплены на трубопроводе для подачи в нее сжигаемого агента, а устройства для удаления продуктов сжигания выполнены в виде патрубка для отвода дымовых газов, укрепленного на своде камеры» [16].

Расчёт габаритов камеры сжигания.

Исходные данные для расчета: производительность печи 500 кг/ч; температурный режим 1150 °С; коэффициент напряженности пода 270 кг/м·ч.

Основными размерами рабочего пространства печи являются ширина, длина и высота.

Размеры рабочего пространства печи определяют исходя из следующих положений:

– размеры пода печи (ширина и длина) при выбранном расположении отходов должны соответствовать заданной производительности печи;

– высота рабочего пространства печи должна обеспечивать такой ее объем, при котором достигается полное горение.

Размер пода печи при заданной производительности, м^2, можно определить из выражения по формуле (1) [11]:

$$F_{\text{п}} = \frac{G}{K}, \qquad (1)$$

где G – производительность печи, кг/ч;

К – коэффициент напряженности пода, кг/м^2·ч, находится в пределах 270–400 кг/м·ч.

Рассчитаем размер пода печи при заданной производительности, м^2, по формуле (1):

$$F_{\text{п}} = \frac{500}{270} = 1{,}9 \text{ м}^2$$

Более точный размер пода рабочего пространства печи принимаем как √1,9 м^2, следовательно, длина и ширина рабочего пространства составляет 1,3 м.

Высоту рабочего пространства печи можно определить по формуле (2) [11]:

$$H = (A + 0{,}5 \cdot B) \cdot t_{\text{г}} \cdot 10^{-3}, \qquad (2)$$

где А – коэффициент, равный 0,6–0,65 для печи с $t_г$ > 1000 °С;

В – ширина пода печи, м;

$t_г$ – температура печных газов, °С .

Рассчитаем высоту рабочего пространства печи по формуле (2):

$$H = (0{,}65 + 0{,}5 \cdot 1{,}3) \cdot 1150 \cdot 10^{-3} = 1{,}5 \text{ м}$$

Следовательно, высота камеры сжигания составляет 1,5 м, а длина и ширина камеры составляет 1,3 м.

Необходимо подобрать систему очистки от загрязняющих веществ. Для достижения эффективной очистки газов после сжигания ТКО был проведен

патентный поиск, представленный в Приложении Д в таблице Д.1 [14], [18], [19], [23].

Наиболее эффективным и менее энергозатратным методом очистки большого объема запыленного газа подходит 4 патент, так как применяются наиболее распространенные и простые в использовании аппараты. Дополнительное преимущество заключается в том, что предложенные аппараты очистки газов производятся на территории РФ, а именно: циклоны ЦН–15 производятся в Челябинской области на предприятии ООО ПП«УралМетХолдинг», абсорберы производятся в республике Удмуртия на предприятии «НПО Центр ШВ». Система многоступенчатой очистки газов не зависит от иностранного производителя [1].

На рисунке 2 представлена общая схема очистки дымовых газов.

Рисунок 2 – Схема общей очистки дымовых газов

Отходам необходимо пройти грохочение, после чего продукт подвергается дроблению. Максимальный размер фракций на входе должен составлять до 300 мм (при данном фракционном размере крупные и мелкие частицы при одинаковой скорости не будут подниматься вверх и оседать в кипящем слое соответственно [27]). После прохождения отходов через дробилку, отходы повторно проходят грохочение. «Грохочение и дробление реализуется с целью получения определенного размера отходов, так как при однородном фракционном размере достигается интенсивное распределение частиц в печи, и равномерное горение отходов, что повышает КПД печи (0,8–0,9)» [35].

«В конусных дробилках дробление происходит методом раздавливания и истирания между двумя усеченными конусами (в конусных дробилках для среднего и мелкого дробления оба конуса расположены вершинами вверх)» [2].

На рисунке Е.1 в Приложении Е представлена схема конусной дробилки [32]. «В конусной дробилке для среднего дробления материал подается на дробление через приемное отверстие на распределительную плиту (тарелку). Тарелка, вращаясь вместе с валом, сбрасывает материал в рабочее пространство между неподвижным и подвижным конусами. Регулирование разгрузочного отверстия гидравлическое. При попадании в дробилку недробимых тел разгрузочное отверстие раскрывается сжатием пружин за счет сброса давления под опорой вала с помощью специальной гидравлической системы» [2]. После дробления отходы направляются в бункер, из которого происходит загрузка в камеру сжигания.

Среднее образование несанкционированных свалок в год, следуя из таблицы 1, 4 кубометра в год. Средняя плотность свалки составляет 200 кг/м^3, следовательно, общая масса образования несанкционированных свалок составляет 800000 кг., или 800 т. При производительности 8 т\сут., камера способна утилизировать все образовавшиеся несанкционированные свалки за 1 год.

1.4 Аппаратная часть системы многоступенчатой очистки дымовых газов

Циклон.

Циклон – аппарат, предназначенный для очистки запыленных газов от взвешенных частиц.

Схема циклона представлена в Приложении Ж на рисунке Ж.1 [34].

Принцип работы циклона заключается в том, что запыленный неочищенный газ поступает в аппарат через завихритель совершая

вращательно–поступательное движение. Взвешенные частицы, содержащиеся в газе под действием инерции, смещаются по касательным к стенкам корпуса, в последствии чего, под действием силы тяжести, опускаются вниз, попадая в пылеприемник [31]. «Аппарат рассчитан на работу при давлении до 2500 Па. [5].

«Главные достоинства циклона заключаются в отсутствии подвижных механизмов, что обуславливается простотой технологической конструкции; устойчивости к высоким температурам и высокому давлению (до 400°C и 2500 Па соответственно); защите аппарата и его механизмов от повреждения (коррозии) путем нанесения специального покрытия (к примеру, цинкового покрытия)» [31].

«Главные недостатки циклона заключаются низкой эффективности аппарата при слишком малых размерах частиц; слипающейся пыли, понижающая эффективность циклона; повышении износа внутренних механизмов при наличии абразивных частиц» [5].

Аппарат мокро–сухой газоочистки (абсорбер).

«Далее дымовые газы поступают в абсорбер, где за счет контакта с NaOH, происходит очистка газа» [32].

«В абсорбере насадка укладывается на опорные решетки, имеющие отверстия для прохождения газа и стока жидкости. Последняя с помощью распределителя равномерно орошает насадочные тела и стекает вниз» [31].

Схема абсорбера приведена в Приложении Ж на рисунке Ж.2 [31]. «Размеры абсорбера выбраны таким образом, что обеспечивается достаточная продолжительность химических реакций» [32].

Вывод: была проанализирована масштабность загрязнения несанкционированными свалками г.о. Тольятти, проанализирован выбранный технический процесс термической переработки ТКО, проанализирована патентная литература и выбрана подходящая камера термической переработки. Была подобрана многоступенчатая очистка дымовых газов.

2 Расчетная часть предлагаемого технологического решения по переработке ТКО термическим способом

2.1 Расчет материального баланса

Данные элементного состава ТКО представлены в дипломном проекте «Проектирование технологической линии газоочистки МСЗ №4 Руднево» [27]. Температурный режим выбран согласно представленной камеры сжигания ТКО.

Элементный состав, влажность, зольность и выход летучих продуктов различных фракций ТКО приведен в таблице 2. Расчет компонентного состава ТКО необходимо провести для определения общего содержания компонентов в отходах и дальнейшего расчета выхода дымовых газов после процесса сжигания, и тепла, затрачиваемого сжигание [27].

Таблица 2 – Компонентный состав ТКО

Отход	n	in	Элементный состав отходов, %					Wn, %	Acn, %
			C	H	O	N	S		
Макулатура	1	0,0433	46.2	6.2	47.1	0.3	0.2	10,24	5.38
Пищевые отходы	2	0,3030	53.6	7.7	34.1	4.0	0.6	72.0	4.48
Текстиль	3	0.0368	56.1	6.8	32.2	4.8	0.1	10.0	2.2
Пластик	4	0,1905	67.7	9.3	21.5	1.1	0.4	2.0	10.0
Кожа/резина	5	0,0130	77.9	6.0	15.1	0.3	0.7	1.2	9.88
Дерево	6	0.0108	51.0	6.1	42.6	0.2	0.1	20.0	0.8
Отсев	7	0,4026	46.4	6.3	47.0	0	0.3	20.0	20.0

где n – номер отдельного компонента ТКО;

in – массовая доли соответствующих компонентов в общей массе ТКО;

C, H, O, N, S – содержание углерода, водорода, кислорода, азота и серы в каждом компоненте ТКО, %;

W_n, A_{cn} – влажность и зольность каждого компонента ТКО, %.

Общая влажность ТКО $\sum W_n$, %, по формуле (3) [27]:

$$\sum W_n = \sum_{n=1}^{10} in \cdot W_n, \tag{3}$$

где W_n – влажность n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО., масс. доля.

Рассчитаем общую влажность ТКО $\sum W_n$, %, по формуле (3):

$$\sum W_n = \sum_{n=1}^{10} in \cdot W_n = 0{,}0433 \cdot 10{,}24 + 0{,}3030 \cdot 72{,}0 + 0{,}0368 \cdot 10{,}0 +$$
$$+0{,}1905 \cdot 2{,}0 + 0{,}0130 \cdot 1{,}2 + 0{,}0108 \cdot 20{,}0 + 0{,}4026 \cdot 20{,}0 = 31{,}29\ \%$$

Общая зольность на сухую массу $\sum A_{cn}$, %, по формуле (4) [27]:

$$\sum A_n = \sum_{n=1}^{10} in \cdot A_{cn}, \tag{4}$$

где A_{cn} – зольность на сухую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО., масс. доля.

Рассчитаем общую зольность на сухую массу $\sum A_{cn}$, %, по формуле (4):

$$\sum A_n = \sum_{n=1}^{10} in \cdot A_{cn} = 0{,}0433 \cdot 5{,}38 + 0{,}3030 \cdot 4{,}48 + 0{,}0368 \cdot 2{,}2 +$$
$$+0{,}1905 \cdot 10{,}0 + 0{,}0130 \cdot 9{,}88 + 0{,}0108 \cdot 0{,}8 + 0{,}4026 \cdot 20{,}0 = 11{,}77\ \%$$

Зольность на рабочую массу для каждого компонента A_{pn}, %, по формуле (5) [27]:

$$A_{pn} = A_{cn} \cdot \frac{(100 - W_n)}{100}, \quad (5)$$

где A_{cn} – зольность на сухую массу n–го компонента ТКО, %;

W_n – влажность n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем зольность на рабочую массу для каждого компонента A_{pn}, %, по формуле (5):

$$A_{p1} = 5{,}38 \cdot \frac{(100 - 10{,}24)}{100} = 4{,}83\ \%,$$

$$A_{p2} = 4{,}48 \cdot \frac{(100 - 72{,}0)}{100} = 1{,}25\ \%,$$

$$A_{p3} = 2{,}20 \cdot \frac{(100 - 10{,}0)}{100} = 1{,}98\ \%,$$

$$A_{p4} = 10{,}0 \cdot \frac{(100 - 2{,}0)}{100} = 9{,}8\ \%,$$

$$A_{p5} = 9{,}88 \cdot \frac{(100 - 1{,}2)}{100} = 9{,}76\ \%,$$

$$A_{p6} = 0{,}80 \cdot \frac{(100 - 20{,}0)}{100} = 0{,}64\ \%,$$

$$A_{p7} = 20{,}0 \cdot \frac{(100 - 20{,}0)}{100} = 16\ \%$$

Общая зольность на рабочую массу $\sum A_p$, %, по формуле (6) [27]:

$$\sum A_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot A_{pn}, \quad (6)$$

где A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО, масс. доля.

Рассчитаем общую зольность на рабочую массу $\sum A_p$, %, по формуле (6):

$$\sum A_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot A_{pn} = 0{,}0433 \cdot 4{,}83 + 0{,}3030 \cdot 1{,}25 + 0{,}0368 \cdot 1{,}98 +$$

$$+0{,}1905 \cdot 9{,}8 + 0{,}0130 \cdot 9{,}76 + 0{,}0108 \cdot 0{,}64 + 0{,}4026 \cdot 16 = 9{,}10\ \%$$

Содержание углерода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу C_n, %, по формуле (7) [27]:

$$\mathrm{C_{pn}} = \mathrm{C_n} \cdot \frac{(100 - \mathrm{W_n} - \mathrm{A_{pn}})}{100}, \qquad (7)$$

где C_n – содержание углерода на горючую массу в каждом компоненте ТКО, %;

W_n – влажность n–го компонента ТКО, %;

A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем содержание углерода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу C_n, %, по формуле (7):

$$C_{p1} = 46{,}2 \cdot \frac{(100 - 10{,}24 - 4{,}83)}{100} = 39{,}24\ \%,$$

$$C_{p2} = 53{,}6 \cdot \frac{(100 - 72{,}0 - 1{,}25)}{100} = 14{,}34\ \%,$$

$$C_{p3} = 56{,}1 \cdot \frac{(100 - 10{,}0 - 1{,}98)}{100} = 49{,}38\ \%,$$

$$C_{p4} = 67{,}7 \cdot \frac{(100 - 2{,}0 - 9{,}8)}{100} = 59{,}71\ \%,$$

$$C_{p5} = 77{,}9 \cdot \frac{(100 - 1{,}2 - 9{,}76)}{100} = 69{,}36\ \%,$$

$$C_{p6} = 51{,}0 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 0{,}64)}{100} = 40{,}47\ \%,$$

$$C_{p7} = 46{,}4 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 16{,}0)}{100} = 29{,}7\ \%$$

Общее содержание углерода в ТКО на рабочую массу $\sum C_{pn}$, %, по формуле (8) [27]:

$$\sum C_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot C_{pn}, \tag{8}$$

где C_{pn} – содержание углерода на рабочую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО., масс. доля.

Рассчитаем общее содержание углерода в ТКО на рабочую массу $\sum C_{pn}$, %, по формуле (8):

$$\sum C_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot C_{pn} = 0{,}0433 \cdot 39{,}24 + 0{,}3030 \cdot 14{,}34 + 0{,}0368 \cdot 49{,}38 +$$
$$+0{,}1905 \cdot 59{,}71 + 0{,}0130 \cdot 69{,}36 + 0{,}0108 \cdot 40{,}47 + 0{,}4026 \cdot 29{,}7 = 32{,}53\ \%$$

Содержание водорода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу H_{pn}, %, по формуле (9) [27]:

$$H_{pn} = H_n \cdot \frac{(100 - W_n - A_{pn})}{100}, \tag{9}$$

где H_n – содержание водорода на горючую массу в каждом компоненте ТКО, %;

W_n, – влажность n–го компонента ТКО, %;

A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем содержание водорода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу H_{pn}, %, по формуле (9):

$$H_{p1} = 6{,}2 \cdot \frac{(100 - 10{,}24 - 4{,}83)}{100} = 5{,}27\ \%,$$

$$H_{p2} = 7{,}7 \cdot \frac{(100 - 72{,}0 - 1{,}25)}{100} = 2{,}06\ \%,$$

$$H_{p3} = 6{,}8 \cdot \frac{(100 - 10{,}0 - 1{,}98)}{100} = 5{,}99\ \%,$$

$$H_{p4} = 9{,}3 \cdot \frac{(100 - 2{,}0 - 9{,}8)}{100} = 8{,}2\ \%,$$

$$H_{p5} = 6{,}0 \cdot \frac{(100 - 1{,}2 - 9{,}76)}{100} = 5{,}34\ \%,$$

$$H_{p6} = 6{,}1 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 0{,}64)}{100} = 4{,}84\ \%,$$

$$H_{p7} = 6{,}3 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 16{,}0)}{100} = 4{,}03\ \%$$

Общее содержание водорода в ТКО на рабочую массу, $\sum H_{pn}$, %, по формуле (10) [27]:

$$\sum H_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot H_{pn}, \tag{10}$$

где H_{pn} – содержание водорода на рабочую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО, масс. доля.

Рассчитаем общее содержание водорода в ТКО на рабочую массу, $\sum H_{pn}$, %, по формуле (10):

$$\sum H_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot H_{pn} = 0{,}0433 \cdot 5{,}27 + 0{,}3030 \cdot 2{,}06 + 0{,}0368 \cdot 5{,}99 +$$

$$+0{,}1905 \cdot 8{,}20 + 0{,}0130 \cdot 5{,}34 + 0{,}0108 \cdot 4{,}84 + 0{,}4026 \cdot 4{,}03 = 4{,}85\ \%$$

Содержание кислорода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу O_{pn}, %, по формуле (11) [27]:

$$O_{pn} = O_n \cdot \frac{(100 - W_n - A_{pn})}{100}, \quad (11)$$

где O_n – содержание кислорода на горючую массу в каждом компоненте ТКО, %;

W_n, – влажность n–го компонента ТКО, %;

A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем содержание кислорода в каждом компоненте ТКО на рабочую массу O_{pn}, %, по формуле (11):

$$O_{p1} = 47{,}1 \cdot \frac{(100 - 10{,}24 - 4{,}83)}{100} = 40\ \%,$$

$$O_{p2} = 34{,}1 \cdot \frac{(100 - 72{,}0 - 1{,}25)}{100} = 9{,}12\ \%,$$

$$O_{p3} = 32{,}2 \cdot \frac{(100 - 10{,}0 - 1{,}98)}{100} = 28{,}34\ \%,$$

$$O_{p4} = 21{,}5 \cdot \frac{(100 - 2{,}0 - 9{,}8)}{100} = 18{,}96\ \%,$$

$$O_{p5} = 15{,}1 \cdot \frac{(100 - 1{,}2 - 9{,}76)}{100} = 13{,}45\ \%,$$

$$O_{p6} = 42{,}6 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 0{,}64)}{100} = 33{,}81\ \%,$$

$$O_{p7} = 47{,}0 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 16{,}0)}{100} = 30{,}08\ \%$$

Общее содержание кислорода в ТКО на рабочую массу $\sum O_{pn}$, %, по формуле (12) [27]:

$$\sum O_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot O_{pn}, \quad (12)$$

где O_{pn} – содержание кислорода на рабочую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО, масс. доля.

Рассчитаем общее содержание кислорода в ТКО на рабочую массу $\sum O_{pn}$, %, по формуле (12):

$$\sum O_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot O_{pn} = 0{,}0433 \cdot 40 + 0{,}3030 \cdot 9{,}12 + 0{,}0368 \cdot 28{,}34 +$$
$$+0{,}1905 \cdot 18{,}96 + 0{,}0130 \cdot 13{,}45 + 0{,}0108 \cdot 33{,}81 + 0{,}4026 \cdot 30{,}08 =$$
$$= 21{,}80\ \%$$

Содержание азота в каждом компоненте ТКО на рабочую массу N_{pn}, %, по формуле (13) [27]:

$$N_{pn} = N_n \cdot \frac{(100 - W_n - A_{pn})}{100}, \quad (13)$$

где N_n – содержание азота на горючую массу в каждом компоненте ТКО, %;

W_n, – влажность n–го компонента ТКО, %;

A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем содержание азота в каждом компоненте ТКО на рабочую массу N_{pn}, %, по формуле (13):

$$N_{p1} = 0{,}3 \cdot \frac{(100 - 10{,}24 - 4{,}83)}{100} = 0{,}25\ \%,$$

$$N_{p2} = 4{,}0 \cdot \frac{(100 - 72{,}0 - 1{,}25)}{100} = 1{,}07\ \%,$$

$$N_{p3} = 4{,}8 \cdot \frac{(100 - 10{,}0 - 1{,}98)}{100} = 4{,}22\ \%,$$

$$N_{p4} = 1{,}1 \cdot \frac{(100 - 2{,}0 - 9{,}8)}{100} = 0{,}97\ \%,$$

$$N_{p5} = 0{,}3 \cdot \frac{(100 - 1{,}2 - 9{,}76)}{100} = 0{,}27\ \%,$$

$$N_{p6} = 0{,}2 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 0{,}64)}{100} = 0{,}16\ \%,$$

$$N_{p7} = 0 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 16)}{100} = 0\ \%$$

Общее содержание азота в ТКО на рабочую массу массу $\sum N_{pn}$, %, по формуле (14) [27]:

$$\sum N_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot N_{pn}, \tag{14}$$

где N_{pn} – содержание азота на рабочую массу n–го компонента ТКО, %;

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО., масс. доля.

Рассчитаем общее содержание азота в ТКО на рабочую массу массу $\sum N_{pn}$, %, по формуле (14):

$$\sum N_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot N_{pn} = 0{,}0433 \cdot 0{,}25 + 0{,}3030 \cdot 1{,}07 + 0{,}0368 \cdot 4{,}22 +$$

$$+0{,}1905 \cdot 0{,}97 + 0{,}0130 \cdot 0{,}27 + 0{,}0108 \cdot 0{,}16 + 0{,}4026 \cdot 0 = 0{,}68\ \%$$

Содержание серы в каждом компоненте ТКО на рабочую массу S_{pn}, %, по формуле (15) [27]:

$$S_{pn} = S_n \cdot \frac{(100 - W_n - A_{pn})}{100}, \quad (15)$$

где S_n – содержание серы на горючую массу в каждом компоненте ТКО, %;

W_n – влажность n–го компонента ТКО, %;

A_{pn} – зольность на рабочую массу n–го компонента ТКО, %.

Рассчитаем содержание серы в каждом компоненте ТКО на рабочую массу S_{pn}, %, по формуле (15):

$$S_{p1} = 0{,}2 \cdot \frac{(100 - 10{,}24 - 4{,}83)}{100} = 0{,}17\ \%,$$

$$S_{p2} = 0{,}6 \cdot \frac{(100 - 72{,}0 - 1{,}25)}{100} = 0{,}16\ \%,$$

$$S_{p3} = 0{,}1 \cdot \frac{(100 - 10{,}0 - 1{,}98)}{100} = 0{,}09\ \%,$$

$$S_{p4} = 0{,}4 \cdot \frac{(100 - 2{,}0 - 9{,}8)}{100} = 0{,}35\ \%,$$

$$S_{p5} = 0{,}7 \cdot \frac{(100 - 1{,}2 - 9{,}76)}{100} = 0{,}62\ \%,$$

$$S_{p6} = 0{,}1 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 0{,}64)}{100} = 0{,}08\ \%,$$

$$S_{p7} = 0{,}3 \cdot \frac{(100 - 20{,}0 - 16{,}0)}{100} = 0{,}19\ \%$$

Общее содержание серы в ТКО на рабочую массу $\sum S_{pn}$, %, по формуле (16) [27]:

$$\sum S_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot S_{pn}, \quad (16)$$

где S_{pn} – содержание серы на рабочую массу n–го компонента ТКО, %

in – массовая доля n–го компонента общей массе ТКО., масс. доля

Рассчитаем общее содержание серы в ТКО на рабочую массу $\sum S_{pn}$, %, по формуле (16):

$$\sum S_{pn} = \sum_{n=1}^{10} in \cdot S_{pn} = 0{,}0433 \cdot 0{,}17 + 0{,}3030 \cdot 0{,}16 + 0{,}0368 \cdot 0{,}09 +$$
$$+0{,}1905 \cdot 0{,}35 + 0{,}0130 \cdot 0{,}62 + 0{,}0108 \cdot 0{,}08 + 0{,}4026 \cdot 0{,}19 = 0{,}21\ \%$$

Удельная низшая теплота сгорания ТКО на рабочую массу $Q_{\text{н}}^{p}$ определяется по формуле Менделеева, кДж/кг, по формуле (17) [27]:

$$Q_{\text{н}}^{p} = 339\text{C} + 1030H - 109(O - S) - 25(H + W), \qquad (17)$$

где C – общее содержание углерода в ТКО, %;

H – общее содержание водорода в ТКО, %;

O – общее содержание кислорода в ТКО, %;

S – общее содержание серы в ТКО, %;

W – общая влажность ТКО, %.

Рассчитаем удельную низшую теплоту сгорания ТКО на рабочую массу $Q_{\text{н}}^{p}$ определяется по формуле Менделеева, кДж/кг, по формуле (17):

$$Q_{\text{н}}^{p} = 339 \cdot 32{,}53 + 1030 \cdot 4{,}85 - 109 \cdot (21{,}80 - 0{,}21) - 25 \times$$
$$\times (4{,}85 + 31{,}29) = 12766\ \text{кДж/кг}$$

Исходные потоки:

G_1 – Твердые коммунальные отходы (ТКО), приведенные в таблице 5;

G_2 – Топливо, природный газ (рассчитывается далее);

G_3 – Воздух (рассчитывается далее);

G_4 – Песок (200 кг);

Конечные потоки:

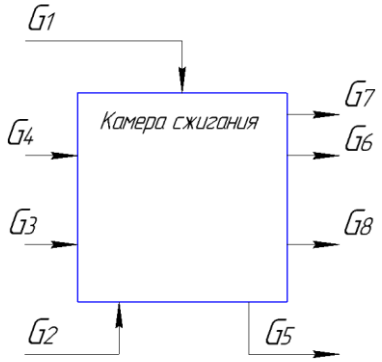
G_5 – шлак;

G_6 – летучая зола;

G_7 – дымовые газы (CO_2, SO_2, N_2, $H_2O_{(пар)}$);

G_8 – Песок (рециркуляция, рассчитывается далее).

На рисунке 3 представлена Схема материального баланса камеры сжигания.



G_1 – масса ТКО поступающая на сжигание; G_2 – топливо (природный газ); G_3 – расход воздуха; G_4 – песок; G_5 – шлак; G_6 – летучая зола; G_7 – дымовые газы; G_8 – песок (рециркуляция)

Рисунок 3 – Схема материального баланса камеры сжигания

Исходные данные:

Массовая производительность по ТКО, кг/час.

Масса ТКО поступающая на сжигание, кг/ч, G_1 = 462 кг/ч.

Низшая теплота сгорания сухой массы ТКО, МДж/кг, $Q_н^р$ = 12,766 МДж/кг.

Элементный состав ТКО, рассчитанный ранее, представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Элементный состав ТКО

Компонент	Обозначение	Рабочая масса ТКО, %
Углерод	C	32,53
Водород	H	4,85

Продолжение таблицы 3

Компонент	Обозначение	Рабочая масса ТКО, %
Кислород	O	21,80
Азот	N	0,68
Сера	S	0,21
Зольность	A	9,10
Влажность	W	31,29

Массовая доля компонента в воздухе:

Кислород – $O_{2в}$ = 0,21;

Азот – $N_{2в}$ = 0,78.

Температура исходных ТКО, °С:

t_0 = 20 °С.

Температура песка на входе в камеру, °С:

$t_п$ = 20 °С.

Температура воздуха на входе в камеру, °С:

$t_в$ = 20 °С.

Температура слоя на входе в камеру, °С:

$t_{сл1}$ = 250 °С.

Температура слоя на выходе из камеры, °С:

$t_{сл2}$ = 950 °С.

Температура шлака на выходе из камеры, °С:

$t_{по}$ = 950 °С.

Температура золы на выходе из камеры, °С:

$t_{ун}$ = 1150 °С.

Температура дымовых газов на выходе из камеры, °С:

$t_{дг}$ = 1150 °С.

Расчетные данные:

Производительность камеры на сухую массу ТКО, кг/час, по формуле (18) [27]:

$$m_{\text{сух}} = \frac{100 - W}{100} \cdot 18{,}48C, \tag{18}$$

где W – общая влажность ТКО, %;

C – общее содержание углерода в ТКО на рабочую массу, %.

Рассчитаем производительность камеры на сухую массу ТКО, кг/час, по формуле (18):

$$m_{\text{сух}} = \frac{100 - 31{,}29}{100} \cdot 18{,}48 \cdot 32{,}53 = 413{,}05 \text{ кг/час}$$

Массовая производительность камеры по испаряемой влаге, кг/час, по формуле (19) [27]:

$$m_{\text{вл}} = \frac{W}{100} \cdot 23{,}1O, \tag{19}$$

где W – общая влажность ТКО, %;

O – общее содержание кислорода в ТКО на рабочую массу, %.

Рассчитаем массовую производительность камеры по испаряемой влаге, кг/час, по формуле (19):

$$m_{\text{вл}} = \frac{31{,}29}{100} \cdot 23{,}1 \cdot 21{,}80 = 151{,}57 \text{ кг/час}$$

Количество песка на входе, кг/час:

G_4 = 200 кг/час.

Потеря песка (уходит в золошлак) за один час составляет 15 % от общей массы, следовательно, расход, кг/ч, определяется по формуле (20):

$$m_{\text{п2}} = G_4 \cdot 0{,}15 \tag{20}$$

Рассчитаем потери песка, кг/ч, по формуле (20):

$$m_{п2} = 200 \cdot 0{,}15 = 30 \text{ кг/ч}$$

Следовательно, рециркуляция песка G_8 составляет 170 кг/ч.

Массовый выход золошлака, кг/час, по формуле (21) [27]:

$$m_{зол} = \frac{A}{100} \cdot 23{,}1O + m_{п2}, \tag{21}$$

где А – общая зольность на рабочую массу, %;

О – общее содержание кислорода в ТКО на рабочую массу, %.

Рассчитаем массовый выход золошлака, кг/час, по формуле (21):

$$m_{зол} = \frac{9{,}10}{100} \cdot 23{,}1 \cdot 21{,}80 + 30 = 75{,}83 \text{ кг/час}$$

В том числе:

Шлак по формуле (22) [27]:

$$G_5 = K_{пр} \cdot m_{зол}, \tag{22}$$

Рассчитаем шлак по формуле (22):

$$G_5 = 0{,}43 \cdot 75{,}83 = 32{,}61 \text{ кг/час}$$

Золы по формуле (23) [27]:

$$G_6 = K_{ун} \cdot m_{зол}, \tag{23}$$

Рассчитаем золу по формуле (23):

$$G_6 = 0{,}57 \cdot 75{,}83 = 43{,}22 \text{ кг/час}$$

Общий массовый выход твердых частиц, кг/час, по формуле (24) [27]:

$$m_{\text{тв}} = m_{\text{зол}} + G_8, \tag{24}$$

Рассчитаем общий массовый выход твердых частиц, кг/час, по формуле (24):

$$m_{\text{тв}} = 75{,}83 + 170 = 245{,}83 \text{ кг/час}$$

В том числе:

Выход из слоя по формуле (25) [27]:

$$m_{\text{твсл}} = K_{\text{пр}} \cdot m_{\text{тв}}, \tag{25}$$

Рассчитаем выход из слоя по формуле (25):

$$m_{\text{твсл}} = 0{,}43 \cdot 245{,}83 = 105{,}71 \text{ кг/час}$$

Унос частиц по формуле (26) [27]:

$$m_{\text{твун}} = K_{\text{ун}} \cdot m_{\text{тв}}, \tag{26}$$

Рассчитаем унос частиц по формуле (26):

$$m_{\text{твун}} = 0{,}57 \cdot 245{,}83 = 140{,}12 \text{ кг/час}$$

где $К_{ун}$, $К_{пр}$ – коэффициенты, для камеры кипящего слоя равны:

$К_{ун}$ = 0,57;

$К_{пр}$ = 0,43.

Контейнер под золошлаковые отходы для недельной загрузки определяется по формуле (27):

$$V_к = \frac{m_{зол} \cdot 7 \cdot 16}{\rho_{зол}}, \quad (27)$$

где $m_{зол}$ – масса образующейся золы, кг/ч;

$\rho_{зол}$ – плотность образующейся золы, кг/м^3.

Рассчитаем объем контейнера под золошлаковые отходы по формуле (27):

$$V_к = \frac{75{,}83 \cdot 7 \cdot 16}{200} = 26 \text{ м}^3$$

Теоретический массовый расход воздуха на сжигание ТКО, кг/час, по формуле (28) [27]:

$$m_{в0} = G_1 \cdot (0{,}115 \cdot C + 0{,}343 \cdot H + 0{,}043 \cdot S - 0{,}043 \cdot O), \quad (28)$$

где C – общее содержание углерода в ТКО, %;

H – общее содержание водорода в ТКО, %;

S – общее содержание меры в ТКО, %;

O – общее содержание кислорода в ТКО, %.

Рассчитаем теоретический массовый расход воздуха на сжигание ТКО, кг/час, по формуле (28):

$$m_{в0} = 462 \cdot (0{,}115 \cdot 32{,}53 + 0{,}343 \cdot 4{,}85 + 0{,}043 \cdot 0{,}21 - 0{,}043 \cdot 21{,}80) =$$
$$= 2067{,}97 \text{ кг/час}$$

Коэффициент избытка воздуха на сжигание ТКО:

$\alpha_0 = 0{,}8$

Действительный массовый расход воздуха на сжигание ТКО, кг/час, по формуле (29) [27]:

$$G_3 = \alpha_0 \cdot m_{в0}, \quad (29)$$

Рассчитаем действительный массовый расход воздуха на сжигание ТКО, кг/час, по формуле (29):

$$G_3 = 0{,}8 \cdot 2067{,}97 = 1654{,}38 \text{ кг/час}$$

Массовый выход газообразных продуктов сгорания ТКО, кг/час, по формуле (30) [27]:

$$G_7 = m_{CO2} + m_{SO2} + m_{N2} + m_{H2O}, \quad (30)$$

Рассчитаем массовый выход газообразных продуктов сгорания ТКО, кг/час, по формуле (30):

$$G_7 = 551{,}56 + 1{,}34 + 1109 + 354{,}99 = 2016{,}9 \text{ кг/час}$$

В том числе:

Двуокись углерода CO_2 по формуле (31) [27]:

$$m_{CO2} = 0{,}0367 \cdot CO2 \cdot G_1, \quad (31)$$

Рассчитаем двуокись углерода CO_2 по формуле (31):

$$m_{CO2} = 0{,}0367 \cdot 32{,}53 \cdot 462 = 551{,}56 \text{ кг/час}$$

Оксид серы SO_2 по формуле (32) [27]:

$$m_{SO2} = 0{,}0138 \cdot SO2 \cdot G_1, \quad (32)$$

Рассчитаем оксид серы SO_2 по формуле (32):

$$m_{SO2} = 0{,}0138 \cdot 0{,}21 \cdot 462 = 1{,}34 \text{ кг/час}$$

Азот N_2 по формуле (33) [27]:

$$m_{N2} = 0{,}9 \cdot G_3 \cdot N_{2\text{в}} + \frac{N2}{100} \cdot G_1, \quad (33)$$

Рассчитаем азот N_2 по формуле (33):

$$m_{N2} = 0{,}9 \cdot 1654{,}38 \cdot 0{,}78 + \frac{0{,}68}{100} \cdot 462 = 1164 \text{ кг/час}$$

Водяного пара H_2O по формуле (34) [27]:

$$m_{H2O} = (0{,}11 \cdot H + 0{,}01 \cdot W) \cdot G_1, \quad (34)$$

Рассчитаем водяной пар H_2O по формуле (34):

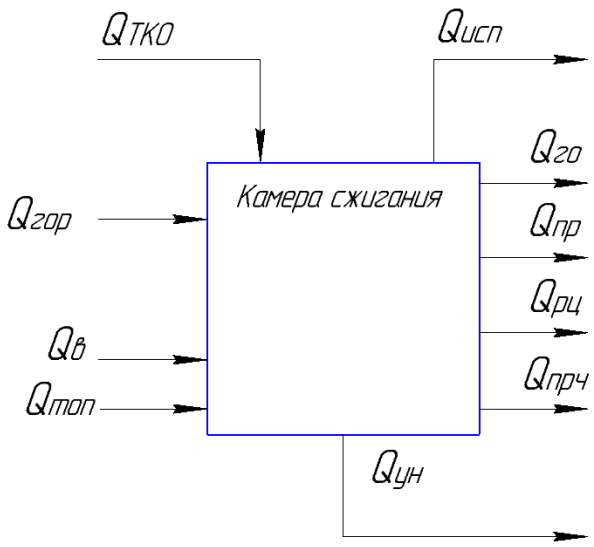
$$m_{H2O} = (0{,}1 \cdot 4{,}68 + 0{,}01 \cdot 31{,}29) \cdot 462 = 354{,}99 \text{ кг/час}$$

После процесса сжигания отходов дымовой газ проходит многоступенчатую очистку газов.

2.2 Тепловой баланс камеры сжигания отходов

На выбранную массу 462 кг/ч был произведен расчет теплового баланса.

На рисунке 4 представлена схема потоков теплового баланса камеры сжигания.



$Q_{гор}$ – тепловая мощность, выделяемая при горении ТКО; $Q_{ТКО}$ – тепловая мощность, вносимая ТКО; $Q_{в}$ – тепловая мощность, вносимая дутьевым воздухом; $Q_{ун}$ – тепловая мощность, теряемая с выносимой из камеры золой и пылью; $Q_{исп}$ – тепловая мощность, расходуемая на испарение влаги ТКО; $Q_{го}$ – тепловая мощность, теряемая с газообразными продуктами сгорания; $Q_{пр}$ – тепловая мощность, теряемая с золой; $Q_{рц}$ – тепловая мощность, теряемая за счет рециркуляции материала кипящего слоя; $Q_{прч}$ – Прочие потери тепловой мощности (в окружающую среду, недожог ТКО, разрушение связанной влаги и пр.); $Q_{топ}$ – тепловая мощность, сносимая топливом

Рисунок 4 – Схема теплового баланса камеры сжигания

Тепловая мощность, расходуемая на испарение влаги ТКО, Вт, по формуле (35) [27]:

$$Q_{исп} = \frac{m_{вл}}{3600} \cdot Q_{исп}, \qquad (35)$$

где $Q_{исп}$ – удельная теплота испарения воды, равная $Q_{исп} = 2{,}51 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Рассчитаем тепловая мощность, расходуемая на испарение влаги ТКО, Вт, по формуле (35):

$$Q_{\text{исп}} = \frac{151{,}57}{3600} \cdot 2{,}51 \cdot 10^6 = 105678 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, теряемая с газообразными продуктами сгорания, Вт, по формуле (36) [27]:

$$Q_{\text{го}} = \sum \frac{m_{i\text{го}} \cdot C_{i\text{го}} \cdot t}{3600}, \tag{36}$$

где C_i – удельная теплоемкость i–го компонента продуктов сгорания при температуре 1150 °С, Дж/(кг·К), равная:

$C_{CO2/SO2} = 1{,}102 \cdot 10^3$;

$C_{N2} = 1{,}1 \cdot 10^3$;

$C_{H2O} = 2{,}11 \cdot 10^3$ [27].

Рассчитаем тепловую мощность, теряемая с газообразными продуктами сгорания, Вт, по формуле (36):

$$Q_{\text{го}} = \frac{552{,}9}{3600} \cdot 1{,}102 \cdot 10^3 \cdot 1150 + \frac{1109}{3600} \cdot 1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 1150 + \frac{354{,}99}{3600} \cdot 2{,}11 \times$$
$$\times 10^3 \cdot 1150 = 811467 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, теряемая с выносимой из камеры частиц, Вт, по формуле (37) [27]:

$$Q_{\text{ун}} = \frac{m_{\text{твун}} \cdot C_{\text{ун}} \cdot t_{\text{ун}}}{3600}, \tag{37}$$

где $C_{\text{ун}}$ – удельная теплоемкость частиц при температуре 1150 °С, Дж/(кг·К), $C_{\text{ун}} = 1{,}1 \cdot 10^3$ [27].

Рассчитаем тепловую мощность, теряемая с выносимой из камеры золой и пылью, Вт, по формуле (37):

$$Q_{\text{ун}} = \frac{140{,}12 \cdot 1{,}1 \cdot 10^3 \cdot 1150}{3600} = 49237 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, теряемая с золой, Вт, по формуле (38) [27]:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{твсл}} \cdot C_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}}{3600}, \quad (38)$$

где $C_{\text{пр}}$ – удельная теплоемкость золы при температуре 950 °С, Дж/(кг·К), $C_{\text{пр}} = 1{,}0 \cdot 10^3$ [27].

Рассчитаем тепловую мощность, теряемая золой, Вт, по формуле (38):

$$Q_{\text{пр}} = \frac{105{,}71 \cdot 1{,}0 \cdot 10^3 \cdot 950}{3600} = 27896 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, теряемая за счет рециркуляции материала кипящего слоя, Вт, по формуле (39) [27]:

$$Q_{\text{рц}} = \frac{m_{\text{п2}} \cdot C_{\text{сл}} \cdot (t_{\text{сл2}} - t_{\text{сл1}})}{3600}, \quad (39)$$

где $m_{\text{рц}}$ – расход материала кипящего слоя на рециркуляцию, $m_{\text{п2}} = 30$ кг/час;

$C_{\text{сл}}$ – удельная теплоемкость материала слоя, Дж/(кг·К), $C_{\text{сл}} = 0{,}8 \cdot 10^3$ [27].

Рассчитаем тепловую мощность, теряемая за счет рециркуляции материала кипящего слоя, Вт, по формуле (39):

$$Q_{\text{рц}} = \frac{30 \cdot 0{,}8 \cdot 10^3 \cdot (1150 - 950)}{3600} = 26667 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, выделяемая при горении ТКО, Вт, по формуле (40) [27]:

$$Q_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}^{p} \cdot m_{\text{сух}}}{5000}, \tag{40}$$

Рассчитаем тепловую мощность, выделяемая при горении ТКО, Вт, по формуле (40):

$$Q_{\text{гор}} = \frac{12766000 \cdot 413{,}05}{4900} = 1054599 \text{ Вт}$$

Тепловая мощность, вносимая ТКО, Вт, по формуле (41) [4]:

$$Q_{\text{ТКО}} = \frac{G_1}{3600} \cdot C_{\text{ТКО}} \cdot t_{\text{ТКО}}, \tag{41}$$

Рассчитаем тепловую мощность, вносимая ТКО, Вт, по формуле (41):

$$Q_{\text{ТКО}} = \frac{462}{3600} \cdot \ 1944 \cdot 20 = 4990 \text{ Вт}$$

где $C_{\text{ТКО}}$ – удельная теплоемкость ТКО при температуре 20 °С, Дж/(кг·К), по формуле (42) [27]:

$$C_{\text{ТКО}} = \frac{100 - W}{100} \cdot C_{\text{сух}} + \frac{W}{100} \cdot C_{H2O}, \tag{42}$$

где C_{H2O} = 4182 Дж/(кг·К);

$C_{\text{сух}}$ = 925,3 Дж/(кг·К) [27].

Рассчитаем удельную теплоемкость ТКО при температуре 20 °С, Дж/(кг·К), по формуле (42):

$$C_{\text{ТКО}} = \frac{100 - 31{,}29}{100} \cdot 925{,}3 + \frac{31{,}29}{100} \cdot 4182 = 1944 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Тепловая мощность, вносимая дутьевым воздухом, Вт, по формуле (43) [27]:

$$Q_{\text{в}} = \frac{G_{\text{З}}}{3600} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}, \tag{43}$$

где $C_{\text{в}}$=1003,5 Дж/(кг·К) [27].

Рассчитаем тепловую мощность, вносимая дутьевым воздухом, Вт, по формуле (43):

$$Q_{\text{в}} = \frac{1654{,}38}{3600} \cdot 1003{,}5 \cdot 20 = 9223 \text{ Вт}$$

Необходим подвод дополнительного тепла. При розжиге камеры необходимо дополнительно подводить топливо (природный газ).

2.3 Расчет топлива

Химический состав и свойства природного газа (топлива) представлены в Приложении И в таблице И.1.

«Определяем теоретический объём воздуха необходимый для сжигания 1 м^3 газа, м^3, по формуле (44)» [27]:

$$V_{0T} = 0{,}0476 \cdot (0{,}5 \cdot CO + 0{,}5 \cdot H_2 + (1 + 0{,}5 \cdot 4) \cdot CH_4 + (2 + 0{,}5 \times \times 6) \cdot C_2H_6 + (3 + 0{,}5 \cdot 8) \cdot C_3H_8 + (4 + 0{,}5 \cdot 12) \cdot C_5H_{12} - O_2, \quad (44)$$

Подставляя значения из таблицы И.1 в формулу (44), получаем:

$$V_{0T} = 0{,}0476 \cdot (0{,}5 \cdot 0 + 0{,}5 \cdot 0 + (1 + 0{,}5 \cdot 4) \cdot 91{,}4 + (2 + 0{,}5 \cdot 6) \cdot 4{,}1 + +(3 + 0{,}5 \cdot 8) \cdot 1{,}9 + (4 + 0{,}5 \cdot 10) \cdot 0{,}6 + (4 + 0{,}5 \cdot 12) \cdot 0 - 0 = 15 \text{ м}^3$$

«Действительный объем воздуха необходимого для сжигания 1 м^3 газа V_0, м^3, по формуле (45)» [27]:

$$V_0 = 1{,}21 \cdot V_{0T}, \quad (45)$$

где V_{0T} – теоретический объем воздуха необходимый для сжигания 1 м^3 газа м^3/ч;

1,21 – коэффициент избытка по сравнению со стехиометрическим соотношением.

Рассчитаем действительный объем воздуха необходимого для сжигания 1 м^3 газа V_0, м^3, по формуле (45):

$$V_0 = 1{,}21 \cdot 15 = 18{,}15 \text{ м}^3$$

«Определяем массу воздуха m_0, кг, по формуле (46)» [27]:

$$m_0 = \rho_0 \cdot V_0, \quad (46)$$

где V_0 – действительный объемный расход воздуха необходимого для сжигания, м^3;

ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3.

Рассчитаем массу воздуха m_0, кг, по формуле (46):

$$m_0 = 1{,}293 \cdot 18{,}15 = 23{,}47 \text{ кг}$$

Определяем массовый выход газообразных продуктов сгорания:

«Диоксида углерода, по формуле (47)» [27]:

$$V_{CO2} = 0{,}01 \cdot 1{,}964 \cdot (CO_2 + 1 \cdot CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + \\ +4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12}), \quad (47)$$

Подставляя значения из таблицы И.1 в формулу (47), получаем:

$$V_{CO2} = 0{,}01 \cdot 1{,}964 \cdot (0{,}7 + 1 \cdot 91{,}4 + 2 \cdot 4{,}1 + 3 \cdot 1{,}9 + 4 \cdot 0{,}6 + 5 \cdot 0) = \\ = 2{,}13 \text{ кг}$$

«Водяного пара, по формуле (48)» [27]:

$$V_{H2O} = 0{,}00089 \cdot ((0{,}5 \cdot 4) \cdot CH_4 + (0{,}5 \cdot 6) \cdot C_2H_6 + (0{,}5 \cdot 8) \times \\ \times C_3H_8 + (0{,}5 \cdot 10) \cdot C_4H_{10} + (0{,}5 \cdot 12) \cdot C_5H_{12} + H_2 + H_2S + 0{,}124 \\ \times \\ \times d_r + 1{,}61 \cdot V_0), \quad (48)$$

Подставляя значения из таблицы И.1 в формулу (48), получаем:

$$V_{H2O} = \begin{pmatrix} (0{,}5 \cdot 4) \cdot 91{,}4 + (0{,}5 \cdot 6) \cdot 4{,}1 + (0{,}5 \cdot 8) \cdot 1{,}9 + (0{,}5 \cdot 10) \cdot \\ \cdot 0{,}6 + (0{,}5 \cdot 12) \cdot 0 + 0 + 0 + 0{,}124 \cdot 10 + 1{,}61 \cdot 18{,}15 \end{pmatrix} \times \\ \times 0{,}00089 = 0{,}21 \text{ кг}$$

«Азота, по формуле (49)» [27]:

$$V_{N2} = 0{,}79 \cdot m_0 + 0{,}01 \cdot 1{,}25 \cdot N_2, \quad (49)$$

Подставляя значения из таблицы И.1 в формулу (49), получаем:

$$V_{N2} = 0{,}79 \cdot 23{,}47 + 0{,}01 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}2 = 18{,}54 \text{ кг}$$

«Из теплового баланса горения определяем необходимое количество топлива, кг/ч, по формуле (50)» [27]:

$$G_2 = (\Phi_{\text{вых}} - \Phi_{\text{вх}})/(Q \cdot 1000 \cdot 1{,}322 - (V_{CO2} \cdot C_{CO2} \cdot t_{\text{вых}} + \\ + V_{N2} \cdot C_{N2} \cdot t_{\text{вых}} + V_{H2O} \cdot C_{H2O} \cdot t_{\text{вых}} + 0{,}21 \cdot m_0 \cdot C_{\text{возд}} \cdot t_{\text{вых}}), \quad (50)$$

где $Q_{вх}$, $Q_{вых}$– тепловой поток вносимый и выносимый в камеру, Вт;

Q – теплотворная способность газа, кДж/кг;

V_{CO2}, V_{N2}, V_{H2O} – массовый выход диоксида углерода, азота, воды (газ) при сгорания п.г., кг;

C_{CO2}, C_{N2}, C_{H2O}, $C_{возд}$ – удельные теплоемкости диоксида углерода, азота, воды (газ) Дж/(кг·град);

$t_{вых}$– температура выходящих дымовых газов, ^{0}C;

m_0 – массовый расход воздуха на сжигание., кг/кг.

Рассчитаем необходимое количество газа, кг/ч, по формуле (50):

$$G_2 = (1071992 - 1068812)/(24560 \cdot 1000 \cdot 1{,}322 - (2{,}13 \cdot 1102 \cdot 1150 + \\ + 18{,}54 \cdot 1100 \cdot 1150 + 0{,}21 \cdot 2110 \cdot 1150 + 0{,}21 \cdot 23{,}47 \cdot 1025 \cdot 1150) = \\ = 0{,}73 \text{ кг или } 0{,}83 \text{ м}^3$$

«Объём отходящих дымовых газов, нм^3/час, по формуле (51)» [27]:

$$V_{\text{общ}} = \frac{m_{CO2}}{\rho_{CO2}} + \frac{m_{SO2}}{\rho_{SO2}} + \frac{m_{N2}}{\rho_{N2}} + \frac{m_{H2O}}{\rho_{H2O}}, \quad (51)$$

где m_{CO2}, m_{SO2}, m_{O2}, m_{N2}, m_{H2O} – массовый расход соответствующего компонента дымовых газов;

ρ_{CO2}, ρ_{SO2}, ρ_{O2}, ρ_{N2}, ρ_{H2O} – плотность соответствующего компонента дымовых газов при нормальных условиях.

Рассчитаем объём отходящих дымовых газов, нм^3/час, по формуле (51):

$$V_{\text{общ}} = \frac{551{,}56}{1{,}977} + \frac{1{,}34}{2{,}926} + \frac{1164}{1{,}251} + \frac{354{,}99}{1{,}023} = 1557 \text{ нм}^3/\text{час}$$

Состав дымовых газов в % об., по формуле (52) [27]:

$$\frac{\frac{m_i}{\rho_i} \cdot 100\%}{V_{\text{общ}}}, \tag{52}$$

Рассчитаем состав дымовых газов в % об., по формуле (52):

$$CO_2 = \frac{\frac{551{,}56}{1{,}977} \cdot 100}{1557} = 17{,}92\ \%,$$

$$SO_2 = \frac{\frac{1{,}34}{2{,}926} \cdot 100}{1557} = 0{,}03\ \%,$$

$$N_2 = \frac{\frac{1164}{1{,}251} \cdot 100}{1557} = 59{,}76\ \%,$$

$$H_2\text{O} = \frac{\frac{354{,}99}{1{,}023} \cdot 100}{1557} = 22{,}29\ \%$$

Согласно экспериментальным данным литературы «Проектирование технологической линии газоочистки МСЗ №4 "Руднево"» количество остальных компонентов в дымовых газах менее $1 \cdot 10^{-6}$ % и ПДК не превышает, их вклад не учитываем.

Рассчитаем тепловую мощность от сжигания топлива, Вт, по формуле (53):

$$Q_{\text{топ}} = \frac{G_2}{3600} \cdot \text{С}_{\text{топ}} \cdot t_{\text{дг}} \quad (53)$$

где $\text{С}_{\text{топ}}$ = 11950 Дж/(кг·К) [27].

Рассчитаем тепловую мощность от сжигания топлива, Вт, по формуле (53):

$$Q_{\text{топ}} = \frac{0{,}83}{3600} \cdot 11950 \cdot 1150 = 3180 \text{ Вт}$$

Суммарная вносимая тепловая мощность (приход), Вт, по формуле (54) [27]:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{гор}} + Q_{\text{ТКО}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{топ}}, \quad (54)$$

Рассчитаем суммарную вносимую тепловую мощность (приход), Вт, по формуле (54):

$$Q_{\text{вх}} = 1054599 + 4990 + 9223 + 3180 = 1071992 \text{ Вт}$$

Суммарная расходуемая тепловая мощность (расход), Вт, по формуле (55) [27]:

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{го}} + Q_{\text{ун}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рц}}, \quad (55)$$

Рассчитаем суммарную расходуемую тепловую мощность (расход), Вт, по формуле (55):

$$Q_{\text{вых}} = 105678 + 811467 + 49237 + 27896 + 26667 = 1020945 \text{ Вт}$$

Прочие потери тепловой мощности (в окружающую среду, недожог ТКО, разрушение связанной влаги и пр.), Вт, по формуле (56) [27]:

$$Q_{\text{прч}} = Q_{\text{вх}} - \left(Q_{\text{исп}} + Q_{\text{го}} + Q_{\text{ун}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рц}}\right), \quad (56)$$

Рассчитаем прочие потери тепловой мощности (в окружающую среду, недожог ТКО, разрушение связанной влаги и пр.), Вт, по формуле (56):

$$Q_{\text{прч}} = 1071992 - (105678 + 811467 + 49237 + 27896 + 26667) =$$
$$= 51047 \text{ Вт}$$

«Термический коэффициент полезного действия камеры по формуле (57)» [27]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{вх}} - Q_{\text{исп}} - Q_{\text{ун}} - Q_{\text{пр}} - Q_{\text{рц}} - Q_{\text{прч}}}{Q_{\text{вх}}}, \quad (57)$$

Рассчитаем термический коэффициент полезного действия камеры по формуле (57):

$$\eta = \frac{1071992 - 105678 - 49237 - 27896 - 26667 - 51047}{1071992} = 0{,}8$$

Подведем итоги расчетов материального и теплового балансов.

Материальный баланс камеры сжигания представлен в таблице 4.

В таблице 5 представлен тепловой баланс камеры сжигания.

Таблица 4 – Материальный баланс камеры сжигания

Поток	Компонент	Вход		Поток	Компонент	Выход	
		кг/ч	%			кг/ч	%
G_1	Макулатура	20	0,86	G_5	Шлак	32,61	1,41
	Пищевые отходы	140	6,04	G_6	Зола	43,22	1,87
	Текстиль	17	0,73	G_7	CO_2	551,56	23,81
	Пластик	88	3,80		SO_2	1,34	0,06
	Кожа/резина	6	0,26		N_2	1164	50,24
	Дерево	5	0,22		$H_2O_{(пар)}$	354,99	15,32
	Отсев	186	8,03	G_8	Песок (Рециркуляция)	170	7,34
G_2	Топливо(CH_4)	0,73	0,03	-	-	-	-
G_3	Расход воздуха	1654,38	71,40	-	-	-	-
G_4	Песок	200	8,63	-	-	-	-
Итого		2317	100%	Итого		2317	100%

Таблица 5 – Тепловой баланс камеры сжигания

Поток	Тепловая мощность	Вход		Поток	Тепловая мощность	Выход	
		Вт	%			Вт	%
$Q_{гор}$	Выделяемая при горении ТКО	1054599	98,4	$Q_{исп}$	Расходуемая на испарение влаги ТКО	105678	9,86
$Q_{ТКО}$	Вносимая ТКО	4990	0,47	$Q_{го}$	Теряемая с газообразными продуктами сгорания	811467	75,70
$Q_{в}$	Вносимая дутьевым воздухом	9223	0,86	$Q_{ун}$	Теряемая с выносимой из камеры золой и пылью	49237	4,59
$Q_{топ}$	Сжигание топлива	3180	0,30	$Q_{пр}$	Теряемая с провалом золы	27896	2,60
-	-	-	-	$Q_{рп}$	Теряемая за счет рециркуляции материала кипящего слоя	26667	2,49
-	-	-	-	$Q_{прч}$	Прочие потери (в окружающую среду, недожог ТКО, разрушение связанной влаги и пр.)	51047	4,76
Итого		**1071992**	**100**		**Итого**	**1071992**	**100**

Составлен материальный баланс камеры сжигания отходов. На выходе из камеры состав дымовых газов включает в себя 551,56 кг/ч CO_2, 1,34 кг/ч SO_2, 1164 кг/ч N_2, 354,99 кг/ч $H_2O_{(пар)}$. Дымовой газ в последствии проходит этапы многоступенчатой очистки от основных загрязняющих веществ CO_2 и SO_2. В атмосферу поступает чистый газ, состоящий из N_2 и $H_2O_{(пар)}$. Масса твердых веществ, а именно шлака (потеря песка уходит в золошлаки) и золы составляет 75 кг/ч, следовательно, твердая масса потока G_1 уменьшилась в 9 раз. Было рассчитано необходимое количество топлива (0,73 кг/ч) для эффективного горения ТКО (η = 0,8). Песок проходит рециркуляцию, потеря песка от его общей массы составляет 15 %. Составлен тепловой баланс камеры сжигания отходов. Потери тепла при горении составляют 4,76 %.

2.4 Технологический расчет циклона

«Для расчетов конструкции циклонов необходимы следующие исходные данные: количество очищаемого газа при рабочих условиях $V_р$, м^3/с; количество очищаемого газа при нормальных условиях V_n, м^3/с; плотность газа при рабочих условиях $\rho_р$, кг/м^3; динамическая вязкость газа при рабочей температуре $\mu_р$, Па·с; дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами: $d_м$ и lg $\sigma_ч$ ($d_м$ – медианный диаметр, при котором масса всех частиц пыли меньше или крупнее $d_м$ составляет 50%; lg $\sigma_ч$ – стандартное отклонение величины lg d); запыленность газа Z, г/нм^3; плотность частиц $\rho_ч$, кг/м^2; требуемая эффективность очистки газа η, %» [27].

В таблице 6 представлены параметры дымовых газов.

Таблица 6 – Параметры дымовых газов

	Состав газов, % (объемы)				Vn, нм^3/ ч	t, °C	P, Па	η не менее
	N_2	CO_2	H_2O	SO_2				
n компонента	1	2	4	5				
	59,76	17,92	22,29	0,03	71300	190	–1000	0,70

В таблице 7 представлены параметры пыли.

Таблица 7 – Параметры пыли

Z, г/нм^3	dm, мкм	lg$\sigma_ч$	$\rho_ч$, кг/м^3	Свойства пыли		
				Слипаемость	Текучесть	Сыпучесть
10	20	0,30	2000	Слабая	Слабая	Сильная

В таблице 8 представлены параметры, определяющие эффективность циклонов.

Таблица 8 – Параметры эффективности циклона

Параметр	Тип циклона						
	ЦН–24	ЦН–15У	ЦН–15	ЦН–11	СДК–ЦН–33	СК–ЦН–34	СДК–ЦН–33М
d_{50}^T, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
lg σ_η	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340
$\omega_{опт}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

«На первом этапе определяем недостающие исходные данные, а затем рассчитываем циклон» [27].

«Определяем плотности чистых газов при н.у., по формуле (58)» [27]:

$$\rho_n = \frac{M}{V_n}, \tag{58}$$

где ρ_n – плотность n–го компонента дымового газа при н.у., кг/м^3;

n – номер компонента из таблицы;

M – молекулярная масса n–го компонента дымового газа, кг/кмоль;

V_n – мольный объём n–го компонента дымового газа, кмоль/м^3.

Плотность азота при н.у. по формуле (58):

$$\rho_1 = \frac{28}{22{,}4} = 1{,}25 \text{ кг/м}^3$$

Плотность углекислого газа при н.у. по формуле (58):

$$\rho_2 = \frac{44}{22{,}4} = 1{,}95 \text{ кг/м}^3$$

Плотность водяного пара при н.у. по формуле (58):

$$\rho_4 = \frac{18}{22{,}4} = 0{,}80 \text{ кг/м}^3$$

Плотность диоксида серы при н.у. по формуле (58):

$$\rho_5 = \frac{64}{22{,}4} = 2{,}86 \text{ кг/м}^3$$

«Определяем плотность смеси газов при н.у. по формуле (59)» [27]:

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{n=1}^{5} \frac{\rho_n \cdot x_n}{100\ \%}, \tag{59}$$

где x_n – объёмная доля n–го компонента дымового газа, %.

Рассчитаем плотность смеси газов при н.у. по формуле (59):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1{,}25 \cdot 59{,}76 + 1{,}95 \cdot 17{,}92 + 0{,}80 \cdot 22{,}29 + 2{,}86 \cdot 0{,}03}{100} = 1{,}28 \text{ кг/м}^3$$

«Определяем плотность смеси газов при рабочих условиях t = 190 °С по формуле (60)» [27]:

$$\rho_{\text{р}} = \rho_{\text{см}} \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{101330}{101330 + P_{\text{изб}}}, \tag{60}$$

Рассчитаем плотность смеси газов при рабочих условиях t = 190 °С по формуле (60):

$$\rho_{\text{р}} = 1{,}28 \cdot \frac{273}{273 + 190} \cdot \frac{101330}{101330 - 1000} = 0{,}76 \text{ кг/м}^3$$

«Определяем расход смеси газов при рабочих условиях t = 190 °С по формуле (61)» [27]:

$$V_{\text{р}} = V_{\text{см}} \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{р}}}, \tag{61}$$

Рассчитаем расход смеси газов при рабочих условиях t = 190 °С по формуле (61):

$$V_{\text{р}} = 19{,}81 \cdot \frac{1{,}28}{0{,}76} = 33{,}36 \text{ м}^3/\text{с}$$

«Определяем вязкость смеси газов при рабочих условиях по формуле (62)» [27]:

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{n=1}^{5} \frac{\mu_n \cdot x_n}{100\ \%}, \tag{62}$$

где μ_{n}– вязкость n–го компонента дымового газа при рабочих условиях

Рассчитаем вязкость смеси газов при рабочих условиях по формуле (62):

$$\mu_{см} = (24{,}22 \cdot 10^{-6} \cdot 59{,}76 + 22{,}18 \cdot 10^{-6} \cdot 17{,}92 +$$
$$+15{,}72 \cdot 10^{-6} \cdot 22{,}29 + 19{,}61 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}03)/100 = 21{,}96 \cdot 10^{-6}\ Па \cdot с$$

Выбираем циклон ЦН–15, $\omega_{опт}$ = 3,5 м/с.

«Определяем необходимую площадь сечения циклонов F. м^2, по формуле (63)» [27]:

$$F = \frac{V_р}{\omega_{опт}}, \tag{63}$$

Рассчитываем необходимую площадь сечения циклонов F. м^2, по формуле (63):

$$F = \frac{33{,}36}{3{,}5} = 9{,}5 м^2$$

«Определяем диаметр циклона по формуле (64)» [6]:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0{,}785 \cdot N}}, \tag{64}$$

где N – число циклонов, шт.

Рассчитываем диаметр циклона по формуле (64):

$$D = \sqrt{\frac{9{,}5}{0{,}785 \cdot 2}} = 2{,}5\ м$$

Округляем диаметр циклона до 3000 мм.

«Вычисляем действительную скорость газа по формуле (65)» [27]:

$$\omega = \frac{V_{\text{р}}}{0{,}785 \cdot N \cdot D^2}, \quad (65)$$

Рассчитываем действительную скорость газа по формуле (65):

$$\omega = \frac{33{,}36}{0{,}785 \cdot 2 \cdot 2{,}5^2} = 3{,}4\ \%$$

«Скорость газа не должна отклоняться более чем на 15% от оптимальной скорости. Условие выполняется» [27].

«Определяем коэффициент гидравлического сопротивления циклона или группы циклонов по формуле (66)» [27]:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500} + K_3, \quad (66)$$

где ξ_{500}– коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм; выбираемый по таблице

$К_1$ – поправочный коэффициент, зависящий от диаметра циклона $К_1$ = 1;

$К_2$ – поправочный коэффициент, учитывающий запыленность газа, $К_2$ = 0,93;

$К_3$ – коэффициент, учитывающий дополнительные, потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу, $К_3$ = 1:

Рассчитываем определяем коэффициент гидравлического сопротивления циклона или группы циклонов по формуле (66):

$$\xi = 1 \cdot 0{,}93 \cdot 155 + 1 = 145$$

«Определяем потери давления в циклоне (в Па), по формуле (67)» [27]:

$$\Delta p = N \cdot \xi \cdot \frac{\rho_{\text{р}} \cdot \omega^2}{2}, \quad (67)$$

Рассчитываем потери давления в циклоне (в Па), по формуле (67):

$$\Delta p = 2 \cdot 145 \cdot \frac{0{,}76 \cdot 3{,}4^2}{2} = 1274 \text{ Па}$$

«Потери давления Δp оказались приемлемыми, переходим к расчету полного коэффициента очистки газа в циклоне» [27].

«Определяют диаметр частиц, улавливаемых на 50%, по формуле (68)» [27]:

$$d_{50} = d_{50}^{\text{Т}} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{Ц}}}{D_{\text{Т}}^{\text{Ц}}} \cdot \frac{\rho_{\text{ч}}{}^{\text{Т}}}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{\mu_{\text{р}}}{\mu_{\text{р}}^{\text{Т}}} \cdot \frac{\omega^{\text{Т}}}{\omega}}, \quad (68)$$

где индекс «Т» означает стандартные условия работы циклона.

$d_{50}^{\text{Т}}$ – диаметр частиц, улавливаемых на 50% в стандартных условиях.

«Значения $d_{50}^{\text{Т}}$ соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне $\omega^{\text{Т}}$=3,5 м/с; диаметр циклона $D_{\text{Т}}^{\text{Ц}}$ =0,6 м; плотность частиц $\rho_{\text{ч}}{}^{\text{Т}}$ = 1930 кг/м^3; динамическая вязкость газа $\mu_{\text{р}}^{\text{Т}}$ = 22,2·10^{-6} Па·с; σ_η – величина, характеризующая дисперсию ($\lg^2 \sigma_\eta$) величины $\lg \sigma_\eta$ в функции фракционной степени очистки $\eta_{\text{ф}}^{(d)}$» [27].

Рассчитываем диаметр частиц, улавливаемых на 50%, по формуле (68):

$$d_{50} = 4{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{3}{0{,}6} \cdot \frac{1930}{2000} \cdot \frac{21{,}96 \cdot 10^{-6}}{22{,}2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3{,}5}{3{,}4}} = 10{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

«Определяем параметр x по формуле (69)» [27]:

$$x = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{lg^2\sigma_\eta + lg^2\sigma_{\text{ч}}}, \quad (69)$$

Рассчитываем параметр x по формуле (69):

$$x = \frac{\lg(20 \cdot 10^{-6}/10{,}0 \cdot 10^{-6})}{0{,}352^2 + 0{,}30^2} = 1{,}4$$

«По величине параметра *X* рассчитываем значение нормальной функции распределения Ф(*X*) – полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях по формуле (70)» [27]:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0{,}3762 \cdot X + 0{,}5 & 0 \leq X \leq 0{,}6 \\ 1 - \dfrac{1}{5{,}6 \cdot X + 0{,}5} & X > 0{,}6 \end{cases}, \quad (70)$$

Рассчитываем полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях по формуле (70):

$$\Phi(x) = 1 - \frac{1}{5{,}6 \cdot 1{,}4 + 0{,}5} = 0{,}88$$

«Определяем полный коэффициент очистки газа (в %) по формуле (71)» [27]:

$$\eta_{\text{р}} = 50 \cdot \big(1 + \Phi(x)\big), \quad (71)$$

Рассчитываем полный коэффициент очистки газа (в %) по формуле (71):

$$\eta_{\text{р}} = 50 \cdot (1 + 0{,}88) = 94\ \%$$

В Приложении К в таблице К.1 представлены конструктивные параметры циклона ЦН–15.

Таким образом, были рассчитаны конструктивные параметры и эффективность циклона.

2.5 Распылительный абсорбер. Аппарат очистки от кислых компонентов

Технологический расчет распылительного абсорбера.

В абсорбере происходят наиболее значимые химические реакции:

1) $2NaOH + SO_2 = Na_2SO_3 + H_2O$,

2) $2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O$

В таблице 9 представлен состав газа.

Таблица 9 – Состав газа на входе в абсорбер

Вещество	кг/ч	%
CO_2	551,56	26,62
SO_2	1,34	0,07
N_2	1164	56,18
$H_2O_{(пар)}$	354,99	17,13
Итого:	**2071,9**	**100%**

Концентрация NaOH принимается равной 50 %.

Температура газа:

– при входе в абсорбер – 70 ^oC;

– при выходе из абсорбера – 50 ^oC.

Температура раствора NaOH:

– при входе в абсорбер – 68 ^oC;

– при выходе из абсорбера – 50 ^oC.

Определим количество и состав поступающего на очистку конвертированного газа по формуле (72):

$$V_i = (V \cdot n_i)/100, \quad (72)$$

где V– объем расхода газовой смеси, м /ч;

V_i – объем расхода компонента газовой смеси, м^3/ч;

n_i – концентрация компонента газовой смеси, % об.

Подставим данные из таблицы в формулы (72) и рассчитаем:

CO_2:

$$V_{CO2} = \frac{2071{,}9 \cdot 26{,}62}{100} = 551{,}56 \text{ м}^3/\text{ч}$$

SO_2:

$$V_{SO2} = \frac{2071{,}9 \cdot 0{,}07}{100} = 1{,}34 \text{ м}^3/\text{ч}$$

N_2:

$$V_{N2} = \frac{2071{,}9 \cdot 56{,}18}{100} = 1164{,}0 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$H_2O_{(пар)}$:

$$V_{H2Oп} = \frac{2071{,}9 \cdot 17{,}13}{100} = 354{,}99 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Баланс по диоксиду углерода составим при следующем допущении: содержание CO_2 в очищенном газе примем равным 0,005 % об.

Составим пропорцию с учетом этого допущения:

551,56 – 99,995

x – 0,005,

Тогда:

$$x = \frac{551{,}56 \cdot 0{,}005}{99{,}995} = 0{,}03$$

Количество диоксида углерода в уходящем газе 0,03 кг/ч.

Определим расход NaOH раствора для поглощения 551,53 кг/ч диоксида углерода.

Способность раствора к поглощению, выражаемая отношением моль диоксида углерода на моль NaOH. Обозначим степень абсорбции:

на выходе – 0,5 кмоль CO_2/кмоль NaOH;

на входе – 0,1 кмоль CO_2/кмоль NaOH,

В результате составим:

0,5 – 0,1 = 0,4 кмоль CO_2/кмоль NaOH.

Определим количество NaOH для поглощения 551,5 кг/ч диоксида углерода. Составим пропорцию:

0,4 кмоль CO_2 ——— 1 кмоль NaOH.

$\frac{551{,}53}{44}$ кмоль CO_2 ——— x кмоль NaOH

Тогда:

$$x = \frac{551{,}5}{44 \cdot 0{,}4} = 31{,}4 \text{ кмоль}$$

Мольная масса NaOH – 40 кг/кмоль, тогда масса 100 % NaOH раствора составит:

$$\mathrm{m}_{\mathrm{NaOH\ (100\%)}} = 40 \cdot 31{,}4 = 1256 \text{ кг/ч}$$

Количество 50 % NaOH раствора:

$$\mathrm{m}_{\mathrm{NaOH(50\%)}} = \frac{1256 \cdot 100}{50} = 2512 \text{ кг/ч}$$

Количество NaOH раствора составит по формуле (73):

$$M_{NaOH} = m_{CO_2} + m_{NaOH(50\%)} \quad (73)$$

Подставив данные в формулу (73) получим:

$$m_{NaOH} = 551{,}5 + 2512 = 3063{,}5 \text{ кг/ч}$$

Определим расход NaOH раствора для поглощения 1,34 кг/ч SO_2.

$$x = \frac{1{,}34}{64 \cdot 0{,}4} = 0{,}05 \text{ кмоль}$$

Мольная масса NaOH – 40 кг/кмоль, тогда масса 100 % NaOH раствора составит:

$$m_{NaOH\ (100\%)} = 40 \cdot 0{,}05 = 2 \text{ кг/ч}$$

Количество 50 % NaOH раствора:

$$m_{NaOH(50\%)} = \frac{2 \cdot 100}{50} = 4 \text{ кг/ч}$$

Подставив данные в формулу (73) получим:

$$m_{NaOH} = 1{,}34 + 4 = 6{,}34 \text{ кг/ч}$$

Представим результаты расчета в сводной таблице 10.

Таблица 10 – Сводная таблица материального баланса абсорбера

Приход			**Расход**		
Наименование	**кг/ч**	**%, масс.**	**Наименование**	**кг/ч**	**%, масс.**

CO_2	551,56	12,0	CO_2	0,03	0,0007
SO_2	1,34	0,03	SO_2	0,0	0
N_2	1164	25,37	N_2	1164,0	25,4
$H_2O_{(пар)}$	354,99	7,74	$H_2O_{(пар)}$	354,99	7,74
50–% раствор NaOH:			$H_2O_{(ж)}$	448	9,76
NaOH	1258	27,42	Na_2SO_3	2,8	0,06
$H_2O_{(ж)}$	1258	27,42	Na_2CO_3	2618,2	57,07
			NaOH	0	0
Итого	4588	100,0	Итого	4588	100,0

NaOH полностью реагирует с CO_2. На выходе из абсобера газ состоит из N_2 и $H2O_{(пар)}$ что говорит о полные очистки дымовых газов от загрязнителей.

В процессе очистки дымовых газов в абсорбере образуются стоки, содержащие такие соли, как Na_2SO_3, Na_2CO_3. Загрязненные сточные воды необходимо направлять на очистные сооружения.

Технологический и конструктивный расчет аппарата.

Объем газа, выходящего из абсорбера, можно рассчитать по формуле (74):

$$V_2 = V_1 \cdot (1 - y_1 \cdot z), \tag{74}$$

где V_1 и V_2 – объем газа на входе и выходе из абсорбера, м^3/ч;

y_1 – концентрация NaOH на входе в абсорбер, объемные доли;

z – степень абсорбции, доли единицы.

Рассчитаем объем газа по формуле (74):

$$V_2 = 2071{,}9 \cdot (1 - 0{,}050 \cdot 0{,}999) = 1968{,}4 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Плотность газа в абсорбере можно рассчитать по формуле (75):

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t} \cdot \frac{P}{P_0}, \tag{75}$$

где ρ_2, ρ_0 – плотность газа в абсорбере и при нормальных условиях, кг/м^3;

T_0 – абсолютная температура, К;

t – средняя температура газа в абсорбере, ºС;

P – давление газа в абсорбере, Па;

P_0 – атмосферное давление, Па.

Плотность газа при нормальных условиях составляет:

$$\rho_0 = \frac{80 \cdot 0{,}050 + 64 \cdot 0{,}00159 + 32 \cdot 0{,}104 + 28 \cdot 0{,}817}{22{,}4} = 1{,}35 \text{ кг/м}^3$$

Средняя температура газа в абсорбере составит:

$$t = \frac{70 + 50}{2} = 60\,^{\circ}\text{C}$$

Давление газа в абсорбере равно атмосферному.

Плотность газа в абсорбере составит по формуле (75):

$$\rho_2 = 1{,}35 \cdot \frac{273}{273 + 60} \cdot \frac{1{,}01 \cdot 10^5}{1{,}01 \cdot 10^5} = 1{,}1 \text{ кг/м}^3$$

Предельную скорость газа можно рассчитать по формуле (76):

$$lg\left[\frac{\omega_{\text{пр}}^2 \cdot \rho_2}{g \cdot d_{\text{э}} \cdot \varepsilon^2 \cdot \rho_{\text{аб}}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{аб}}}{\mu_{H2O}}\right)^{0{,}16}\right] = A - B \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_{\text{аб}}}\right)^{1/8}, \quad (76)$$

где $\omega_{\text{пр}}^2$ – предельная скорость газа, м/с;

ρ_2, $\rho_{\text{аб}}$ – плотность газа и абсорбента, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м;

ε – свободный объем насадки, м^3/м^3;

$\mu_{аб}$ и μ_{H2O} – вязкость абсорбента и воды, Па·с;

A и B – коэффициенты;

L и G – расход абсорбента и воды, кг/с.

Плотность абсорбента составляет 2130 кг/м^3, вязкость – 0,010554 Па·с. Коэффициенты A и B для насадки из керамических колец Рашига соответственно – 0,073 и 1,75.

Рассчитаем предельную скорость газа по формуле (76):

$$lg\left[\frac{\omega_{пр}^2 \cdot 1{,}1}{9{,}8 \cdot 0{,}048 \cdot 0{,}72^2 \cdot 2130} \cdot \left(\frac{10{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}010554}\right)^{0{,}16}\right] =$$

$$= -0{,}073 - 1{,}75 \cdot \left(\frac{351{,}92}{37{,}04}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{1{,}1}{2130}\right)^{1/8}$$

$$\omega_{пр}^2 = 0{,}75 \text{ м/с}$$

Учитывая гидравлическое сопротивление насадки, скорость газа в абсорбере принимаем 0,8 м/с.

Средний расход газа в абсорбере составит:

$$V_{ср} = \frac{2071{,}9 + 1968{,}4}{2} = 2020 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Площадь поперечного сечения абсорбера составит по формуле (77):

$$S = \frac{V_{ср}}{3600 \cdot \omega_{пр}} \qquad (77)$$

Рассчитаем площадь поперечного сечения абсорбера по формуле (77):

$$S = \frac{2020}{3600 \cdot 0{,}8} = 0{,}7 \text{ м}^2$$

Диаметр абсорбера составит по формуле (78):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \tag{78}$$

Рассчитаем диаметр абсорбера по формуле (78):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}7}{\pi}} = 6 \text{ м}$$

Рабочая скорость газа составит по формуле (79):

$$\omega = \frac{V_{\text{ср}}}{3600 \cdot S} \tag{79}$$

Рассчитаем рабочую скорость газа по формуле (79):

$$\omega = \frac{2020}{3600 \cdot 0{,}7} = 0{,}8 \text{ м/с}$$

Плотность орошения можно рассчитать по формуле (80):

$$U = \frac{G}{3600 \cdot S}, \tag{80}$$

где U – плотность орошения, $м^3/м^2 \cdot с$;

G – расход абсорбента, $м^3/ч$;

S – площадь поперечного сечения абсорбера, $м^2$.

Рассчитаем плотность орошения по формуле (80):

$$U = \frac{2516{,}0}{3600 \cdot 0{,}7} = 1{,}01\ \text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$$

Минимальную эффективную плотность орошения можно рассчитать по формуле (81):

$$U_{min} = a \cdot q_{\text{эф}}, \qquad (81)$$

где U_{min} –минимальная эффективная плотность орошения, $м^3/м^2 \cdot с$;

а – удельная поверхность насадки, $м^2/м^3$;

$q_{эф}$ – эффективная линейная плотность орошения, $м^2/с$.

Для насадки из керамических колец Рашига размером 100 мм эффективная линейная плотность орошения составляет $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ $м^2/с$. Минимальная эффективная плотность орошения составит по формуле (81):

$$U_{min} = 60 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-5} = 1{,}32\ \text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$$

Удельную активную поверхность насадки можно рассчитать по формуле (82):

$$a' = \psi \cdot a, \qquad (82)$$

где a' – удельная активная поверхность насадки, $м^2/м^3$;

ψ – доля активной поверхности насадки, доли единицы;

а – удельная поверхность насадки, $м^2/м^3$.

При плотности орошения более $3{,}00 \cdot 10^{-3}$ $м^3/м^2 \cdot с$ для правильно уложенной насадки смачивается практически вся ее геометрическая поверхность. В этом случае доля активной поверхности насадки равна 1.

Рассчитаем удельную активную поверхность насадки по формуле (82):

$$a' = 1 \cdot 60 = 60\ \text{м}^2/\text{м}^3$$

Количество поглощенного NaOH можно рассчитать по формуле (83):

$$G_{NaOH} = \frac{V_1 \cdot y_1 \cdot z \cdot \mu_{NaOH}}{\upsilon}, \quad (83)$$

где G_{NaOH} –количество поглощенного NaOH, кг/ч;

V_1 – объем газа, поступающего в абсорбер, м^3/ч;

y_1 – концентрация NaOH, объемные доли;

z – степень абсорбции, доли единицы;

μ_{NaOH} – молярная масса NaOH, кг/моль;

υ – мольный объем газа при нормальных условиях, м^3/моль.

Рассчитаем количество поглощенного NaOH по формуле (83):

$$G_{NaOH} = \frac{2071{,}9 \cdot 0{,}050 \cdot 0{,}999 \cdot 0{,}010554}{22{,}4 \cdot 10^{-3}} = 51{,}08 \text{ кг/ч}$$

Коэффициент скорости абсорбции можно рассчитать по формуле (84):

$$K = K_0 \cdot \omega^{0{,}8}, \quad (84)$$

где К – коэффициент скорости абсорбции, кг/(м^2·ч·Па);

K_0 – коэффициент, зависящий от концентрации и температуры орошающей жидкости, кг/(м^2·ч·Па);

ω – рабочая скорость газа, м/с.

Рассчитаем коэффициент скорости абсорбции по формуле (84):

$$K = 1{,}94 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}8^{0{,}8} = 0{,}000162 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$$

Площадь поверхности насадки можно рассчитать по формуле (85):

$$F_н = \frac{G_{NaOH}}{K \cdot \Delta p}, \quad (85)$$

где $F_Н$ – площадь поверхности насадки, м^2;

G_{NaOH} – количество поглощенного NaOH, кг/ч;

К – коэффициент скорости абсорбции, кг/(м^2·ч·Па);

Δр – движущая сила абсорбции, Па.

Рассчитаем площадь поверхности насадки составит по формуле (85):

$$F_н = \frac{51{,}08}{0{,}000162 \cdot 4910{,}19} = 64{,}2 \text{ м}^2$$

Объем насадочной части составит по формуле (86):

$$V_н = \frac{F_н}{a} \quad (86)$$

Рассчитаем объем насадочной части по формуле 86):

$$V_н = \frac{64{,}2}{60} = 1{,}07 \text{ м}^3$$

Высоту насадки можно рассчитать по формуле (87):

$$H_H = \frac{F_H}{0{,}785 \cdot a \cdot D^2 \cdot \psi}, \quad (87)$$

где $H_Н$ – высота насадки, м

Рассчитаем высоту насадки по формуле (87):

$$H_H = \frac{64{,}2}{0{,}785 \cdot 60 \cdot 6^2 \cdot 1} = 0{,}04 \text{ м}$$

Расстояние между днищем абсорбера и насадкой примем равным 0,8·D. Это расстояние составит:

$$H_g = 0{,}8 \cdot 6 = 4{,}8 \text{ м}$$

Расстояние от верха насадки до крышки абсорбера $H_к$ примем равным 3 м.

Высота абсорбера составит по формуле (88):

$$H_a = H_g + H_H + H_к \tag{88}$$

Рассчитаем высоту абсорбера по формуле (88):

$$H_a = 3 + 0{,}04 + 4{,}8 = 7{,}8 \text{ м}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки можно рассчитать по формуле (89):

$$\lambda = \frac{6{,}64}{Re_Г^{0,375}}, \tag{89}$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

Re – критерий Рейнольдса для газа в насадке.

Критерий Рейнольдса для газа в насадке составит по формуле (90):

$$Re_Г = \frac{\omega_{пр} \cdot d_э \cdot \rho_2}{\mu_{аб}} \tag{90}$$

Рассчитаем критерий Рейнольдса для газа в насадке по формуле (90):

$$Re_{\Gamma} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}048 \cdot 1{,}1}{0{,}8 \cdot 0{,}010554} = 5{,}0$$

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки составит по формуле (89):

$$\lambda = \frac{6{,}64}{0{,}5^{0{,}375}} = 8{,}6$$

Гидравлическое сопротивление сухой насадки можно рассчитать по формуле (91):

$$\Delta P_{\text{с}} = \lambda \cdot \frac{H_H \cdot \left(\frac{\omega}{\varepsilon}\right)^2}{d_{\text{э}} \cdot 2} \cdot \rho_{\Gamma}, \qquad (91)$$

где $\Delta p_{\text{с}}$ – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки составит по формуле (91):

$$\Delta P_{\text{с}} = 8{,}6 \cdot \frac{0{,}04 \cdot \left(\frac{0{,}8}{0{,}72}\right)^2}{0{,}048 \cdot 2} \cdot 1{,}1 = 3{,}32 \text{ Па}$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки можно рассчитать по формуле (92):

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{B \cdot U \cdot 10^{-3}}, \qquad (92)$$

где ΔP — гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Па;

B – коэффициент;

U – плотность орошения, $м^3/(м^2 \cdot с)$.

Для насадки колец Рашига в укладку размером 100 мм коэффициент B = 119,00.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки составит по формуле (92):

$$\Delta P = 3{,}32 \cdot 10^{119 \cdot 1{,}01 \cdot 10^{-3}} = 4{,}4 \text{ Па}$$

В результате расчета аппарата определены его габаритные размеры. Также произведен расчет гидравлического сопротивления аппарата.

Вывод по разделу: был рассчитан материальный и тепловой баланс с целью обозначения состава выходящих дымовых газов, подобрано необходимое количество топлива (0,73 кг/ч), а также рассчитана многоступенчатая очистка дымовых газов (на выходе чистый газ с содержанием 1164 кг/ч N_2 и 355 кг/ч $H_2O_{(пар)}$) с целью снижения антропогенного воздействия на окружающую среду.

3 Эколого–экономическое обоснование выбранного технологического решения по переработке ТКО термическим способом

3.1 Эксплуатация золошлаков

В результате переработки ТКО термическим методом образуются золошлаки в количестве 45,83 кг\ч – 733,3 кг/сут. Золошлаковые отходы – несгораемый остаток, возникающий в результате сжигания отходов.

В таблице 11 приведен химический состав золошлаковых отходов [9].

Таблица 11 – Химический состав золошлаков

Компонент	Содержание, % по массе
Диоксид кремния, SiO_2	30–40
Оксид алюминия, Al_2O_3	15–20
Оксид кальция, CaO	8–18
Оксид магния, MgO	1–3
Серный ангидрид, SO_3	3–7
Оксид калия, K_2O	2–4
Оксид натрия, Na_2O	0.5–1.5

Шлак после сжигания представляет собой конечный продукт термического обезвреживания ТКО. Состав шлака соответствует IV классу опасности. следовательно, считаются мало опасными отходами [26].

«Золошлаки состоят из многих полезных компонентов, которые могут быть использованы в различных областях человеческой деятельности. Зола содержит много полезных компонентов: глинозем (Al_2O_3(10–17 %)), кремнезем (SiO_2(54 %)), которые могут использоваться по–разному» [28].

Проанализировав патентную литературу, были выбраны варианты использования золошлаковых отходов.

В Приложении Л в таблице Л.1 представлен патентный поиск по применению золошлаковых отходов, где рассмотрены способы применения образующихся золошлаковых отходов после термической переработки ТКО [15], [17], [20], [21].

3.2 Анализ стоимости предложенного технологического процесса переработки ТКО термическим способом

В таблице 12 представлена цена каждого аппарата технологического процесса переработки ТКО термическим способом [2].

Таблица 12 – Цена каждого аппарата технологического процесса

Аппарат	Количество, шт	Цена, тыс.руб.
Цепной конвейер	1	100
Аппарат грохочения	1	400
Конусная дробилка		550
Камера термической переработки с камерой охлаждения дымовых газов (вместимостью 500 кг/ч)	1	390
Контейнер (вместимостью 2100 кг)	3	29,1
Циклон ЦН–15	2	340
Абсорбер распылительный	1	330
Итого:		2139

В то же время, цена камеры термической переработки со встроенной камерой дожигания и очисткой газов стоит 3580 тыс.руб. [33].

Вывод по разделу: были проанализированы золошлаковые отходы после применения процесса сжигания ТКО, их количество и состав, проанализирована патентная литература с целью определения дальнейшей их переработки, а также была рассмотрена общая стоимость технологического процесса переработки ТКО термическим способом.

Заключение

Был проведен анализ предложенной технологической схемы по переработке ТКО термическим способом, изучена патентная литература с целью выбора подходящей камеры сжигания отходов, разобран каждый аппарат многоступенчатой очистки, включенный в схему.

Был проведен расчет материального и теплового балансов камеры сжигания с целью определения состава выходящих дымовых газов. При сжигании 462 кг отходов образуются загрязняющие вещества, такие как: 551,56 кг/ч CO_2 и 1,34 кг/ч SO_2. Для процесса сжигания требуется 0,73 кг природного газа в качестве топлива. В последствии дымовые газы направляются на многоступенчатую очистку.

Проведен расчет эффективности многоступенчатой очистки, а именно циклона (эффективность очистки от взвешенных частиц 94%), абсорбера (после абсорбции дымовые газы не имеют в своем составе загрязняющих веществ и состоят из 1164 кг/ч N_2 и 354,99 кг/ч $H_2O_{(пар)}$, а загрязненные сточные воды подаются на очистные сооружения).

Были проанализированы золошлаковые отходы после применения процесса сжигания ТКО, их количество и состав, проанализирована патентная литература с целью определения дальнейшей их переработки, а также была рассмотрена общая стоимость технологического процесса переработки ТКО термическим способом.

Проведен анализ последующего использования золошлаковых отходов путем изучения патентной литературы, так же проведен анализ стоимости предложенной технологической схемы переработки ТКО термическим способом (2139 тыс.руб.).

Список используемых источников

1. Афанасьев С.В., Белик В.С.. Методологические основы исследования степени загрязнения почв в местах несанкционированных свалок промышленными отходами, 2018 (дата обращения: 15.05.2022).

2. Баранов, Д. А. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / Д. А. Баранов. – 3–е изд., стер. – Санкт–Петербург : Лань, 2020. – 408 с. – ISBN 978–5–8114–4984–2. – Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/130186. С. 121–125. (дата обращения: 15.05.2022).

3. Бухонова Е.С., Щербакова О.Ю.. Организация системы сбора, транспортирования и утилизации отходов от населения в г.о. Тольятти, 2017 (дата обращения: 15.05.2022).

4. Варламова М.Н., Исследования, инновационные разработки и пути реализаций экологически чистых утилизационных технологий бытовых коммунальных отходов на примере г. о. Тольятти, Тольятти 2017 (дата обращения: 04.06.2022).

5. Гамрекели, М. Н. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда на предприятии : учебное пособие / М. Н. Гамрекели. — Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. — 108 с. — ISBN 978–5–94984–666–7. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/142511. С. 79–94 (дата обращения: 10.05.2022).

6. Дзюзер, В. Я. Теплотехника и тепловая работа печей : учебное пособие для вузов / В. Я. Дзюзер. — 4–е изд., стер. — Санкт–Петербург : Лань, 2021. — 384 с. — ISBN 978–5–8114–6789–1. — Текст : электронный // Лань: электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/152446. С. 261–271 (дата обращения: 10.05.2022).

7. Есякова О.А., Иванов В.А., Обращение с отходами: Учебное пособие, 2018 (дата обращения: 15.05.2022).

8. Жаркова, Н. Н. Мониторинг безопасности : учебное пособие / Н. Н. Жаркова, Л. В. Коржова. — Омск : Омский ГАУ, 2021. — 82 с. — ISBN 978–5–89764–943–3. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/176584. С. 45–51 (дата обращения: 10.05.2022).

9. Копеистова Д.Ю., Разработка технического решения по снижению техногенного влияния золошлакоотвала ТЭЦ – Тольятти, 2021, С. 13–22 (Дата обращения: 10.05.2022).

10. Кулагина, Т. А. Теоретические основы защиты окружающей среды : учебное пособие / Т. А. Кулагина, Л. В. Кулагина. – Красноярск : СФУ, 2017. – 364 с. – ISBN 978–5–7638–3678–3. – Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/117786. С. 207–221 (дата обращения: 15.05.2022).

11. Логачев М.В., Иваницкий Н.И.,Давидович Л.М., Расчеты нагревательных устройств: БНТУ, 2017, С. 91–97 (дата обращения: 10.05.2022).

12. Натареев, С. В. Сушка и обжиг в кипящем слое : учебное пособие / С. В. Натареев, Н. Л. Овчинников, Л. Н. Овчинников. — Иваново : ИГХТУ, 2019. — 106 с. — ISBN 978–5–9616–0326–2. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/4512. С. 51–70 (дата обращения: 10.05.2022).

13. Несанкционированные свалки Тольятти, 2020 [Электронный ресурс] – URL: https://tgl.ru/structure/department/othod_svalki (дата обращения: 15.05.2022).

14. Пат. RU 113669 U1 МПК B01D 47/00 (2006.01), Система мокрой очистки отходящих газов горения // Савченко Г.Э., Кацнельсон Л.О., Вальдберг А.Ю., Левашов А.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "ТехЭкоПлазма" (ООО "ТехЭкоПлазма") (RU) – № 2011139446/05, 2011.09.28; заявл. 2011.09.28; опуб. 2012.02.27 (Дата обращения: 10.05.2022).

15. Пат. RU 2 052 400 C1 МПК C03C 10/06 (2006.01), C03C 1/00 (2006.01), C03C 10/00 (2006.01), Способ получения стекломатериала из золошлаковых отходов // Баякин С.Г., Аншиц А.Г., Павлов В.Ф., Шабанов В.Ф.; заявитель и патентообладатель Баякин С.Г., Аншиц А.Г., Павлов В.Ф., Шабанов В.Ф. – № 93005278/33, 2013.06.01; заявл. 2013.06.01; опуб 2016.01.20 (дата обращения: 15.05.2022).

16. Пат. RU 2 085 807 C1 МПК F23G 7/00, Способ термической переработки твердых коммунальных отходов в камере кипящего слоя // Семенов В.Н.; заявитель и патентообладатель Научно–производственное объединение энергетического машиностроения им.акад. В.П.Глушко – № 94028426/03, 2017.07.27; заявл. 2017.07.27; Опуб. 2018.01.12 (Дата обращения: 10.05.2022).

17. Пат. 2 171 150 C1 МПК B09B 3/00 (2006.01), C04B 18/10 (2006.01), C04B 20/10 (2006.01) Способ переработки токсичных отходов // Бикбау М.Я., Бикбау Я.М., Федоров О.Л.; заявитель и патентообладатель Бикбау М.Я., Бикбау Я.М., Федоров О.Л. – № 2000116329/12, 2010.06.26; заявл. 2010.06.26; опуб. 2011.07.27 (дата обращения: 15.05.2022).

18. Пат. RU 2 200 053 C1 МПК B01D 53/00 (2006.01), Способ очистки дымовых газов (скруббер) // Рынейский В.А., Семенов В.Н., Головченко С.С., Зубова М.С., Краснопевцева Н.В.; заявитель и патентообладатель Рынейский В.А., Семенов В.Н., Головченко С.С., Зубова М.С., Краснопевцева Н.В. – № 2001131925/12, 2011.11.27; заявл. 2011.11.27; опуб. 2013.03.10 (Дата обращения: 10.05.2022).

19. Пат. RU 2 209 657 C2 МПК B01D 53/02 (2006.01), B01D 53/34 (2006.01), B01D 53/50 (2006.01), B01D 53/68 (2006.01), B01D 53/81 (2006.01), Способ и устройство для очистки дымовых газов // Охман Стефан, Брингфорс Нильс; заявитель и патентообладатель АББ ФЛЭКТ АБ (SE) – № 2000131603/12, 2009.05.12; заявл. 2009.05.12; опуб. 2013.08.10 (Дата обращения: 10.05.2022).

20. Пат. RU 2 311 236 C2 МПК B09B 3/00 (2006.01), C04B 18/10 (2006.01), C04B 28/00 (2006.01), Способ утилизации золошлаковых отходов мусоросжигания // Рахманов В.А., Мелихов В.И., Казарин С.К., Козловский А.И., Амханицкий Г.Я., Горбовец М.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО Технологический институт "ВНИИЖЕЛЕЗОБЕТОН" (RU) – № 2005103327/03, 2015.02.10; заявл. 2015.02.10; опуб. 2017.11.27 (дата обращения: 15.05.2022).

21. Пат. RU 2 436 855 C1 МПК C22B 21/0 (2006.01), C22B 3/06 (2006.01), C22B 7/00 (2006.01), C01F 7/74 (2006.01), C01G 49/00, (2006.01) Способ извлечения алюминия и железа из золошлаковых отходов //Александрова Т.Н., Прохоров К.В.; заявитель и патентообладатель Российская Академия Наук Учреждение Российской Академии Наук Институт Горного Дела Дальневосточного Отделения РАН (ИГД ДВО РАН) (RU) – № 2010144752/02, 2010.11.01; заявл. 2010.11.01; опуб. 2011.12.20 (дата обращения: 15.05.2022).

22. Пат. RU 2 461 776 C1 МПК F23G 5/00, F23G 5/04, B09B 3/00, Способ термической переработки твердых коммунальных отходов с камерой дожига // Голубев А.А., Гудим Ю.А., Грачев В.А., Дыдычкин В.П.; заявитель и патентообладатель ООО Промышленная компания «Технология металлов» (RU) – № 2011112128/03, 2010.06.22; заявл. 2010.06.22; опуб. 2012.09.20 (дата обращения: 15.05.2022).

23. Пат. RU 2 492 913 C1 МПК B01D 45/12 (2006.01), B04C 3/00 (2006.01), Способ очистки газов и пылеулавливающая установка для его осуществления // Ченцов А.В., Барсуков Б.Н.; заявитель и патентообладатель Ченцов А.В. – № 2012101720/05, 2012.01.18; заявл. 2012.01.18; опуб. 2013.09.20 (Дата обращения: 10.05.2022).

24. Пат. RU 2 623 394 C1 МПК F23G 5/00, F27B 15/10, F27B 1/16, B09B 3/00, Способ термического обезвреживания твердых коммунальных отходов в шлаковом расплаве // Сборщиков Г.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Экотепломаш» (RU) – № 2016108824, 2016.03.11; заявл. 2016.03.11; опуб. 2017.06.26 (дата обращения: 15.05.2022).

25. Пат. RU 2 716 652 C1 МПК F23G 5/027, F23B 80/02, Способ термической переработки твердых коммунальных отходов на неподвижных колосниковых решетках // Миронос А.В., Чернов Н.А., Новиков И.К.; заявитель и патентообладатель Миронос А.В., Чернов Н.А., Новиков И.К. – № 2019126034, 2019.08.19; заявл. 2019.08.19; опуб. 2020.03.13 (дата обращения: 15.05.2022).

26. Подготовка эколога к деятельности по обращению с отходами производства и потребления : учебное пособие / составитель Т. А. Федорова. — Курган : КГУ, 2021. — 154 с. — ISBN 978–5–4217–0583–3. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/177977 (дата обращения: 04.06.2022).

27. Проектирование технологической линии газоочистки МСЗ №4 "Руднево", 2017 [Электронный ресурс] – https://trud.bobrodobro.ru/9337 (дата обращения: 10.05.2022).

28. Управление отходами : учебное пособие / А. Ф. Шиманский, Е. В. Зелинская, О. В. Мишинкина [и др.]. — Красноярск : СФУ, 2020. — 192 с. — ISBN 978–5–7638–4237–1. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/181581 (дата обращения: 04.06.2022).

29. Управление техногенными отходами : учебное пособие / В. Н. Коротаев, Н. Н. Слюсарь, Я. А. Жилинская [и др.]. — Пермь : ПНИПУ, 2016. — 390 с. — ISBN 978–5–398–01541–6. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/161217 (дата обращения: 04.06.2022).

30. Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" от 24.06.1998 N 89–ФЗ (последняя редакция) (Дата обращения: 10.05.2022).

31. Финоченко, В. А. Инженерная экология : учебное пособие / В. А. Финоченко, Г. Н. Соколова, Т. А. Финоченко ; под редакцией В. А. Финоченко. — Ростов–на–Дону : РГУПС, 2019. — 164 с. — ISBN 978–5–88814–855–6. —

Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/134041. С. 24–41 (дата обращения: 15.05.2022).

32. Chaudhery Hussain, Sunpreet Singh, Lalit Goswami. Waste–to–Energy Approaches Towards Zero Waste. 2021. С. 11 (дата обращения: 15.05.2022).

33. Daniel Tsang, Lei Wang. Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes, 2021. С.13–14 (дата обращения: 15.05.2022).

34. Paul Breeze. Energy from Waste, 2018 (дата обращения: 15.05.2022).

35. Renato Gavasci, Sarantuyaa Zandaryaa. Environmental Engineering and Renewable Energy, 2018. С.21–23 (дата обращения: 15.05.2022).

36. Zhao Youcal. Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste, 2018. С.30–32 (дата обращения: 15.05.2022).

Приложение А

Морфологический состав ТКО и после сортировки

Таблица А.1 – Морфологический состав ТКО до и после сортировки

Материал	На входе, %	На входе, кг	После сортировки, %	После сортировки, кг
На входе	100	560	100	496
Макулатура	5,3	30	4,3	20
Смешанное волокно	1,3	7	1,5	7
Газета	0,0	0	0,0	0
Картон	4,0	22	2,8	13
Пластик	20,3	114	19,0	88
ПЭТ	4,3	24	2,8	13
ПВД	5,0	28	3,2	15
Смешанный пластик	10,5	59	12,8	59
Пленка	0,5	3	0,4	2
Металл	1,8	10	0	0
Черный металл	1,5	8	0	0
Алюминий	0,3	2	0	0
Стекло	9,2	52	0	0
Органические отходы	27,0	151	32,7	151
Дерево	1,0	5	1,1	5
Кожа/Резина	1,0	6	1,3	6
Пищевые отходы	25,0	140	30,3	140
Текстиль	3,0	17	3,7	17
Отсев	33,4	186	40,3	186
Всего	100,0	560	100	462

Приложение Б

Виды камер сжигания

Таблица Б.1 – Виды камер сжигания

Вид камеры сжигания	Преимущества	Недостатки
Способ расположения камеры сжигания:		
Вертикальная	– эффективность горения в следствии длительного контакта горючих газов с отходами (тепловой коэффициент полезного действия составляет 0,8–0,9); – занимаемая площадь камеры меньше горизонтальной (вертикальная камера сжигания производительностью 500 кг/ч занимает в среднем 1–2 м^3, а горизонтальная камера с той же производительностью занимает в среднем 7–8 м^3).	– возможность спекания и слипания твердых частиц (за счет малой площади сжигания отходов, частицы располагаются неравномерно).
Горизонтальная	– меньшее спекание и слипание твердых частиц за счет большей площади сгорания отходов (при одинаковой производительности вертикальной и горизонтальной, спекаемость у горизонтальной меньше на 15%).	– несгоревшие частицы отходов скапливаются на подине, следовательно необходимо дожигание с помощью горелок, установленных на двух сторонах камеры.
Тип работы камеры сжигания:		
Непрерывная	– постоянная температура в камере сжигания (не требуется поддержание температуры во время периода остановки камеры); – надежность соблюдения назначенного технологического режима; – сокращение расхода топлива (топливо не расходуется на поддержание температуры, следовательно, расход уменьшается в среднем на 10–15 %).	– в следствии непрерывной работы повышается износ камеры и снижается доремонтный ресурс
Периодическая	– эксплуатационные и финансовые затраты меньше, в сравнении с непрерывной (срок эксплуатации повышается за счет меньшего износа камеры)	– во время периода остановки камеры требуется расход дополнительного топлива на поддержание температуры.

Продолжение таблицы Б.1

Вид камеры сжигания	Преимущества	Недостатки
Тип работы решеток в камере сжигания:		
Подвижные	– спекаемость шлака на решетках за счет подвижных элементов происходит в меньшем объеме, чем на неподвижных (объем зависит от общего содержания углерода в отходах, температуры, зольности и влажности. При температуре 800 °С, влажности не более 20% и зольности не более 20% объем спекаемости не превышают 10 %).	– стоимость решеток и их обслуживание выше за счет присутствия подвижных элементов.
Неподвижные	– отсутствие подвижных элементов (низкие эксплуатационные и финансовые затраты).	– при температуре 800 °С, влажности не более 20 % и зольности не более 20 % объем спекаемости не превышают 15 %.
Способ сжигания в камере:		
Камера кипящего слоя (потребление энергии 20 кВт)	– интенсификация горения отходов (объясняется увеличением удельной поверхности окисления и постоянным «обновлением» его поверхности, благодаря интенсивной пульсации); – снижение концентрации вредных дымовых газов за счет высокой температуры горения (1000–1200 °С).	– равномерное распределение частиц в слое за счет эффекта «кипения».
Многоподовая камера (потребление энергии 35 кВт)	– простота обслуживания и устойчивость работы при колебаниях количества и качества обрабатываемых отходов.	– наличие вращающихся элементов в зоне горения.
Барабанная камера (потребление энергии 35 кВт)	– возможность сжигать отходы с большой зольностью и влажностью; – возможность переработки нефтешламов, буровых шламов и опасных отходов (в рамках данной работы в этом нет необходимости).	– разрушение футеровки в процессе работы за счет постоянного вращения камеры.
Циклонная камера (потребление энергии 45 кВт)	– высокоэффективна в переработке в распылённом состоянии жидких или мелкодисперсных твёрдых отходов (в рамках данной работы в этом нет необходимости).	– низкая производительность (до 200–300 кг/ч); – сложность в эксплуатации.

На основе рассмотренных преимуществ и недостатков сделан выбор подходящей камеры сжигания ТКО.

Приложение В

Проведенный патентный поиск способа термической переработки ТКО

Таблица В.1 – Проведенный патентный поиск способа термической переработки ТКО

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Достоинства	Недостатки
1	1. RU 2 623 394 C1 МПК F23G 5/00(2006.01) F27B 15/10(2006.01) F27B 1/16(2006.01) B09B 3/00(2006.01)	Сборщиков Г.С.	Способ термического обезвреживания твердых коммунальных отходов в шлаковом расплаве	«Обезвреживание отходов осуществляют в ванне шлакового расплава за счет загрузки шихты непосредственно на уровень расплавленной шлаковой ванны и подачи в расплав воздуха, подогретого до 500 °С. (эффективность сжигания достигается до 0,7–0,8)» [24].	« Высокая производительность процесса обеспечивается мощным перемешиванием ванны расплава дутьем, что ускоряет протекающие массо– и теплообменные процессы» [24].	«Для проведения процесса необходимо продувать шлаковых расплав, что является повышением потребления воздуха (30–40 %); относительно низкая температура сжигания (неполное разложение загрязняющих веществ, таких как диоксины и фураны)» [24].

Продолжение таблицы В.1

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Достоинства	Недостатки
2	RU 2 716 652 C1 МПК F23G 5/027(2006.01) F23B 80/02(2006.01)	Миронос А. В. Чернов Н. А. Новиков И. К.	Способ термической переработки твердых коммунальных отходов на неподвижных колосниковых решетках	«ТКО загружается поверх неподвижной колосниковой решетки в разогретую камеру сжигания. Проводят сжигание при температуре 800 °С. Критерием эффективности (0,6–0,7) предполагается считать высокое тепловое напряжение в топке и уменьшение количества зольных остатков» [25].	«Снижение суммарной величины тепловых потерь с химическим и механическим недожогом на выходе из топки до 10%; отсутствие необходимости внесения дополнительных источников топлива – в процессе утилизации ТКО, с возможностью достижения теплового напряжения камеры сгорания 0,2 МВт/м^3, за счет утилизации ТКО» [25].	«Отсутствие возможности утилизации неоднородного топлива (например, ТКО естественной влажности); способ имеет сложность конструкции и необходимость использования дополнительного существенного, по потребляемой мощности, источника тепловой энергии» [25].

Продолжение таблицы В.1

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Достоинства	Недостатки
3	RU 2 461 776 C1 МПК F23G 5/00(2006.01) F23G 5/04(2006.01) B09B 3/00(2006.01)	Голубев А. А. Гудим Ю. А. Грачев В. А. Дыдычкин В. П.	Способ термической переработки твердых коммунальных отходов с камерой дожига	«Способ включает сушку отходов перед подачей в плавильную камеру, нагретой до 200–300°С (максимальная температура 600 °С), загрузку их с регулируемой скоростью в плавильную камеру. Образующиеся газы по патрубку передают в котел, где осуществляют их дожигание и утилизацию тепла получаемых газов» [22].	«Техническая и экономическая эффективность процесса переработки ТКО; обеспечение быстрого нагрева отходов, поступающих в камеру, за счет повышения скорости нагрева загружаемых отходов в интервале температур 180–600°С» [22].	«Сжигание органических отходов протекает медленно, в следствии чего углерод окисляется только до СО; недостаточная тепловая мощность при расходе тепла на испарение влаги, в следствии чего понижается температура горения, увеличивается расход топлива; образование диоксинов и фуранов при медленном нагреве камеры в интервале» [22].

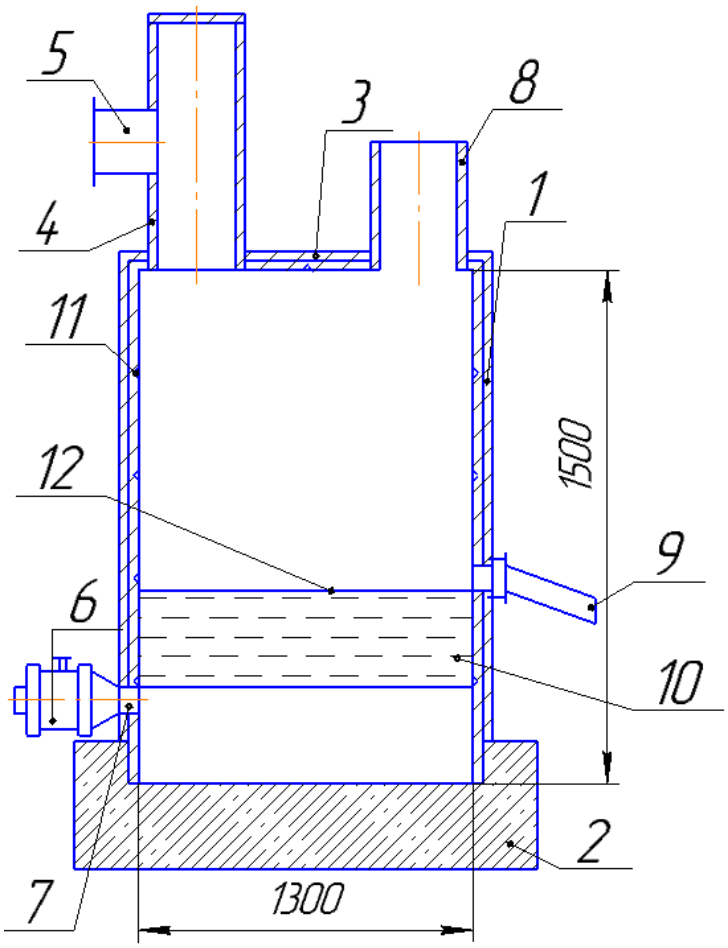
Продолжение таблицы В.1

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Достоинства	Недостатки
4	RU 2 085 807 C1 МПК F23G 7/00 (2006.01)	Семенов В.Н.	Способ термической переработки твердых коммунальных отходов в камере кипящего слоя	«В камеру через окна загрузочного устройства подают ТКО, включают в работу топливные горелки. температура газов на выходе 1000–1150 ºС. Создается кипящий слой. За счет эффекта «кипения» отходы перемешиваются. В кипящий слой непрерывно подаются отходы. Образующийся шлак непрерывно выливается из желоба. (эффективность камеры достигает 0,8–0,9)» [16].	«При данной температуре (до 1150 ºС) протекает полное разложение вредных соединений (таких как бенз(а)пирены, диоксины и фураны), следовательно, количество вредных выбросов снижается; низкое потребление топлива за счет непрерывного действия работы» [16].	«Неравномерное распределение частиц в слое» [16].

На основе рассмотренных способов термической переработки ТКО сделан выбор оптимального и эффективного способа переработки отходов.

Приложение Г

Камера термической переработки отходов



1 – Корпус; 2 – Подина, футерованная кирпичом; 3 – Свод; 4 – Загрузочное устройство; 5 – Окна для загрузки отходов; 6 – Топливные горелки; 7 – Трубопровод подачи в камеру сжигаемого агента; 8 – Патрубок отвода дымовых газов; 9 – Желоб; 10 – Кипящий слой; 11 – Теплоотводящие элементы кессоны; 12 – Неподвижная решетка.

Рисунок Г.1 – Камера термической переработки отходов

Приложение Д

Патентный поиск системы очистки дымовых газов

Таблица Д.1 – Патентный поиск системы очистки дымовых газов

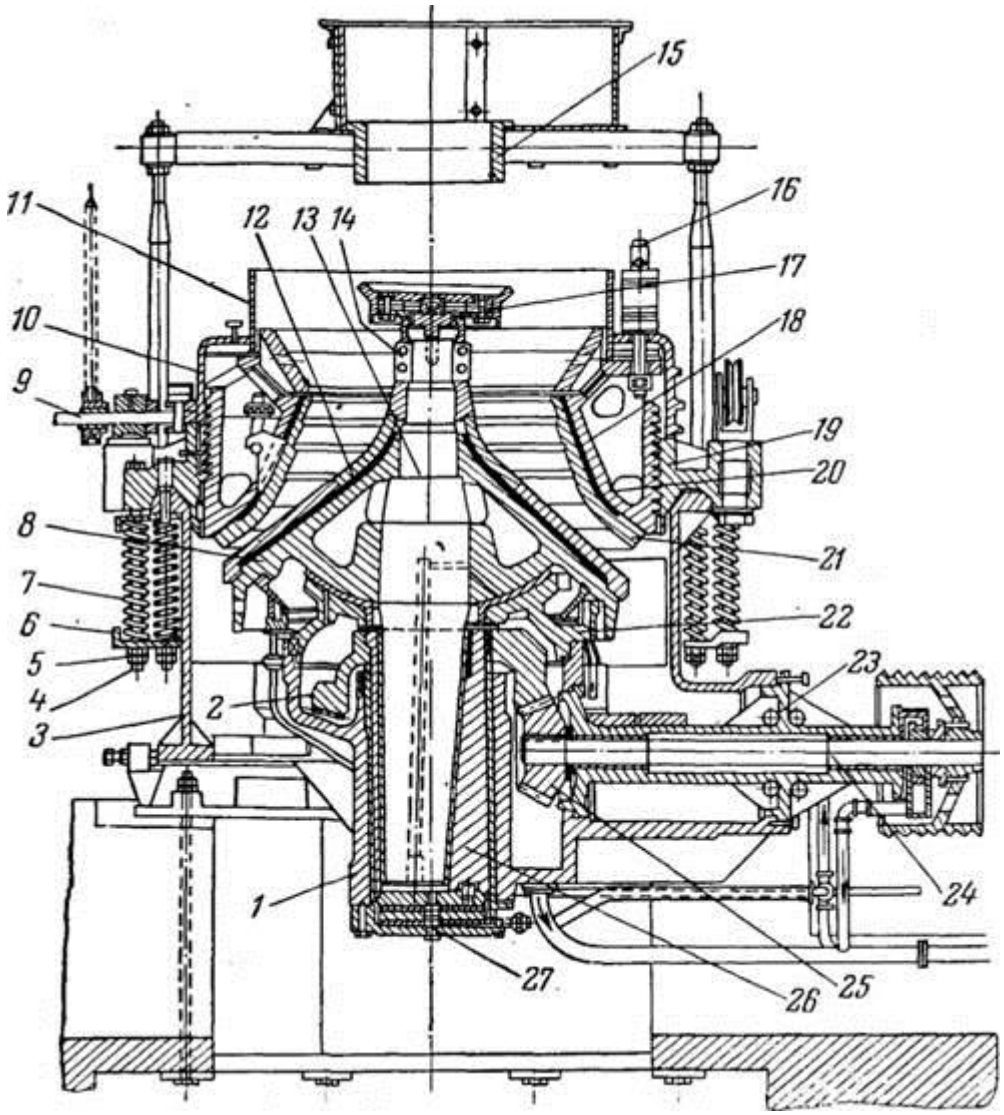
№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Преимущества	Недостатки
1	RU 2 209 657 C2 МПК B01D 53/02 (2006.01) B01D 53/34 (2006.01) B01D 53/50 (2006.01) B01D 53/68 (2006.01) B01D 53/81 (2006.01)	Охан Стефан Бринфорс Нильс	Способ и устройство для очистки дымовых газов	«Способ относится к области очистки дымовых газов порошковой гашеной известью в абсорбере. Негашеную известь подвергают гашению водой до получения содержания влаги в гашеной извести, по меньшей мере 5 % и осуществляют контакт гашеной извести с дымовыми газами в течении 1 мин. гашения» [19].	«Эффективная очистка дымовых газов от кислых компонентов (до 99 %)» [19].	«Количество воды при гашении извести необходимо очень точно дозировать, поскольку добавление большего количества воды, чем требуется для гашения, приводит за счет водяного пара к экзотермической реакции гашения, вызывая образование комков» [19].
2	RU 2 200 053 C1 МПК B01D 53/00 (2006.01)	Рынейский В.А. Семенов В.Н. Головченко С.С. Зубова М.С. Краснопевцева Н.В.	Способ очистки дымовых газов (скруббер)	«Эффективность метода очистки дымовых газов от вредных элементов заключается в введении в их поток адсорбентов, реагирующих с вредными примесями с образованием шлама. Адсорбент вводят непосредственно в камеру для сжигания, где он прокаливается, а затем вместе с дымовым газом попадает в устройство орошения водой для очистки газа от вредных элементов. (до 95 %)» [18].	«Степень очистки газа повышается также и за счет выпадания из него значительного количества частичек; за счет подогрева стенок скруббера и газовода обеспечивается предотвращение налипания на них частичек продуктов реакций, что увеличивает ресурс работы установки; использование в качестве распыляемой жидкости чистой воды исключает забивание форсунок и возможность выхода из строя всей установки» [18]..	«Неэффективно при пропускании большого количества газа в единицу времени при высоких температурах. Предварительный обжиг адсорбента значительно усложняет процесс очистки газа, делает его энергоемким, поскольку требует применения дополнительного оборудования» [18].

Продолжение таблицы Д.1

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Описание способа	Преимущества	Недостатки
3	RU 113669 U1 МПК B01D 47/00 (2006.01)	Савченко Г.Э. Кацнельсон Л.О. Вальдберг А.Ю. Левашов А.С.	Система мокрой очистки отходящих газов горения	«Система включает расположенные по ходу движения отходящего газа рекуперативный воздухонагреватель, скруббер–охладитель Вентури, распылительную сушилку, пылеуловитель, скруббер–газопромыватель Вентури с каплеотбойником, дымовую трубу с дымососом» [14].	«Эффективная очистка газов от загрязняющих веществ (до 99 %)» [14].	«Для обработки больших объемов прореагировавшей с газом при его очистки воды, отделения ее от шлама и возврата в аппараты требуется сооружение громоздких, капиталоемких, сложных систем оборотного водоснабжения, которые значительно удорожают процесс очистки газа и делают его равным со стоимостью очистки при применении более эффективных систем сухой очистки газов» [14].
4	RU 2 492 913 C1 МПК B01D 45/12 (2006.01) B04C 3/00 (2006.01)	Ченцов А.В.	Способ очистки газов и пылеулавливающая установка для его осуществления	«Газ подают на первую ступень очистки (циклон), за счет чего происходит первичное разделение потока на очищенную от дисперсных частиц и смесь, направляемую на вторую ступень очистки (абсорбер). Вторую ступень очистки осуществляют путем направления газа в аппарат и подвергают абсорбции» [23].	«Эффективная многоступенчатая очистка дымовых газов (до 99 %) и дешевизна аппаратов» [23].	«Необходимость остановки системы для очистки циклона, необходимость очистных сооружений» [23].

Приложение Е

Схема конусной дробилки

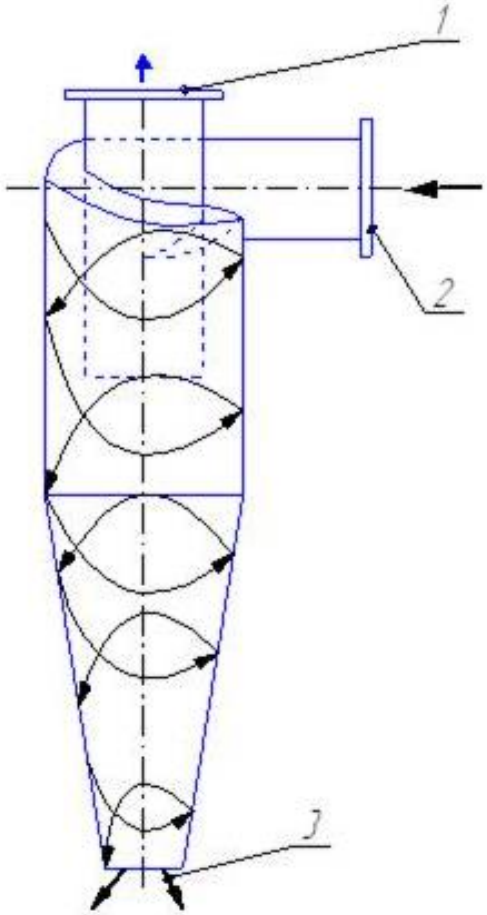


«1 – направляющий стакан; 2 – ведомая шестерня; 3 – станина; 4 – натяжной болт; 5 – гайка; 6 – шайба; 7 – пружина; 8 – внутренний конус; 9 – винтовой домкрат; 10 – кожух; 11 – приемная воронка; 12 – защита внутреннего конуса; 13 – центральный вал; 14 – фасонная гайка; 16 – загрузочная воронка; 16 – стержни с клиновым креплением; 17 – приемная тарелка; 18 – цинковая заливка; 19 – установочное кольцо; 20 – внешний конус; 21 – защита внешнего конуса; 22 – сферическая опора; 23 – стакан; 24 – ведущий вал; 25 – ведущая шестерня; 26 – эксцентриковый стакан; 27 – опорная пята эксцентрикового стакана» [13].

Рисунок Е.1 – Схема конусной дробилки

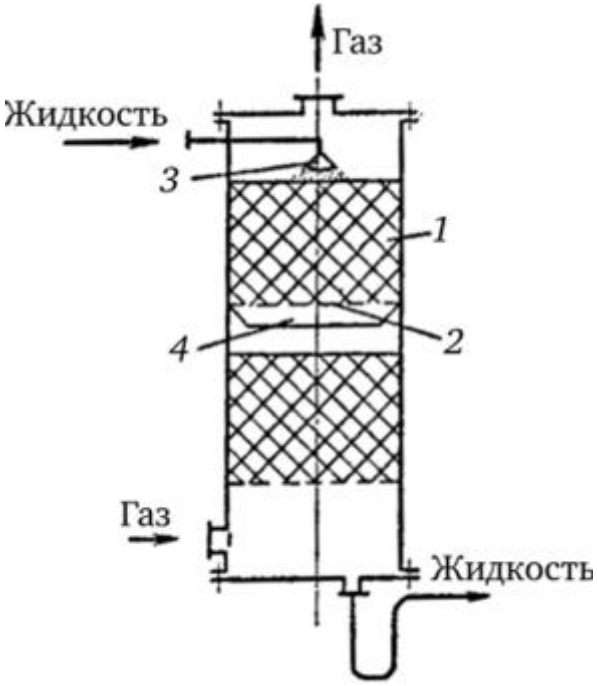
Приложение Ж

Аппаратная часть системы очистки газов



1 – труба вывода очищенного газа; 2 – патрубок для входа запыленного газа; 3 – пылеприемник

Рисунок Ж.1 – Схема цилиндрического циклона



1 – насадка; 2 – опорная решетка; 3 – распределитель жидкости; 4 – распределитель жидкости колонны

Рисунок Ж.2 – Схема абсорбера

Приложение И

Химический состав и свойства природного газа (топлива)

Таблица И.1 – Химический состав и свойства природного газа (топлива)

Компонент	Химическая формула	Числовое значение	Единица измерения	Обозначение в формулах
Метан	CH_4	91,4	%	CH_4
Этан	C_2H_6	4,1	%	C_2H_6
Пропан	C_3H_8	1,9	%	C_3H_8
Бутан	C_4H_{10}	0,6	%	C_4H_{10}
Гептан	C_5H_{12}	0	%	C_5H_{12}
Азот	N_2	0.2	%	N_2
Непредельные углеводороды	C_xH_y	1,1	%	C_XH_Y
Углекислый газ	CO_2	0,7	%	CO_2
Угарный газ	CO	0	%	CO
Водород	H_2	0	%	H_2
Сероводород	H_2S	0	%	H_2S
Вода	H_2O	0	%	H_2O
Кислород	O_2	0	%	O_2
Влагосодержание	–	10	г/кг	d_r
Плотность	–	0,883	кг/м^3	ρ_{ns}
Теплотворная способность	–	24560	кДж/кг	$Q_{пг}$

Химический состав и свойства природного газа необходимы для расчета необходимого количества топлива для эффективного процесса горения.

Приложение К

Конструктивные параметры циклона ЦН–15

Таблица К.1 – Рассчитанные конструктивные параметры циклона ЦН–15

Наименование	Обозначение	Соотношение в долях диаметра (для ряда конструктивных параметров)	Значение	Принятые значения
Диаметр аппарата, м	$D_ц$	–	3,0	3,0
Внутренний диаметр выхлопной трубы, м	d	$0,59\cdot D_ц$	1,77	1,8
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия, м	d_1	$0,4\cdot D_ц$	1,2	1,2
Ширина входного патрубка в циклоне (внутренний размер), м	b	$0,2\cdot D_ц$	0,6	0,6
Ширина входного патрубка на входе (внутренний размер), м	b_1	$0,26\cdot D_ц$	0,78	0,8
Длина входного патрубка, м	l	$0,6\cdot D_ц$	1,8	1,8
Диаметр средней линии циклона, м	$D_{ср}$	$0,8\cdot D_ц$	2,4	2,4
Высота выхлопной трубы	h_1	$1,74\cdot D_ц$	5,22	5,2
Высота установки фланца, м	$h_{фл}$	$0,1\cdot D_ц$	0,3	0,3
Высота входного патрубка (внутренний размер), м	a	$0,66\cdot D_ц$	1,98	2,0
Высота цилиндрической части циклона, м	$H_ц$	$2,26\cdot D_ц$	6,78	6,8
Высота конуса циклона, м	$H_к$	$2\cdot D_ц$	6,0	6,0
Высота внешней части выхлопной трубы, м	$h_в$	$0,3\cdot D_ц$	0,9	0,9
Общая высота циклона, м	H	$4,56\cdot D_ц$	13,68	13,7
Угол развертки, град (рад)	φ	–	135 (2,35)	135 (2,35)

Приложение Л

Патентный поиск по применению золошлаковых отходов

Таблица Л.1 – Патентный поиск по применению золошлаковых отходов

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Принцип способа применения
1	1. RU 2 052 400 C1 МПК C03C 10/06 (2006.01) C03C 1/00 (2006.01) C03C 10/00 (2006.01)	Баякин С.Г. Аншиц А.Г. Павлов В.Ф. Шабанов В.Ф.	Способ получения стекломатериала из золошлаковых отходов	«Известный способ получения стекломатериалов из золошлаковых отходов, заключается в том, что шихту нагревают до температуры плавления и плавят в восстановительной среде, а затем полученный расплав термоударом охлаждают до образования стекломатериала» [15]. «Данным способом практически из всех широкоизвестных золошлаковых отходов можно получать стекломатериалы со сравнительно низким коэффициентом теплопроводности, что позволяет их широко использовать в качестве теплоизоляционных материалов. Однако известным способом невозможно осуществить полную очистку обрабатываемых золошлаковых отходов от примесей переходных соединений металлов, что значительно снижает область использования получаемых стекломатериалов, так как их невозможно использовать в качестве сырья для получения оптически прозрачных стекломатериалов» [15]. «В тех случаях, когда необходимо получить стекломатериал сферической формы, находящий широкое применение в различных областях промышленности от химической (например, в качестве фильтров) до авиационной (например, в качестве легкого и теплоизоляционого материала), необходимо, чтобы газовая среда была образована дополнительно подаваемым инертным газом» [15].
2	RU 2 311 236 C2 МПК B09B 3/00 (2006.01) C04B 18/10 (2006.01) C04B 28/00 (2006.01)	Рахманов В.А. Мелихов В.И. Казарин С.К. Козловский А.И. Амханицкий Г.Я. Гробовец М.Н.	Способ утилизации золошлаковых отходов мусоросжигания	«Изобретение относится к области строительных материалов, в частности к утилизации золошлаковых отходов сжигания ТКО при производстве бетона или сборных железобетонных изделий с повышенными требованиями, предъявляемыми к бетонам в дорожном и других видах строительства» [20]. «Утилизация золошлаковых отходов предусматривает их использование для получения бетонов и бетонных изделий, имеющих невысокие физико–механические характеристики, такие как прочность и морозостойкость, которые могут использоваться в основном в ограждающих конструкциях жилых и общественных зданий» [20].

Продолжение таблицы Л.1

№ п/п	Номер патента	Авторы	Название патента	Принцип способа применения
3	RU 2 436 855 C1 МПК C22B 21/00 (2006.01) C22B 3/06 (2006.01) C22B 7/00 (2006.01) C01F 7/74 (2006.01) C01G 49/00 (2006.01)	Александрова Т.Н. Прохоров К.В.	Способ извлечения алюминия и железа из золошлаковых отходов	«Способ извлечения алюминия и железа из золошлаковых отходов, включающий обработку раствором серной кислоты с экстракцией алюминий–содержащих компонентов в раствор, заключается в том, что перед экстракций алюминий–содержащих компонентов в раствор отходы подвергают классификации и многостадийной магнитной сепарации при периодическом увеличении поля магнитной индукции для полного выделения магнитной фракции, содержащей железо, а экстракцию алюминий–содержащих компонентов проводят из немагнитной фракции сначала обработкой 60–85 %–ным раствором ортофосфорной кислоты в течение 3 ч при температуре 100–120°С с последующей фильтрацией и затем обработкой осадка раствором серной кислоты, при этом обработку ведут 30%–ным раствором серной кислоты» [21]. «Техническим результатом является извлечения алюминия и железа при экстракции из золошлакового материала» [21].
4	RU 2 171 150 C1 МПК B09B 3/00 (2006.01) C04B 18/10 (2006.01) C04B 20/10 (2006.01)	Бикбау М.Я. Бикбау Я.М. Федоров О.Л.	Способ переработки токсичных отходов	«Способ переработки токсичных отходов, преимущественно зол и шлаков мусоросжигательных заводов, включающий смешивание отходов с вяжущим, добавками и наполнителями и последующее структурирование полученной смеси, отличающийся тем, что золу, дробленый шлак, наполнители и портландцемент подвергают совместному помолу в присутствие добавок–нейтрализаторов в течение 5–25 мин, продукт помола структурируют путем агломерации в сферический гранулят, после чего окатыванием формируют на поверхности гранул оболочку–капсулу из цементно–кремнеземистого раствора» [17]. «Предлагаемый способ переработки высокотоксичных отходов мусоросжигательных заводов обеспечивает практически полное их обезвреживание: содержание вредных веществ в продуктах переработки многократно ниже требуемого уровня ПДК, – что создает предпосылки для широкого их использования в качестве экологически чистого продукта» [17].