Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. ЛЕНИНА»

На правах рукописи



Габитов Рамиль Наилевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Колибаба Ольга Борисовна

Иваново – 2017

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	. 13
1.1. Способы термической переработки твердых коммунальных отходов	. 13
1.1.1. Сжигание твердых коммунальных отходов	. 13
1.1.2. Пиролиз твердых коммунальных отходов	. 15
1.1.3. Газификация твердых коммунальных отходов	. 19
1.2. Установки для термической переработки твердых коммунальных отходов	
методом пиролиза	. 20
1.3. Теплофизические свойства твердых коммунальных отходов	. 32
1.4. Моделирование тепло- и массообмена в процессе переработки твердых	
коммунальных отходов	. 37
1.5. Выводы по главе и постановка задач исследования	. 39
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА	
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ	. 41
2.1. Материалы и методы исследования	. 41
2.2. Результаты термогравиметрических экспериментов	. 43
2.3. Результаты масс-спектрометрии и определение теплотворной способности	
пиролизного газа	. 46
2.4. Выводы по второй главе	. 53
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПЕССОВ ТЕПЛО- И	
МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ СУЩКИ ТВЕРЛЫХ КОММУНАЛЬНЫХ	
отхолов	54
3.1. Определение эффектирация теплофизических свойств трерлику коммунальны	
э.т. определение эффективных теплофизических своиств твердых коммунальни	54
	, 34
5.2. исследование внешнего тепло- и массооомена в процессе сушки твердых	(1
коммунальных отходов	. 01
3.3. Определение погрешности эксперимента	. 70

3.4. Выводы по третьей главе	72
4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ТВЕРДЫХ	
КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ	74
4.1 Описание объекта исследования	74
4.2 Математическая модель процесса сушки	75
4.2.1. Постановка задачи	75
4.2.2. Определение эффективных теплофизических коэффициентов	76
4.2.3. Методика определения внутреннего стока теплоты	76
4.2.4. Методика проведения эксперимента	77
4.3. Обработка экспериментальных данных	81
4.4. Реализация модели	83
4.5. Проверка адекватности математической модели	86
4.5.1. Сопоставление с экспериментальными данными	86
4.5.2. Сопоставление с расчетом по методу С.В.Федосова.	88
4.6. Выводы по четвертой главе	91
5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ	
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ	92
5.1. Описание конструкции и принципа действия реактора для утилизации	
твердых коммунальных отходов	92
5.2. Тепловой баланс реактора	94
5.2.1. Тепловой баланс зоны сушки	95
5.2.2. Тепловой баланс зоны пиролиза	97
5.2.3. Тепловой баланс камеры горения	100
5.3. Продолжительность сушки и расчет конструктивных параметров	
термореактора	104
5.4. Расчет капиталовложений и сроков окупаемости установки на основе	
пиролиза твердых коммунальных отходов	109
5.5. Выводы по пятой главе	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В Российской Федерации по состоянию на 2016 г накоплено более 35 млрд т отходов. Темпы роста образования отходов превышают в 2 раза объем их использования. Общий объем затрат на охрану окружающей среды за 5 лет составляет 0,7 – 0,8% от ВВП ежегодно[111]. Проблема отходов как основных загрязнителей окружающей среды стала актуальной.

Большую группу отходов составляют продукты жизнедеятельности человека - твердые коммунальные отходы (ТКО). Твердые коммунальные отходы - отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд. К твердым коммунальным отходам также относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами [112].

В России до 90% образовавшихся ТКО подвергают захоронению на полигонах и свалках. С 2010г по 2015г объем ТКО увеличился на 20%. Связанное с этим отчуждение полезных земель под полигоны в РФ также возрастает (в 2014 г эта площадь составила 5000 га, а в 2015 – 8000 га). Увеличение затрат на транспортировку и захоронение ТКО, наличие постоянной экологической опасности из-за размещения больших объемов отходов на свалках приводит к необходимости промышленной переработки ТКО как способу, в наибольшей степени учитывающему требования экономики, экологии и энергоресурсосбережения.

В мировой практике для утилизации ТКО используют термические, химические, биологические и физико-химические методы. При содержании в ТКО до 70% органической (горючей) фракции отдают предпочтение переработке термическими методами [1, 7, 8, 102]. Термическую переработку ТКО осуществляют в специальных печах – термических реакторах [11, 22, 70, 90, 98]. Использование ТКО в качестве сырья для термических реакторов позволяет утилизировать их с получением горючего газа – термогаза (пирогаза). Переход на предлагаемое использование ТКО вызывает необходимость применения передовых энергоэффективных технологий и технически совершенного оборудования. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Актуальность темы диссертации подтверждается её соответствием приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (указ Президента РФ № 899 от 07.07.2011), критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», а также увеличением числа публикаций, посвященных совершенствованию технологий и оборудования для переработки ТКО.

Степень разработанности темы диссертации. В настоящее время для экономически выгодной, экологически безопасной и технически доступной переработки ТКО без предварительной сортировки используются термические методы, в том числе пиролиз. Процесс пиролиза смеси ТКО и, особенно, отдельных ее компонентов хорошо изучен. Между тем, окислительный пиролиз, являющийся наиболее универсальным и не зависящим от фракционного состава и фазового состояния отходов, их влажности и зольности, изучен недостаточно.

В шахтных печах, предназначенных для утилизации ТКО, процессу пиролиза предшествует высушивание исходного сырья. Наличие избыточной влаги снижает калорийность пиролизного газа, использующегося в качестве топлива для теплоэнергетических установок. В теплотехнологии уничтожения ТКО недостаточное внимание уделяется исследованию сушки отходов как наиболее энергозатратному процессу, влияющему на энергетическую эффективность работы реактора.

В расчетах тепломассообменных процессов, протекающих в реакторе, многокомпонентный полидисперсный слой ТКО заменяют его моделью - единым условным изотропным пористым телом, которому приписывают непрерывное

температурное поле и условные эффективные теплофизические свойства. В настоящее время существует большое количество различных методов и методик для определения эффективных теплофизических характеристик пористых тел. Что касается твердых коммунальных отходов, то в литературе имеются лишь разрозненные данные, полученные на основе экспериментальных исследований теплофизических свойств некоторых отдельно взятых компонентов ТКО.

Целью работы является повышение эффективности термической переработки твердых коммунальных отходов методом окислительного пиролиза.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие научно-технические задачи:

1. Провести анализ мирового и отечественного опыта использования ТКО в качестве энергетического сырья. Сформулировать основные направления исследований.

2. Провести термический анализ смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с целью повышения эффективности ее энергетического использования в теплотехнологии.

3. Экспериментально исследовать эффективные теплофизические свойства ТКО среднего морфологического состава в зависимости от влажности сырья и порозности слоя.

4. Разработать математическую модель тепло- и массообмена в плотном слое в процессе его сушки, позволяющую учесть многокомпонентный состав ТКО.

5. Получить критериальные уравнения, позволяющие определять коэффициенты тепло- и массоотдачи, влияющие на процесс сушки слоя ТКО среднего морфологического состава.

6. Предложить конструкцию установки для переработки ТКО и рациональные режимы ее работы.

Научная новизна.

1. Впервые экспериментально определены состав и объемы газов, максимальная скорость убыли массы, температура пиков тепловыделения и величины тепловых эффектов при проведении термического анализа смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10%.

2. Впервые экспериментально определены эффективные коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и массопроводности смеси ТКО среднего морфологического состава с учетом влажности сырья, температуры и порозности слоя в процессе его сушки.

3. Получены критериальные уравнения, позволяющие определить коэффициенты тепло- и массоотдачи, влияющие на процесс конвективной сушки слоя ТКО среднего морфологического состава.

4. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения внутреннего источника (стока) теплоты, образующегося в процессе сушки много-компонентного слоя ТКО среднего морфологического состава.

5. Получены новые данные по выходу пиролизного газа и КПД установки для утилизации ТКО в зависимости от влажности исходного сырья и содержания кислорода в атмосфере.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем.

Раскрыта проблема экспериментального подтверждения эффективности энергетического использования твердых коммунальных отходов в теплотехнологии путем проведения термического анализа смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза.

Изложены основные положения методов определения эффективных теплофизических свойств смеси ТКО среднего морфологического состава и коэффициентов внешнего переноса теплоты и массы вещества в процессе сушки плотного слоя отходов.

Изложены основные положения методики определения внутреннего источника (стока) теплоты, образующегося в процессе сушки многокомпонентного слоя ТКО среднего морфологического состава, и доказана возможность ее использования для расчета полей температур и влагосодержаний в слое в процессе его переработки.

Применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы моделирования нестационарного тепло- и массообмена и решения краевых задач переноса для исследования процесса утилизации ТКО в термическом реакторе шахтного типа.

Практическая значимость.

1. Предложены рациональные режимы и конструктивные характеристики печи шахтного типа для переработки ТКО методом пиролиза.

2. Предложена конструкция термического реактора для переработки ТКО с получением газообразного топлива.

3. Результаты работы могут быть использованы для расчета конструктивных характеристик зоны сушки термического реактора с учетом структурной деформации (усадки) многокомпонентного слоя ТКО среднего морфологического состава.

4. Результаты экспериментальных исследований эффективных теплофизических свойств, термогравиметрических характеристик ТКО и продуктов их термической конверсии внедрены на производстве ООО «НТИЦ Экосервис Прим» г. Москва при разработке пилотного образца установки термического обезвреживания отходов.

Методология и методы исследования.

Методология построения работы основана на базовых знаниях теории тепло- и массообмена применительно к расчетам промтеплоэнергетического оборудования. В диссертационной работе использованы расчетные и экспериментальные методы исследований. В качестве расчетных методов применено математическое моделирование в программных комплексах ANSYS, MATHCAD.

Экспериментальные исследования выполнены при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH и на лабораторных установках собственной разработки.

На защиту выносится:

1. Результаты термического анализа смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза.

2. Результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик смеси ТКО среднего морфологического состава в процессе сушки.

3. Результаты экспериментальных исследований конвективной сушки смеси ТКО среднего морфологического состава.

4. Методика определения внутреннего стока теплоты в процессе сушки слоя ТКО среднего морфологического состава.

5. Эффективные режимы работы печи (выход пиролизного газа и КПД установки в зависимости от влажности исходного сырья и содержания кислорода в атмосфере).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования процессов тепло- и массообмена; использованием экспериментальных данных; согласованностью результатов расчета с экспериментальными данными и с опубликованными данными других авторов.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в проведении экспериментальных исследований процесса окислительного пиролиза ТКО и обработке данных термического анализа отходов среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов; в получении и обработке экспериментальных данных эффективных теплофизических свойств ТКО в зависимости от влажности сырья, температуры слоя в процессе его сушки; в разработке методики определения внутреннего стока теплоты в процессе сушки слоя; в реализации в программно-вычислительном комплексе модели тепломассопереноса в процессе сушки ТКО; подготовке публикаций по тематике исследования и результатов интеллектуальной деятельности.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности*: «объединяющей исследования, по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем, по разработке и созданию нового и наиболее совершенного теплотехнического и теплового технологического оборудования ..., сбережение энергетических ресурсов»; *в части области исследования специальности*: пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло»; пункту 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и техникоэкономическими характеристиками» пункту 6 «Разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды».

Апробация работы

Основные положения работы, результаты теоретических, экспериментальных и расчетных исследований докладывались на: региональных научнотехнических конференциях студентов и аспирантов «Энергия-2011» - «Энергия-2017» в ИГЭУ (г. Иваново); на международном симпозиуме Европейский Экологический форум "Евро ЭКО Ганновер 2012"(г. Ганновер, 2012 г.); на XVII и XVIII международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии «Бенардосовские чтения» в ИГЭУ (г. Иваново, 2013, 2015, 2017 гг.); Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Всероссийская научнопрактическая конференция (г. Екатеринбург, 2014, 2015 гг.); на V, VIII, IX, X и XI международных молодежных конференциях "Тинчуринские чтения" (г. Казань, 2010, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.).

Публикации

Основное содержание проведенных исследований отражено в 38 печатных работах, в том числе в 10 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК, 3 публикациях индексируемых в международной базе SCOPUS, 5 патентах РФ на изобретение, 20 тезисах и полных текстах докладов конференций.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 155 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Работа содержит 46 рисунков и 8 таблиц, 6 приложений, список использованных источников содержит 114 наименований.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Способы термической переработки твердых коммунальных отходов

В процессе физиологической, хозяйственной деятельности человека происходит постоянное образование и накопление продуктов, потерявших потребительские свойства, – твердых коммунальных отходов.

Твердые коммунальные (бытовые) отходы представляют собой гетерогенную смесь, в которой присутствуют почти все химические элементы в виде различных соединений [31, 33, 40,48, 73, 90]. Наиболее распространенными элементами являются углерод, на долю которого приходится около 30% (по массе), и водород (4% по массе), входящие в состав органических соединений. Теплотворная способность отходов во многом определяется именно этими элементами [89].

В настоящее время в мировой практике реализовано более десятка технологий утилизации и переработки твердых коммунальных отходов. Самыми распространенными среди них являются термические способы – сжигание, пиролиз, газификация[1,10,35,40, 80, 89, 90,107,108].

1.1.1. Сжигание твердых коммунальных отходов

Уничтожение ТКО методом сжигания наиболее известно и изучено. Сжигание ТКО является окислительным процессом. Основными продуктами полного сгорания углерода (*C*) и водорода (*H*₂) являются диоксид углерода (*CO*₂) и вода (*H*₂*O*); при неполном сгорании образуются нежелательные продукты – монооксид углерода (*CO*), низкомолекулярные органические соединения, полициклические ароматические углеводороды, сажа[11, 17, 18,40].

При сжигании необходимо учитывать, что в ТКО присутствуют потенциально опасные элементы, характеризующиеся высокими токсичностью и летучестью, а также повышенным содержанием различных соединений галогенов (фтора, хлора, брома), азота, серы, тяжелых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия, олова, ртути)[26,40, 56, 59, 74, 82, 90].

В условиях сжигания ТКО галогены преимущественно находятся в виде их соединений с водородом (*HCl*, *HF*,*HBr*) и являются наиболее устойчивыми компонентами продуктов сгорания.

В работе [89] показано, что сера преимущественно (до 70%) переходит в нелетучие сульфаты, попадающие в шлак, и в летучий диоксид серы *SO*₂.

Все летучие продукты окисления ТКО присутствуют в дымовых газах. Ряд авторов в своих работах [4, 17, 40, 82, 89, 90] указывают, что в неочищенных дымовых газах примерные концентрации выбросов составляют (мг/куб.м): HCl = 300...1000; HBr = 100...500; HF = 2...10; $SO_2 = 100...500$.

Сухие ТКО содержат около 1% азота (по массе). Основной продукт окисления азота – монооксид азота *NO*, его обычная концентрация в неочищенном газе составляет $200 \div 400 \text{ мг/м}^3$ [17,40, 90].

Некоторые содержащиеся в ТКО тяжелые металлы (железо, хром, никель) не образуют летучих продуктов при сжигании и переходят в шлак [10,40,73].

Свинец и кадмий из летучих металлов образуют хлориды, уносящиеся с дымовыми газами. При охлаждении дымовых газов до 200°С эти соединения конденсируются и улавливаются вместе с золой на стадии газоочистки. В то же время один из наиболее токсичных металлов ртуть и ее соединения остаются преимущественно в газовой фазе и при более низких температурах.

По данным [89], концентрация металлов в уходящих газах при сжигании исходных ТКО в 10 – 100 раз превосходит концентрацию металлов в уходящих газах энергетических установок, работающих на каменном угле, т.е. тяжелые металлы являются специфическими выбросами мусоросжигательных заводов [4,17,40].

В процессе сжигания ТКО, особенно в условиях недожога, образуются токсичные соединения – полихлорбензодиоксины и полихлордибензофураны [18].

Существует два способа образования диоксинов и фуранов [10, 18, 56]:

1) из углерода в процессе его окисления при избытке кислорода в присутствии соединений хлора и соединений меди как катализаторов;

2) из соединений, которые уже имеют похожую структуру, например хлорбензолов и хлорфенолов.

Первичное образование диоксинов и фуранов в процессе сжигания ТКО происходит в температурном диапазоне 300 ÷ 600°С. Вторичное образование имеет место на стадии охлаждения дымовых газов, содержащих *HCl*, в интервале температур 250÷450°С. Температура начала распада диоксинов 700°С[40,89].

Для того чтобы обеспечить на стадии газоочистки снижение содержания диоксинов и фуранов до требуемых норм (0,1 нг/куб.м), при сжигании должны быть реализованы так называемые первичные мероприятия, в частности, «правило двух секунд»[78, 89], в соответствии с которым геометрия печи должна обеспечить время пребывания газов не менее 2 с в рабочем пространстве печи с температурой не менее 850 °C (при концентрации кислорода не менее 6%)[26,40, 88].

Стремление к достижению при сжигании максимально высоких температур и созданию дополнительных зон дожигания не решает полностью проблему снижения концентрации диоксинов в уходящих газах, так как не учитывает способности диоксинов к новому синтезу при снижении температуры. Высокие температуры приводят к увеличению выхода летучих компонентов и росту выбросов опасных металлов[17].

1.1.2. Пиролиз твердых коммунальных отходов

В настоящее время в качестве метода ликвидации ТКО значительный интерес представляет пиролиз. В отличие от горения, пиролиз характеризуется протеканием эндотермических реакций (процессов, сопровождающихся поглощением теплоты). Пиролизу подвергаются как сортированные, так и несортированные коммунальные отходы. Подвергаемые пиролизу отходы должны содержать 30÷60% органических материалов. При нагреве без доступа воздуха органическая часть отходов разлагается, образуя горючие газообразные продукты, жидкую фракцию (жижку) и твердый углеродистый остаток[5,35, 36, 47, 50,55, 60, 80, 96]. Преимущественное получение того или иного продукта определяется возможностями его использования.

В зависимости от температуры процесса, пиролиз подразделяют на низкотемпературный (до 550°С), среднетемпературный (до 800°С) и высокотемпературный (свыше 800°С) [1,54,86,98]. Выбор температурного режима пиролиза определяется конечной целью процесса, теплотворной способностью и температурой деструкции материала.

Так, низкотемпературный пиролиз не обеспечивает полного термического разложения целого ряда материалов, хотя для материалов с низкой точкой термического разложения вполне подходит[40,69,71]. При невысоких температурах процесса имеет место большой объем коксо-зольного остатка и невысокая скорость протекания процесса[68,95]. Однако такой пиролиз не предъявляет особых требований к конструктивному оформлению процесса.

Среднетемпературный пиролиз наиболее универсален, так как наряду с обеспечением достаточной для подавляющего числа материалов температуры процесса не требует сложных конструктивных решений, таких как при высокотемпературном пиролизе. При этом скорость протекания процесса значительно выше, чем при низкотемпературном пиролизе.

Основными преимуществами высокотемпературного пиролиза являются высокая скорость протекания процесса и наиболее полное, по сравнению с другими методами, термическое разложение материала. Однако необходимость обеспечения высокой температуры требует сложных конструктивных решений, что значительно усложняет и удорожает пиролизные установки. Повышение температурного уровня приводит, с одной стороны, к усложнению конструкторско-технических решений установок, а с другой – активизирует кинетические и тепло-массообменные процессы, позволяя, таким образом, принципиально изменять состав конечных продуктов.

В процессе пиролиза образуются:

- газообразные продукты, содержащие водород, метан и оксиды углерода;

- жидкие продукты с высоким содержанием органики;

- твердые продукты, состоящие из углеродистой фракции с высокой удельной теплотой сгорания и низким содержанием серы в неорганической фракции, в состав которой входят железо, алюминий, цинк, медь и стекло [55, 80, 96].

Для оценки влияния параметров, таких как влажность исходного сырья[6, 24, 41, 47, 50], состав ТКО, на выход и состав продуктов пиролиза используют экспериментальное исследование методами термического анализа[36, 47, 54], к которым относятся: термогравиметрический анализ (ТГ - анализ), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), масс-спектрометрия газовых смесей (МС - анализ)[91].

В литературе [6, 25,47, 50, 67, 79, 81,92, 94] содержатся данные по результатам термического анализа лишь некоторых отдельно взятых компонентов смеси ТКО, таких как древесина, бумага, полиэтилен, биомасса.

Из всех образующихся в процессе пиролиза продуктов, самое широкое применение нашли газообразные продукты. Часть пиролизных газов используют в теплотехнологическом процессе для нагрева отходов, а также для подогрева дутья или теплоносителя. Наиболее выгодным с экономической точки зрения является использование пиролизного газа в качестве топлива для теплоэнергетических установок вместо природного газа или мазута[32].

Пиролизный газ таких процессов, как «Torrax», «Austin», «Landgart»[40,90,97,98,103], содержит значительное количество азота. Он не пригоден для хранения и транспортировки, поэтому его потребляют по месту получения. Теплотворная способность пиролизного газа существенно ниже теплотворной способности природного газа[89]. Повысить теплотворную способность пиролизного газа можно, например, за счет его метилирования [40,51].

Актуальной задачей с точки зрения повышения энергетической эффективности процесса переработки ТКО является увеличение выхода пиролизных газов. Так в [97,98], повышение выхода газа достигается за счет газификации твердого углеродистого остатка, который после выделения из него неорганической фракции подается в реактор газификации совместно с паром и кислородом. Полученный синтез-газ, содержащий водород, углекислый газ, окись углерода и водяной пар, подают в пиролизный реактор в противотоке с несортированными отходами.

Повысить выход газа в процессе пиролиза ТКО можно за счет проведения процесса в присутствии катализатора[34, 40,54]. Для этого отходы пропитывают раствором, содержащим 0,2 ÷ 5% никеля или кобальта, и нагревают до 400 ÷ 900°С. Продуктом пиролиза является газ с высоким содержанием водорода и монооксида углерода.

Твердые продукты пиролиза бытовых отходов содержат органические и неорганические компоненты. В процессах высокотемпературного пиролиза («Pirox», «Torrax»), включающих окисление твердого остатка и его расплавление, после охлаждения получают стекловидный инертный гранулят [40,90]. Его используют при производстве цемента, бетона или как изоляционный материал.

Состав твердого пиролизного остатка по способу «Landgard» приведен в табл. 1.1.

Состав твердого остатка пиролиза	% по сухому веществу
Уголь	12.5
Неорганические вещества	82.2
В том числе:	
Черные металлы	21.9
Стекло, зола	60.1
Летучие соединения	5.5

Таблица 1.1. Состав твердого пиролизного остатка

Кроме черных металлов (21,9%), в неорганической фракции содержатся также алюминий, медь, цинк. Углерод, входящий в состав твердого углеродистого остатка, может использоваться непосредственно в самом процессе. Удельная теплота сгорания углеродного компонента составляет 19 МДж/кг[98].

Возможность применения углеродного остатка в качестве твердого топлива ограничена из-за высокой зольности.

1.1.3. Газификация твердых коммунальных отходов

Газификация ТКО представляет собой высокотемпературное превращение органических компонентов в горючий газ, состоящий из *CO* и H_2 , в присутствии окислителя (газифицирующего агента). Для процесса газификации ТКО с использованием в качестве газифицирующего агента паро-воздушной смеси требуется температура не менее 1200°C (для сравнения – некаталитическая газификация угля активно протекает при температуре выше 900 °C) [3,40,89,90,98,99].

Газификацию можно рассматривать как неполное окисление углерода. Чаще всего окислителями служат кислород и водяной пар. Однако при окислении углерода чистым кислородом в реакторе создается слишком высокая температура, поэтому в качестве газифицирующего агента (дутья) обычно используют воздух, парокислородную или паровоздушную смесь. Теплота сгорания продукта - газа выше, если его получают парокислородной газификацией[67,98]. При воздушной или паровоздушной газификации образовавшийся газ содержит значительное количество азота и имеет более низкую теплоту сгорания.

Основными компонентами продукта-газа являются: CH_4 , CO и H_2 . Кроме этого, в его состав могут входить высшие углеводороды, и поскольку некоторые компоненты ТКО содержат атомы серы и азота, то образуются H_2S и NO_2 [40,89].

Скорость протекания реакций неполного окисления углерода зависит от температуры, которую устанавливают обычно исходя из технологических соображений. Необходимую температуру процесса можно обеспечить путем измене-

ния состава дутья (в частности, соотношение водяного пара и кислорода) и его начальной температуры [89,90].

Продукт - газ является качественным топливом для теплоэнергетических установок, так как при его сжигании выделяется незначительное количество соединений, загрязняющих окружающую среду.

1.2. Установки для термической переработки твердых коммунальных отходов методом пиролиза

Установки для термической переработки ТКО[40,70,109,110] методом пиролиза различают по способу подвода теплоты в систему. Теплота в реактор может подаваться путем сжигания дополнительного газообразного или жидкого топлива, подачи ограниченного количества кислорода или предварительно подогретого воздуха, а также с помощью циркулирующих горячих твердых частиц[98].

Наибольшее распространение получили установки:

- с внешним подводом теплоты;
- с внутренним подводом теплоты;
- с инертным теплоносителем;
- окислительного пиролиза.

Схема пиролизной установки с внешним подводом теплоты является наиболее простой и распространённой. Она была разработана в Дании фирмой «Pollution Control» [40,98]. Этот способ переработки получил название «Destrugas». Поступающие на переработку бытовые и промышленные отходы разгружаются в бункеры, расположенные в закрытом помещении. В целях предотвращения распространения запахов воздух из этого помещения отсасывают и подают на сжигание. Из бункеров отходы направляются на дробилку, где измельчаются до эквивалентного размера куска 10 см. Затем они слегка прессуются и из промежуточного бункера скиповым подъемником загружаются в обогреваемую снаружи вертикальную реторту. Отходы движутся в реторте сверху вниз под действием силы тяжести, а скорость их движения регулируется скоростью удаления образующихся шлаков.

Максимальная температура в нижней части реторты достигает 1000°С. Поскольку летучие продукты, образующиеся в процессе термического разложения отходов, движутся в реторте в прямотоке с твердым материалом, то, попадая внизу аппарата в зону высоких температур, они подвергаются вторичному пиролизу. Полученные в процессе пиролиза газообразные продукты охлаждаются в скруббере и промываются от пыли, летучих солей и избытка аммиака. Таким образом, основным продуктом процесса является газ. При переработке 1 т отходов выход такого газа составляет 412 м³, причем на обогрев реторты расходуется 200 м³. При пиролизе отходов с высокой влажностью предусматривается возможность подачи на обогрев реторты дополнительного топлива. Вода из скруббера, загрязнённая аммиаком, фенолом и другими органическими соединениями, поступает на охлаждение шлака и вместе с ним удаляется из установки.

Шлак, выход которого составляет 200 кг из 1 т отходов, после охлаждения водой ленточным транспортёром подаётся в бункер. С помощью магнитного сепаратора из него извлекают черные металлы. Шлак состоит из неорганических компонентов исходных отходов и 25% углерода[40].

Данная схема наиболее проста, дешева и удобна в эксплуатации. Основным недостатком является то, что внешний обогрев реакционного узла, учитывая плохую теплопроводность отходов, снижает теплотехнические характеристики реактора, что влечет за собой повышенный расход топлива для поддержания процесса. Установки с внешним подводом тепла используются в основном для утилизации твердых отходов, а также для получения дешевого химического сырья [79,98].

Примером установки с внутренним подводом теплоты служит установка фирмы «Monsanto Enviro-Chemical» (США)[40,90]. Данный способ термической переработки ТКО, известный как «Landgard», является примером низкотемпературного пиролиза (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Технологическая схема «Landgard»: 1 – приемный бункер; 2 – дробилка грубого дробления; 3 – бункер для дробленых отходов: 4 – вращающаяся печь (реактор); 5 – шлаковая ванна; 6 – магнитный сепаратор; 7 – камера сжигания газа; 8 – парогенератор; 9 – скрубер; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба; 12 – очистка воды

Доставленные на установку производительностью 35 т/сут отходы по двум виброжелобам направляются в дробилку, а затем в бункер, откуда их непрерывно подают во вращающуюся печь. Печь, футерованная изнутри огнеупором, установлена с небольшим наклоном, благодаря чему измельченные отходы перемещаются противотоком по отношению к обогревающим газам.

Твердый углеродистый остаток попадает в находящуюся в конце печи ванну для гашения, питаемую водой. Затем шлак направляется на флотационную установку, после которой легкие компоненты в виде угольного шлама вытекают, сгущаются и фильтруются перед вывозом, а тяжелые поступают на магнитный сепаратор.

Смесь пиролизных и дымовых газов с температурой 650°С отсасывается с помощью вентилятора из печи и поступает в камеру сжигания, куда подаётся подогретый воздух. Теплота полученных дымовых газов используется в котлахутилизаторах для производства пара. Отработанные дымовые газы охлаждаются и очищаются в скруббере, орошаемом водой, а затем перед выбросом в атмосферу осушаются. Недостатком данного метода является то, что в процессе пиролиза имеет место балластировка газообразных продуктов дымовыми газами, что снижает их конечную теплотворную способность [40,99].

В Германии разработан способ термического разложения ТКО на основе высокотемпературного пиролиза [90]. В электродуговой печи при температуре 1500 ÷ 1700°С (рис.1.2) в результате интенсивного разложения горючих составляющих образуются коксовый остаток и газ, содержащий в основном водород и монооксид углерода. Минеральная часть, состоящая из силикатов и металлов, плавится и разделяется на металл и шлак. Оксид железа, содержащийся в шлаке, вступает в реакцию с коксовым остатком, восстанавливается до металла и образует оксид углерода.

Восстановившийся металл непрерывно отделяется от шлака. Полученный расплав состоит в основном из железа, других металлов и кремния. Состав этой массы и количество электроэнергии, необходимое для ее получения, зависят от количества и состава исходных материалов.

В небольших печах отходы следует предварительно измельчать. Шлаковый покров должен постоянно перемешиваться с поступающими холодными отходами, что достигается вращением мусороприемника печи.



Рисунок – 1.2 Электродуговая печь для переплавки мусора: 1 – подача мусора; 2 – электроды; 3 – вывод газов; 4 – выход сплава через электромагнитный желоб; 5 – ванна для сплава: 6 – шлак

Способ разложения отходов в электродуговой печи имеет ряд преимуществ: процесс является безотходным; при переплавке отходов полностью разрушаются все органические соединения, уничтожается болезнетворная микрофлора; продукты, полученные при сжигании газа, содержат меньшее количество вредных примесей, чем газы мусоросжигательных установок [98].

На практике находят применение пиролизные установки с инертным теплоносителем. Так, пиролизная система для переработки различных твердых отходов в псевдоожиженном слое песка разработана в США [97].

Реактор данной установки состоит из трех секций, расположенных одна над другой. Нижняя представляет собой камеру сжигания отопительного газа, которая служит для приготовления газообразного теплоносителя. Между камерой сжигания и средней секцией, где создается псевдоожиженный слой, расположена газораспределительная пластина с отверстиями диаметром 0,25 см. В средней секции происходит пиролиз отходов в псевдоожиженном слое песка. Измельченные отходы подаются шнеком со специальным питателем в среднюю секцию реактора. Образовавшиеся продукты пиролиза поступают в верхнюю часть реактора – выделительную секцию и на выходе из неё охлаждаются распыленной водой. Далее газовый поток очищается в циклоне от твердых частиц и подвергается влажной промывке в полочном скруббере. Окончательное охлаждение и очистка газообразных продуктов осуществляются в специальном скруббере.

Недостаточно широкое распространение данной схемы пиролиза объясняется, прежде всего, сложностью конструкции, в частности проблемой разделения твердых продуктов пиролиза и элементов псевдоожиженного слоя. Однако схема имеет ряд преимуществ, главными из которых являются хорошие условия организации тепло- и массообменных процессов [98].

Типичным примером установки, в которой осуществляется процесс окислительного пиролиза с подачей воздуха, является реактор в методе «Torrax», (США)[40]. Метод характеризуется процессами распада и частичного окисления горючих компонентов, а также плавлением инертных материалов при температу-

рах до 1650°С. С помощью этого метода можно обрабатывать, кроме бытовых, отходы мелких промышленных производств, близких по составу к бытовым отходам.

Твердые отходы без предварительной обработки (за исключением дробления крупных предметов до кусков размером не более 1м) загружаются сверху в газификатор, представляющий собой вертикальную шахтную печь, в которой отходы и горючие газы движутся противотоком (рис.1.3). Верхняя часть опускающихся отходов служит естественным затвором, препятствующим подсосу воздуха через открытый верх реактора.



Рисунок – 1.3 Реактор высокотемпературного пиролиза «Torrax»: 1– загрузка отходов; 2 – выход горючего газа; 3 – удаление и охлаждение шлака; 4 – зона сжигания и плавления; 5 – подача горячего воздуха в зону горения; 6 – зона пиролиза; 7 – зона сушки; 8 – загруженные отходы Под действием силы тяжести отходы последовательно проходят зоны сушки, пиролиза, первичного горения и плавления. Термическое разложение органической части сырья в зоне пиролиза осуществляется практически без доступа свободного кислорода за счет тепла восходящего потока горячих газов из зоны первичного горения и плавления. Сгорание твердых углеродосодержащих продуктов пиролиза происходит в нижней части реактора, куда подается нагретый до 1100°C воздух. Температура в зоне достигает 1650° С. Она обеспечивает плавление всех неорганических компонентов бытовых отходов.

Подогрев воздуха осуществляется в теплообменнике за счет тепла дымовых газов, образующихся в камере сжигания газообразных продуктов пиролиза. На эти цели расходуется 10 ÷ 15 % энергии, полученной в результате пиролиза отходов. Образующийся расплавленный шлак непрерывно выводится через герметичную ловушку в водоохлаждаемую ванну, где образуется черный гранулированный остаток. В результате такой переработки объём коммунальных отходов уменьшается на 95 %.

Газообразные продукты пиролиза, имеющие температуру 430 ÷ 480°С, с помощью вентилятора отсасываются из реактора и направляются в камеру сжигания. Тепло дымовых газов, образующихся в камере сжигания при температуре 1100 ÷ 1300°С, используется для выработки пара в котле - утилизаторе.

Реактор высотой 15 м и диаметром 3 м при круглосуточной работе имеет производительность по перерабатываемому сырью 300 т в сутки [98].

Другой разновидностью данного процесса является метод «Purox» разработанный фирмой «Union Carbide» (рис.1.4) [40,90,103].



Рисунок – 1.4 Схема пиролизной установки «Ригох»: 1 – загрузочная воронка;2 – питатель; 3 – реактор; 4 – подача кислорода; 5 – расплавленный остаток: 6 – выход пиролизного газа; 7 – водяная ванна; 8 – выход избыточного газа: 9 – конденсатор; 10 – газоочистка; 11 – вода от очистки газов

Основным элементом системы является вертикальная шахтная печь. ТКО подаются в верхнюю часть печи через питатели. В основание реактора подается кислород (0,2 т на 1 т отходов), где он реагирует с выпадающим продуктом процесса пиролиза. Создается зона достаточно высокой температуры, в которой происходит плавление или шлакование несгораемых материалов. Расплавленные негорючие включения (в основном металл и стекло) непрерывно стекают в водную ванну, образуя тяжелый гранулированный материал.

Горючие газы, образующиеся в результате реакции кислорода с углеродом, поднимаются вверх, проходя через опускающиеся твердые отходы, и обеспечивают тепло, необходимое для пиролиза. Дополнительного топлива для поддержания процесса пиролиза не требуется. В верхней части печи этот газ охлаждается в ходе сушки поступающих твердых отходов. Выходящий газ (температура при выходе из реактора около 120°C) содержит значительное количество водяных паров,

некоторое количество "масляного тумана" и следы вредных примесей. Эти примеси удаляются путем очистки газа в электрофильтре.

Полученный в результате пиролиза газ, по данным фирмы, представляет собой чистое горючее топливо со средней теплотой сгорания 9 МДж/м³. Этот газ имеет большое преимущество перед природным, так как не содержит соединений серы и оксидов азота, а температура горения при прочих равных условиях примерно одинакова. При сжигании газа потребность в воздухе составляет 80 % объема требуемого для сжигания природного газа. Таким образом, получаемый в процессе «Purox» газ можно транспортировать потребителю по трубопроводам умеренной длинны и использовать не только как топливо, но и как химическое сырье [90].

Основным оборудованием всех пиролизных систем является реактор. Конструкция реактора во многом определяет необходимость предварительной подготовки ТКО. Конструктивно все реакторы разделяют на 4 типа [98]:

- реакторы с перемещением материала под действием силы тяжести;

- реакторы с механическим перемещением и перемешиванием материала;

- реакторы с переносом материала циркулирующим турбулентным газовым потоком;

- реакторы с псевдоожиженным слоем.

Наиболее распространенным типом реакторов с перемещением материала под действием силы тяжести являются шахтные печи[106]. Эти печи отличаются простотой и надежностью конструкции.

По способу подвода энергии шахтные печи относятся к системам с частичным окислением продуктов пиролиза. Устройство для подачи окисляющего агента располагается в нижней части печи.

Существующие системы пиролиза в шахтных печах различаются способами отвода газа и его очистки, а также составом окислителя [86].

Существенным недостатком всех пиролизных процессов, осуществляемых в шахтных печах, является неравномерное прохождение газов через отходы и

плохая газопроницаемость слоя. Газовый поток пронизывает слой отходов по немногочисленным каналам, которые по мере протекания процесса расширяются и увеличиваются настолько, что через них начинает проходить основная масса газов. Это снижает эффективность процесса пиролиза в шахтных печах, так как сокращаются время и поверхность контакта газов с отходами. Одним из вариантов устранения этого недостатка является гранулирование отходов перед их загрузкой в реактор [98]. В результате получают пористый слой, обеспечивающий равномерное прохождение газов по всему сечению печи, что способствует интенсификации теплообмена в процессах пиролиза и сушки. Процесс гранулирования отходов снижает расход кислорода, температуру пиролизных газов на выходе из печи и повышает их удельную теплоту сгорания.

Важную роль с точки зрения энергетической эффективности работы реактора играет качественное высушивание исходного сырья. Наличие избыточной влаги снижает калорийность пиролизного газа, использующегося в качестве топлива для теплоэнергетических установок.

Обработка материала в реакторах с принудительным перемещением и перемешиванием осуществляется более равномерно, чем в шахтных печах.

Движение газов и материала в таких реакторах может осуществляться как прямотоком, так и противотоком.

Среди реакторов с механическим перемещением материала наиболее широкое распространение получили трубчатые печи, в которых перемещение и перемешивание материала осуществляется за счет вращения печи, обычно установленной под небольшим углом к горизонтали.

В процессе, разработанном ЦНИИТЭнефтехим [36,40], используется прямой нагрев отходов за счет их контакта с горячими, не содержащими кислорода газами, полученными при сжигании газообразных продуктов пиролиза. Часть газов сжигания используют для предварительной сушки отходов. Конструкция сушильной камеры аналогична конструкции пиролизного реактора. Перед переработкой отходы измельчают до размера частиц не более 200 мм. Во вращающейся сушильной камере измельченные отходы и газовый теплоноситель перемещаются в одном направлении, в пиролизном реакторе - противотоком. Процесс пиролиза протекает при температуре 550 ÷ 600 °C. Пиролизные газы после очистки и охлаждения сжигают в топках и направляют в сушилку и в реактор. Твердый остаток выгружают на водоохлаждаемый конвейер, а затем сепарируют на металлы и углеродный продукт. Установка производительностью около 100 т в сутки реализована на Санкт-Петербургском биотермическом мусороперерабатывающем заводе и предназначена для переработки некомпостируемой части бытовых отходов, что фактически обеспечивает безотходную технологию.

Пиролиз по способу «Ругосаl» (Германия) [90] осуществляется во вращающейся печи с внешним обогревом. Установка включает в себя пиролизную печь, циклон для очистки пиролизного газа от пыли, печь для крекинга газов и устройства для их промывки. Пиролизная печь по длине разделена на шесть зон, которые обогреваются раздельно. Это позволяет поддерживать оптимальную температуру на разных стадиях процесса. Время пребывания материала в печи регулируется изменением числа оборотов печи и угла ее наклона. Вследствие низкой температуры пиролиза (400°С) и интенсивного перемешивания во вращающейся, печи получаемый углеродный остаток имеет гранулированную структуру. Стекло и металлы легко отделяются от углеродистой части. Способ позволяет снизить объем отходов на 80 – 90%. Преимуществом такой конструкции является отсутствие отрицательного влияния колебаний состава ТКО на работу реактора.

Другим распространенным вариантом конструкции реакторов с принудительным перемещением материала являются печи, в которых перемещение материала организовано при помощи конвейера («Deco Industries Inc.», CША) [40,98]. В них используется косвенный обогрев реактора, который представляет собой трубу, расположенную в нагревательной камере. В трубе установлен шнек с полым валом. Отходы поступают в загрузочную камеру периодически. Перед подачей отходов в реакторную трубу камеру закрывают и заполняют азотом, чтобы исключить попадание воздуха в систему. Аналогичным образом производится

выгрузка твердого остатка. Температура пиролиза составляет 426 – 816°С. Реактор работает под вакуумом в пределах 100 ÷ 150 мм ртутного столба. В качестве пускового топлива используют природный газ. Для улучшения теплообмена осуществляется циркуляция горячих газов через полый вал шнека.

Процесс пиролиза, в котором перемещение материала в реакторе осуществляется циркулирующим турбулентным газовым потоком, получивший название «Occidental Flash»[40,98], предназначен для переработки предварительно измельченной органической фракции ТКО, содержащей не более 4% неорганических веществ, в жидкое топливо.

Пиролиз осуществляется в восходящем циркулирующем турбулентном потоке газа при температуре 500 °C. Нагрев отходов происходит за счет контакта с твердым теплоносителем, который подают в реактор одновременно с отходами. Выходящая из реактора парогазовая смесь состоит из транспортного газа, газообразных продуктов пиролиза, твердого остатка пиролиза и теплоносителя. В циклоне парогазовая смесь отделяется от твердой фракции и быстро охлаждается, за счет чего получается газ и жидкий продукт – пиротопливо.

Способ получил название «мгновенного пиролиза», так как время проведения процесса не превышает 10 секунд. Благодаря малому времени пребывания сырья в реакторе и быстрому охлаждению газов предотвращается крекинг конденсирующихся продуктов, обеспечивая тем самым высокий выход жидкого топлива.

Для перемещения материала в реакторе используются пиролизные газы. В качестве теплоносителя первоначально применялся пиролизный уголь, часть которого сжигалась при нагревании самого угля и транспортного газа. Затем вместо угля было предложено использовать неорганические твердые остатки пиролиза. Этот продукт обладает малым трением между частицами, что упрощает его транспортирование в реактор [98].

В отличие от других способов, процессы пиролиза в реакторах с псевдоожиженным слоем характеризуются высоким коэффициентом теплопередачи.

Обычно в качестве теплоносителя в этих процессах используют песок, а агентом, создающим из него псевдоожиженный слой, является газ, не содержащий свободного кислорода или воздуха, если предполагается частичное сжигание отходов. Для поддержания необходимой температуры процесса могут быть использованы продукты пиролиза, за счет сжигания которых нагревают теплоноситель и ожижающий агент.

В настоящее время используются два типа пиролизных систем кипящего слоя – с одним реактором и с двумя реакторами, соединенными между собой.

В первом случае, нагревание слоя теплоносителя осуществляется предварительно нагретым ожижающим агентом [97]. Во втором случае в одном из реакторов осуществляется нагревание теплоносителя за счет сжигания топлива, например пиролизных газов, а в другом – процесс пиролиза[102].

Несмотря на большое разнообразие вариантов технологического оформления процесса пиролиза, общим для всех установок пиролиза отходов является значительное (до 90 %) уменьшение объёма перерабатываемого сырья, возможность утилизации потенциальных энергетических и материальных ресурсов и практически полное отсутствие загрязнения воздушной и водной сред. Поэтому пиролизные установки могут быть размещены в городской черте, что приводит к значительному сокращению расходов на транспортировку отходов к месту переработки. Важное преимущество таких установок – их способность перерабатывать отходы, содержащие пластмассы и резину, которые плохо поддаются обработке другими методами.

1.3. Теплофизические свойства твердых коммунальных отходов

В идеальном случае ТКО перерабатывают сухими, но в реальных условиях влага, содержащаяся в них, требует дополнительных значительных затрат энергии[84]. Из практического опыта и литературных данных [21,24,30,31,41,44,45,52] известно, что начальная относительная влажность сырья может доходить до 55 %. Основные компоненты ТКО, имеющие наибольшую процентную составляющую в морфологическом составе – это: пищевые отходы, бумага (картон) и текстиль, которые по форме связи влаги с материалом относятся к капиллярнопористым коллоидным телам[16,49]. Для выяснения физической картины тепломассопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах необходимо знать зависимость теплофизических коэффициентов от температуры и влагосодержания, которое является главным фактором, определяющим тепловые свойства влажных тел. Поэтому для осуществления практических расчетов необходимо знание зависимости теплофизических характеристик материала от влагосодержания и температуры. Основными величинами, характеризующими теплофизические свойства влажных материалов, являются: коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, связанные между собой соотношением $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$. Влажное капиллярно-пористое тело состоит из сухого "скелета" и массы поглощенной жидкости. Поэтому эти материалы, кроме указанных свойств, характеризуются также коэффициентом массопроводности.

Слой ТКО представляет собой многокомпонентное пористое тело, обладающее эффективными теплофизическими свойствами, для изучения которых используют расчетные и экспериментальные методы.

Из литературных источников известны теоретические зависимости для определения эффективной теплопроводности пористых тел, основанные на рассмотрении реальной структуры тела (пористость, размеры частиц и др.)[16,21,28,33,48,49,57,104].

Литературные данные для ТКО либо достаточно скупы, как для пористого тела неопределенной структуры, либо содержат информацию только об отдельно взятых компонентах [30,33,53,66,75,81].

Так, для овощей и фруктов как компонентов ТКО Фокиным В.М. и Ильиной С.А. [30] получены следующие зависимости эффективных теплофизических коэффициентов от влажности, W, при температуре 20°C:

$$c = 1300 + 2883W \quad ; \tag{1.1}$$

$$\lambda = 0,13 + 0,47W \quad ; \tag{1.2}$$

$$a = (0,13+0,47 \cdot W) \cdot (1+0,6 \cdot W) / (1,6 \cdot (1,3+2,88 \cdot W) \cdot 10^6) .$$
(1.3)

Зависимость эффективной теплоемкости ТКО от влажности В.Г. Систер предлагает аппроксимировать зависимостью [73,74]:

$$c = 21,9W + 2000 . \tag{1.4}$$

Гинзбург А.С. [21] приводит данные о теплофизических свойствах компонентов ТКО (бумаги, пищевых отходов, пленки полимерной) в диапазоне температур 0÷100°С.

В реальных условиях процесс термической переработки ТКО протекает в температурном интервале 20÷600°С, поэтому имеющиеся формулы требуют уточнения.

Для экспериментального определения теплофизических коэффициентов используют стационарные и нестационарные методы.

К стационарным методам относятся: метод неограниченного плоского слоя, метод неограниченного цилиндрического слоя, метод шарового слоя[12,28,30,49]. Для определения коэффициента теплопроводности необходимо измерить тепловой поток через образец и перепад температур в двух его точках. Нахождение коэффициента теплопроводности осуществляется для фиксированных значений температуры. Стационарные методы удобны, когда температурные интервалы исследования невелики. Недостатком стационарных методов являются значительные затраты времени на подготовку нужного теплового режима и на проведение опыта.

Нестационарные методы [2,9,13,62,72] подразделяют на методы, основанные на закономерностях начальной стадии развития теплового процесса (зондовые, методы неограниченного эталона), методы регулярного режима и квазистационарные методы.

Зондовые методы наряду с достоинствами (исследуемый материал получает минимальное нарушение структуры, теплофизические свойства определяются в комплексе) имеют ряд недостатков, например: поддержание постоянной температуры во время опыта (изотермический зонд); трудность определения времени наступления максимума температуры; перегрев исследуемой среды вблизи зонда (зонд с мгновенным импульсом и зонд с конечным импульсом).

Методы регулярного режима (калориметры, лямбда-калориметры) требуют выполнения условия постоянства температуры среды и коэффициента теплообмена между образцом и средой. Методы можно использовать только при фиксированных температурах или в небольших интервалах температур.

Квазистационарные методы, а также методы монотонного разогрева являются переходными между методами начальной стадии развития теплового процесса и стационарными методами. Развитие квазистационарных методов начато академиком А.В. Лыковым [49], предложившим решение задачи нагрева тела в среде с линейным изменением температуры.

Квазистационарные методы и методы монотонного разогрева позволяют в процессе проведения одного опыта на одном образце в любом интервале температур изучить процесс изменения теплофизических свойств исследуемого материала. Однако эти методы нельзя использовать в зонах резкого изменения теплофизических свойств веществ (зоны фазовых или химических превращений), и они не рассматривают начальный период нагрева материала (где еще не наступил квазистационарный режим).

В большинстве своем существующие экспериментальные методы определения теплофизических характеристик довольно сложны[87]. Ранее их разработка основывалась преимущественно на закономерностях стационарного температурного поля без учета того, что теплообмен не происходит в отрыве от массообмена. Методы определения теплофизических свойств должны давать одновременно значения всех основных термических коэффициентов. Этим требованиям лучше всего отвечают методы, основанные на нестационарных тепловых режимах, позволяющих определять коэффициенты из одного опыта [43,61,64].

Для описания изотермических процессов переноса влаги А.В. Лыковым предложено уравнение[49]:

$$i = -k \cdot \rho_0 \cdot \frac{dC}{dx},\tag{1.6}$$

где *i* – поток массы, кг/(м²·с); $\frac{dC}{dx}$ – градиент концентраций, м⁻¹.

Определение коэффициента массопроводности из предложенного уравнения требует замера локальных концентраций, что связано с большим количеством опытов. Погрешность в нахождении *k* зависит от того, с какой точностью измерены величины *k*,*c*, ρ_0 ,*x* и погрешности дифференцирования функции *C*=*C*(*x*).

Метод двух точек, предложенный в [85], требует замера локальных концентраций в двух точках тела. Коэффициент массопроводности рассчитывают по уравнению:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\overline{U}}{d\tau} \cdot \frac{x_2^2 - x_1^2}{U(x_1, \tau) - U(x_2, \tau)} , \qquad (1.7)$$

а коэффициент температуропроводности по формуле:

$$a = \frac{t_c \cdot \varepsilon \cdot r(t) \cdot (x_2^2 - x_1^2) \cdot \frac{dU}{d\tau}}{2 \cdot c_d \cdot (t_c - t_0) \cdot [t(x_2, \tau) - t(x_1, \tau)]} , \qquad (1.8)$$

где $\varepsilon = 2 \cdot \frac{[t(x,\tau) - t(0,\tau)] \cdot \lambda_d \cdot R}{r(t) \cdot x^2 \cdot j_m(\tau)}$ - коэффициент фазового превращения.

В работе [63] описан комплексный метод определения массотеплопереносных характеристик. Интегрированием дифференциальных уравнений массо-теплопроводности были получены применительно для пластины следующие зависимости:

$$k = \frac{R^2}{3 \cdot (c_p - \overline{c})} \cdot \frac{d\overline{c}}{d\tau} , \qquad (1.9)$$

$$a = \frac{R^2}{3 \cdot (t_c - \bar{t})} \cdot \left(\frac{d\bar{t}}{d\tau} - \frac{r^*}{c} \cdot \frac{d\bar{c}}{d\tau}\right).$$
(1.10)

В работе [12] изложен метод определения коэффициента температуропроводности в зависимости от температуры и получено выражение для его расчета, применительно к цилиндрическому образцу:
$$a = \frac{R^2}{4 \cdot \Delta \tau} \cdot (1 + \varepsilon + \delta) \quad , \tag{1.11}$$

где: $\varepsilon = -\frac{1}{4 \cdot \Delta t} \cdot \frac{d\Delta t}{d\tau} \cdot \Delta \tau$ – поправка на переменность скорости нагрева;

$$\delta = \frac{1}{4 \cdot a} \cdot \frac{da}{dt} \cdot \Delta t$$
 – поправка, учитывающая зависимость физических параметров

от температуры.

1.4. Моделирование тепло- и массообмена в процессе переработки твердых коммунальных отходов

Пиролиз как технология сравнительно молодой и мало изученный способ обращения с органическими отходами, поэтому задача его исследования является актуальной. Для этого используют методы физического и математического моделирования, которые взаимно дополняют друг друга. Физическое моделирование требует проведения большого количества лабораторных экспериментов с целью выявления основных технологических характеристик процесса (выход газообразной, твердой и жидкой фракций, температурный режим и др.)[36,44,55,92,97].

В статье [88] представлены результаты экспериментальных исследований окислительного пиролиза растительных тканей методом дифференциально-сканирующей колориметрии. Сделана попытка выработки общего подхода к анализу широкого круга объектов при их термической переработке.

В работе [92] представлены результаты экспериментальных исследований кинетики термического разложения полиэтилена и полипропилена, определены энергии активации, выход и состав газообразных продуктов.

Сократить трудоемкость лабораторных исследований позволяет численный эксперимент с использованием методов математического моделирования[69,71,86]. Основными тепло- и массообменными процессами, протекающими в термическом реакторе, являются сушка и пиролиз. В основе моделирования этих процессов в большинстве случаев лежит допущение о возможности осреднения по толщине слоя всех искомых функций и характеристик с последующим использованием систем дифференциальных нелинейных уравнений [71]. Существуют также модели, позволяющие рассчитать температурные поля слоя сырья в процессе пиролиза, которые учитывают его структурную неоднородность [96,97].

В работе [44] представлены результаты экспериментальных и расчетнотеоретических исследований кинетики термического разложения биомассы в плотном слое при окислительном пиролизе, предложена математическая модель процесса пиролиза грецких орехов, как компонента ТКО. Показано, что способ окислительного пиролиза на сегодняшний день является одним из энергоэффективных вариантов утилизации биомассы и отходов, который достаточно легко реализуется на практике.

Авторами [69] предложена математическая модель процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды, позволяющая определять количество сухого остатка, выделившихся летучих соединений и продолжительность всего процесса получения угля с учётом времени охлаждения готового продукта в зависимости от давления в аппарате.

Задачи, связанные с фазовыми превращениями, изменением химического состава среды и выделением теплоты могут быть отнесены к области задачи Стефана. В настоящее время известно большое количество аналитических и численных решений задач этого класса приведенных в книге [98].

Подавляющее большинство моделей тепло- и массообмена в процессе переработки смеси ТКО и отдельных компонентов (древесины, биомассы, ткани) относится к термическому разложению, а процессу сушки не уделяется должного внимания.

1.5. Выводы по главе и постановка задач исследования

Проведенный анализ литературных источников позволил сделать следующие выводы:

1. Переход от полигонного захоронения к промышленной переработке является основной тенденцией решения проблемы ТКО в мировой практике, при этом ведущая роль отводится термическим методам, в частности пиролизу и его разновидности – окислительному пиролизу.

2. Эффективность термической переработки определяется степенью подготовки ТКО (начальной влажностью сырья, фракционным составом и др.) и режимными параметрами процесса (температурой материала и теплоносителя, временем пребывания ТКО в реакторе, наличием кислорода в атмосфере).

3. Для создания способов повышения эффективности энергетического использования отходов в теплотехнологии необходимо проведение термического анализа смеси ТКО и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза.

4. Важную роль с точки зрения энергетической эффективности работы реактора играет качественное высушивание исходного сырья. Наличие избыточной влаги снижает калорийность пиролизного газа, использующегося в качестве топлива для теплоэнергетических установок. В теплотехнологии уничтожения ТКО недостаточное внимание уделяется исследованию сушки отходов как наиболее энергозатратному процессу.

5. Для выполнения теплотехнических расчетов печей по переработке отходов необходимо знание эффективных теплофизических свойств ТКО.

6. Разрабатываемые конструкции печей для ликвидации отходов должны быть простыми, надежными и относительно дешевыми в эксплуатации. Исходя из вышесказанного, основными задачами данной работы являются:

1. Проведение термического анализа смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с целью повышения эффективности ее энергетического использования в теплотехнологии.

2. Исследование эффективных теплофизических свойств смеси ТКО среднего морфологического состава в зависимости от влажности сырья и порозности слоя.

3. Создание математической модели тепло- и массообмена в плотном слое в процессе его сушки, позволяющей учесть многокомпонентный состав ТКО.

4. Вывод критериальных уравнений, позволяющих определить коэффициенты тепло- и массоотдачи, влияющие на процесс сушки слоя ТКО среднего морфологического состава.

5. Разработка конструкции установки для переработки ТКО и выбор рациональных режимов ее работы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

2.1. Материалы и методы исследования

В установках шахтного типа пиролиз ТКО протекает с небольшими подсосами воздуха (окислительный пиролиз). Для повышения эффективности переработки ТКО методом окислительного пиролиза актуальной задачей является экспериментальное исследование данного процесса в целях оценки влияния ряда параметров (влажность исходного сырья, состав ТКО, увеличение кислорода в атмосфере и др.) на выход и состав пиролизных газов [42,80].

Экспериментальное исследование процесса окислительного пиролиза ТКО осуществлялось методами термического анализа, к которым относятся:

- термогравиметрический анализ (ТГ - анализ) [91], в ходе которого непрерывно регистрировалось изменение массы исследуемого образца при изменении его температуры;

- дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), в ходе которой непрерывно регистрировались термические эффекты, которыми сопровождались фазовые и химические превращения образца при его нагреве;

- масс-спектрометрия газовых смесей (МС - анализ).

Исследования окислительного пиролиза были проведены для образцов смеси ТКО среднего морфологического состава (бумага – 43%, пищевые отходы – 42%, текстильные отходы – 7,5% и полимерная пленка – 7,5%) [19,80] и отдельных компонентов смеси в атмосфере с содержанием кислорода 1, 5 и 10%[42]. Экспериментальные исследования выполнены при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH. Измерительный комплекс состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 C Aeolos и блока импульсного термического анализа PulseTA.

При синхронном ТГ - ДСК анализе термоанализатор позволяет одновременно измерять изменение теплового потока и массы образца в зависимости от его температуры или во времени. Синхронный анализ позволяет обрабатывать большое число измерений и упрощает интерпретацию результатов благодаря возможности отделить эндо- и экзотермические процессы, не сопровождающиеся изменением массы от процессов при которых происходит изменение массы.

В результате термического анализа получены так называемые термогравиметрические (ТГ) кривые – зависимости изменения массы навески от температуры или во времени. По значению производной от ТГ- кривой (дифференциальнотермогравиметрический анализ - ДТГ) можно установить температуру или интервал времени, при которых происходит максимальное уменьшение массы навески.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) было определено количество теплоты, которое выделяется или поглощается в результате химических реакций. Состав вещества, выделившегося в процессе пиролиза, определен с помощью масс - спектрометра QMC 403.

Экспериментальные исследования малоокислительного пиролиза проводили в следующей последовательности. Образец ТКО загружали в платиновый тигель, который устанавливали на микровесах в первой ячейке дифференциально сканирующего ДСК-сенсора. Во вторую ячейку помещали образец сравнения – тигель без образца (эталон). Наличие двойной измерительной ячейки позволяет скомпенсировать посторонние воздействия (процессы, связанные с тепловыделением или теплопоглощением) на результат измерения. Теплота подводилась от электронагревателя камеры, внутри которой были установлены образцы. Масса навески варьировалась в пределах $3 \div 15$ мг. Температуру исследуемого образца измеряли дифференциальными термопарами, размещенными на нижней поверхности тигля, которые были подключены к вторичному прибору. Нагрев проводили в среде инертного газа (аргона), обогащенного кислородом (1, 5 или 10% об.) от 20 до 900°С со скоростью 5°С/мин.

В ходе опыта STA 449 F3 Jupiter непрерывно регистрировал убыль массы образца ТКО в процессе его нагрева (ТГ-кривая), температуру образца и ДСК сигнал. Предельная чувствительность прибора по массе составляла 0,1 мкг, а по температуре – 0,001°C.

42

Качественный состав продуктов пиролиза был определен квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aëolos путем нахождения парциального давления отдельных компонентов газовой смеси. Разделение смеси по компонентам производили посредством ее ионизация током. Пучок ионов газа при помощи электрического поля разгоняется до высокой скорости и проходит через квадрупольный анализатор масс, состоящий из четырех металлических стержней, к которым приложено напряжение таким образом, чтобы в каждый момент времени через анализатор пролетали ионы только с одним соотношением массы к заряду – M/z.

Процесс сбора и обработки данных был автоматизирован при помощи программного обеспечения прибора NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

2.2. Результаты термогравиметрических экспериментов

Результаты термического анализа образца смеси ТКО и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10% представлены на рис.2.1 – 2.3 и в приложении 1 в виде ДСК, ТГ и ДТГ - кривых.

Результаты ТГ анализа (ТГ- кривая) показали, что кривую изменения массы образца в процессе нагрева можно разбить на несколько характерных интервалов. Первый интервал температуры 20°C ÷ 220°C, характеризуется незначительным изменением массы образца (от 0,5 до 8 %) из-за испарения физической и связанной влаги с поверхности пористой структуры материала. При дальнейшем повышении температуры до 320 – 330°C происходит достаточно быстрое уменьшение массы, обусловленное термическим разложением вещества и интенсивным выходом летучих соединений. При достижении температуры 330°C кривая изменения массы (на рис.2.1. линия 1) имеет ярко выраженный изгиб, который свидетельствует о снижении скорости выхода летучих соединений. При температуре 490°C наблюдается резкое падение скорости убыли массы вещества, что свидетельствует о замедлении термического разложения ТКО. При температуре 540°C выход летучих веществ заканчивается.



Рисунок – 2.1. Результаты термического анализа: 1- ТГ, 2 - ДСК и 3 - ДТГ для образцов ТКО при содержании кислорода в атмосфере 1%



Рисунок – 2.2. Результаты термического анализа: 1- ТГ, 2 - ДСК и 3 - ДТГ для образцов ТКО при содержании кислорода в атмосфере 5%

44





Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии (рис.2.1. – 2.3. линия 2) показали, что при температурах до 220°С в исследуемых образцах происходят эндотермические процессы, связанные с испарением влаги. При дальнейшем росте температуры в образцах протекают экзотермические процессы.

Кривая ДСК (рис.2.1. линия 2) имеет два ярко выраженных экзотермических пика при температурах 330°С и 470°С. Затем функция $q(\tau)$ начинает резко убывать. Это свидетельствует о том, что интенсивность экзотермических процессов уменьшается.

Результаты дифференциально-термогравиметрического анализа (рис. 2.1. – 2.3. линия 3) показали, что максимальная убыль массы образца имеет место при температурах 330°C и 470°C, что соответствует максимальному выходу газовой фазы в процессе пиролиза ТКО. Результаты термического анализа пиролиза смеси ТКО и отдельных ее компонентов в среде с содержанием кислорода 1%, 5% и 10% приведены в табл. 2.1. Анализ данных табл. 2.1 показывает, что с увеличени-

45

ем содержания кислорода в атмосфере температурный интервал процесса пиролиза практически остается неизменным. Наблюдается снижение температуры пика тепловыделения, возрастание максимальной скорости убыли массы образца и увеличение теплового эффекта пиролиза.

2.3. Результаты масс-спектрометрии и определение теплотворной способности пиролизного газа

Качественный состав пиролизного газа получен в результате обработки сигналов масс-спектрометра (зависимости ионного тока от температуры), распределенных по массовым числам (рис.2.4). На рис.2.4 приведены результаты измерений в процессе пиролиза ТКО в атмосфере с содержанием кислорода 1%. Аналогичные эксперименты были выполнены для пиролиза ТКО в атмосфере с содержанием кислорода 5 и 10%.

Веще-	Температуры начала и окон-			Температура пи-			Остаточная масса,		Максимальная			Тепло	вой э	ффект	
ство	чания процесса пиролиза, °С			ка выделения			%			скорость убыли			пиролиза, Дж/г		
				энергии, °С						массы, %/мин					
	Содержание О2			Содержание О ₂			Содержание О ₂			Содержание О2			Содержание О2		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
ТКО	225÷540	220÷560	215÷560	469	460	454	6,48	6,61	6,49	4,27	4,71	5,89	4250	5740	6685
Бумага	245÷492	220÷490	245÷488	477	461	444	19,8	14,3	9,69	6,06	6,3	6,61	4951	5710	6624
Карто-	225÷540	220÷550	215÷550	511	511	511	7,8	6,2	4,13	5,29	6	6,75	3672	5084	6696
фель															
Поли-	340÷540	300÷550	280÷550	395	385	375	10,01	9,98	9,96	6,67	6,2	5,23	3954	6320	8685
этилен															
Ткань	240÷500	240÷500	240÷490	345	340	336	14,34	14	13,43	10,4	9,5	8,68	4376	5051	5925

Таблица 2.1. Результаты термического анализа ТКО и его компонентов.



Рисунок – 2.4. Масс-спектр газа, образовавшегося при пиролизе ТКО в атмосфере с содержанием кислорода 1%. (цифры у кривых означают массовые числа): а) газы с большим значением сигнала масс - спектрометра б) газы с малым значением сигнала масс - спектрометра

Для идентификации компонентов пиролизного газа нами были использованы базы данных масс-спектрометров NIST[102], содержащие информацию о масс - спектрах веществ.

Анализ полученных данных (рис.2.4) показывает, что основными компонентами пиролизного газа являются: H_2 (2), CH_4 (16), H_2O (18), CO (28), CO_2 (44). Вклад других компонентов с массовыми числами 12, 13, 14, 15, 17 и 46 в массовую составляющую основных компонентов определен сопоставлением с результатами, представленными в базах данных масс-спектрометров NIST.

В табл. 2.2 приведены данные масс-спектра по основным компонентам газовой смеси в виде: эксперимент / базовое значение масс - спектров NIST.

М.Ч.*	2	12	13	14	15	16	17	18	28	44	46
H_{2}	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH_4	-	2.8/3	6.8/8	17/20	80/87	100	-	-	-	-	-
CO	-	4.5/5	-	-	-	0.8/1.1	-	-	100	-	-
H_2O	-	7.9/9	-	-	-	0.7/1	20/23	100	-	-	-
CO_2	-	-	-	-	-	8.8/9	-	-	10/13	100	0.2/0.5

Таблица 2.2 Сравнение экспериментальных данных с данными базы NIST

*м.ч. – массовое число

Количественный состав пиролизного газа определен по методу внутреннего стандарта [91], согласно которому интенсивности сигналов анализируемых соединений сравниваются с сигналом стандартного вещества (калибровочного газа), а для расчета массовых долей компонентов пиролизного газа была использована методика, предложенная А.Н. Козловым и А.В.Кейко [101].

В соответствии с этой методикой, количество вещества і – того компонента пиролизного газа определяется по формуле:

$$n_i = \frac{S_i}{k_i^0} \quad , \tag{2.1}$$

где S_i – площадь пика под кривой ионного тока i - того компонента (CO, CH₄, H₂, CO₂, H₂O) пиролизного газа (рис.3), A·c;

*k*⁰_{*i*} – калибровочный коэффициент і - того компонента пиролизного газа.

Площадь пика под кривой ионного тока і – того компонента пиролизного газа:

$$S_i = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I_i d\tau \quad , \tag{2.2}$$

где *I* – ионный ток, А; *т* – время, с.

Калибровочный коэффициент і - того компонента пиролизного газа рассчитывают по формуле [101]:

$$k_{i}^{0} = \frac{S_{i}^{0} \cdot 10^{8} \cdot R_{\mu} \cdot T^{o}}{P^{o} \cdot V_{i}^{o} \cdot x_{i}^{0}} \quad , \qquad (2.3)$$

где i – индекс компонента (CO, CH₄, H₂, CO₂, H₂O);

 S_i^0 – площадь пика под кривой ионного тока для калибровочного газа, A·c;

 R_{μ} – универсальная газовая постоянная, Дж/моль К;

 V_i^o – объём калибровочного газа, м³;

 P_i^o – давление газа на входе в прибор, Па;

 T^0 – температура газа на входе в прибор, °С;

 x_i^0 – концентрация компонента в калибровочном газе, %.

В табл.2.3 приведены данные о качественном и количественном составе газа, выделившегося в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10%.

	CH_4			СО			H_2O						H_2		
Вещество	Содержание О2			Содержание О2											
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
ТКО	22,5	18,68	11,93	41,25	36,4	32,91	18,9	23,12	26,66	17,21	21,74	28,47	0,14	0,06	0,03
Бумага	20,7	16,24	11	52,51	48,1	44,59	13,84	16,96	19,64	12,9	18,66	24,75	0,05	0,04	0,02
Картофель	22,94	20,45	14	32,52	26,1	22,55	24,34	27,91	32,34	22,11	25,5	31,08	0,09	0,04	0,03
Ткань	16,24	11,4	7,2	41,89	37,87	35,82	20,58	23,29	26,98	20,48	27,03	29,94	0,81	0,41	0,06
Полиэтилен	21,82	14,23	9,32	45,05	39,4	29,93	20,28	25,67	29,75	12,78	20,67	30,93	0,07	0,03	0,01

Таблица 2.3. Массовые доли основных компонентов пиролизного газа, в %

По результатам анализа установлено, что содержание прочих компонентов в пиролизном газе не превышает 0,5%.

Расчет теплотворной способности пиролизного газа выполнен по принципу аддитивности:

$$Q_{H}^{p} = \sum_{i=1}^{n} Q_{CH_{4}} \cdot g_{CH_{4}} + Q_{CO} \cdot g_{CO} + Q_{H_{2}} \cdot g_{H_{2}} , \qquad (2.4)$$

где $Q_{CH_4}, Q_{CO}, Q_{H_2}$ – низшая теплота сгорания метана, монооксида углерода и водорода соответственно, Дж/кг;

 $g_{CH_4}, g_{CO}, g_{H_2}$ – массовые доли метана, монооксида углерода и водорода соответственно.

Результаты расчетов теплотворной способности горючего газа, полученного в процессе окислительного пиролиза в среде с содержанием кислорода 1, 5 и 10%, сведены в табл. 2.4.

Вещество	Содержание кислорода	Содержание кислорода	Содержание кислорода			
	1%, Q, МДж/кг	5%, Q, МДж/кг	10% Q, МДж/кг			
ТКО	16,86	13,74	10,00			
Бумага	16,87	13,87	10,64			
Картофель	16,15	14,22	10,10			
Ткань	14,40	11,16	7,70			
Полиэтилен	15,77	12,56	8,30			

Таблица 2.4. Теплотворная способность пиролизного газа

Анализ данных (табл.2.3 и табл.2.4) показывает, что основными горючими компонентами пиролизного газа являются монооксид углерода и метан. Процентная составляющая водорода в газе невелика (менее 1%).

При окислительном пиролизе ТКО в атмосфере с содержанием кислорода 1% на долю горючей части пиролизного газа приходится 66% (по массе), оставшиеся 34% составляют балласт. С увеличением содержания кислорода в атмосфере до 10% происходит уменьшение горючей составляющей до 45%, а балластная часть при этом возрастает до 55%[42].

Теплотворная способность пиролизного газа уменьшается с 16,86 МДж/кг при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 1% до 10,00 МДж/кг при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 10%[42,114].

2.4. Выводы по второй главе

1. Выполнен термический анализ смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10%, в результате которого получены новые данные о выходе летучих соединений, о максимальной скорости убыли массы и о температуре пиков тепловыделения.

2. Окислительный пиролиз с содержанием кислорода в атмосфере 1% сопровождается меньшим тепловым эффектом, чем пиролиз с содержанием кислорода 5 и 10%, но при этом образуется наиболее калорийный пиролизный газ.

3. Экспериментально определены состав и объемы газов, получаемых при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10% смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов.

4. Результаты экспериментальных исследований окислительного пиролиза могут быть использованы для расчета конструктивных и режимных параметров термического реактора для утилизации ТКО.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

3.1. Определение эффективных теплофизических свойств твердых коммунальных отходов

Твердые коммунальные отходы, находящиеся в рабочем пространстве шахтной печи, представляют собой многокомпонентный пористый слой неопределенной структуры, порозность которого может изменяться в пределах от 0,4 до 0,65 [16].

Основными компонентами, имеющими наибольшую процентную составляющую в морфологическом составе, являются пищевые отходы, бумага (картон) и текстиль [80], которые по форме связи влаги с материалом относятся к капиллярно-пористым коллоидным телам. Для выяснения физической картины тепломассопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах необходимо знать зависимость теплофизических характеристик данных материалов от их физикохимических свойств и влагосодержания, которое является главным фактором, определяющим тепловые свойства влажных тел.

Процесс тепломассопереноса в общем случае характеризуется непостоянством физических параметров: температуры и влагосодержания. С целью выявления зависимостей коэффициентов переноса от температуры и влагосодержания материала поставлен и проведен ряд опытов. При этом нами использовался зональный метод, который обеспечивает точность определения значений теплофизических коэффициентов, приемлемую в технических расчетах.

На рис. 3.1 представлена схема экспериментальной установки. Методика эксперимента заключалась в следующем. Исследуемый материал (образец слоя ТКО) помещался в тонкостенные цилиндры (материал – медь) диаметром 16 мм и длиной 110 мм. Один цилиндр подвешивался к весовому устройству, другой – служил для фиксирования изменения температуры материала с помощью термо-

пар, соединенных с преобразователем MBA8. Затем цилиндры помещались в изолированную трубу, продуваемую горячим теплоносителем со скоростью 8 м/с, исключающей внешнедиффузионное сопротивление переносу пара с открытых концов образцов в окружающую среду. Во времени с интервалом 1 с фиксировали температуру материала по длине образца и убыль массы. Таким образом, были получены кривые кинетики сушки и температурные кривые, из которых были рассчитаны кинетические коэффициенты. Данные кривые сняты при различных температурах теплоносителя и различных порозностях материала.



Рисунок – 3.1. Схема экспериментальной установки:

1 – воздухоподогреватель; 2 – труба с изоляцией; 3 – весы электронные; 4 – модуль MBA-8; 5 – ПК; 6 – термопары ТХА(к); 7 – исследуемые образцы

В соответствии с зональным методом[61], интервал изменения концентрации влаги в твердой фазе $(U_n \div U_\kappa)$ и температур $(T_n \div T_\kappa)$ разбивали на *n* зон, в каждой из которых коэффициент теплопроводности принимался постоянным. Для каждой зоны определялось значение τ_i (время изменения концентрации от U_{μ_i} до U_{κ_i} и температуры материала от T_{μ_i} до T_{κ_i}). Для определения эффективного коэффициента теплопроводности зональный метод был дополнен снятием температурной кривой [77]. Каждая температурная кривая разбивалась на *n* зон, соответствующих зонам кривой кинетики. Для каждой из зон определяли T_{μ_i} и T_{κ_i} и составляли тепловой баланс:

$$q_{i} = \frac{m_{c} \cdot c_{c} \cdot \Delta T_{i} + m_{e} \cdot c_{e} \cdot \Delta T_{i} + m_{c} \cdot \Delta U_{i} \cdot r}{\Delta \tau_{i}}$$
(3.1)

Затем, считая, что количество теплоты, необходимое для нагрева массы материала и содержащейся в нем влаги, а также для испарения части влаги, подводится путем теплопроводности через боковую поверхность образца, определяли эффективный коэффициент теплопроводности влажного материала в процессе сушки по формуле:

$$\lambda_i = \frac{q_i \cdot \delta}{F \cdot (T_c - T_{\mathcal{M}_i})} \quad . \tag{3.2}$$

В уравнениях (3.1), (3.2) обозначено: m_c – масса сухого вещества в образце, кг; c_c – теплоемкость сухого вещества, Дж/(кг·К); $\Delta T_i = T_{\kappa i} - T_{\mu i}$ – изменение температуры материала за время $\Delta \tau_i$, °С; m_e – масса влаги в образце к моменту времени τ_i , кг; c_e - теплоемкость воды, Дж/(кг·К); δ – радиус образца, м; F – боковая поверхность образца, м²; $T_c - T_{M_i}$ – разность температур между стенкой и средней температурой материала в *i*-тый промежуток времени, °С.

Эффективный коэффициент температуропроводности определялся по известной формуле:

$$a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \cdot \rho_i} \ . \tag{3.3}$$

Удельная теплоемкость влажного тела, зависящая от влагосодержания, рассчитана по правилу аддитивности[39]:

$$c_i = c_c (1 - \overline{U}_i) + c_e \cdot \overline{U}_i . \qquad (3.4)$$

Плотность высушиваемого материала определена по выражению:

$$\rho_i = \rho_c (1 - U_i) + \rho_e \cdot U_i \quad , \tag{3.5}$$

где ρ_c, ρ_s – плотности сухого материала и воды соответственно.

Для определения коэффициента массопроводности полученные кривые также разбивали на *n* концентрационных зон, в каждой из которых коэффициент массопроводности k_i принимали постоянным. Для каждой зоны по кривой кинетики сушки определяли значение времени τ_i изменения концентрации от \overline{C}_{μ_i} до \overline{C}_{κ_i} и рассчитывали коэффициент k_i по уравнению (для цилиндрического образца):

$$k_i = \frac{R^2}{\mu^2 \cdot \tau_i} \cdot \ln \frac{B}{E} , \qquad (3.6)$$

где *B*=0,6917 при i=1 и *B*=1 при i>1; *µ*=2,4048.

$$E = \frac{\overline{C}_{\kappa_l} - \overline{C}_p}{\overline{C}_{\mu_l} - \overline{C}_p} . \tag{3.7}$$

В результате опытов получены кривые кинетики сушки и температурные кривые, на основе которых были рассчитаны: эффективный коэффициент теплопроводности, эффективный коэффициент температуропроводности и коэффициент массопроводности многокомпонентного пористого слоя ТКО.

На рис.3.2 приведены кинетическая и температурная кривые, снятые в процессе сушки образца ТКО с порозностью 0,43 при температуре сушильного агента 192°С. Аналогичные кривые, снятые при температурах сушильного агента 132, 146, 157, 175, 222°С и порозностях 0,62 и 0,7 приведены в приложении 2.

На рис.3.3 – 3.5 представлены результаты обработки полученных экспериментальных данных (рис.3.2) в виде графических зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, а также коэффициента массопроводности ТКО от влажности материала и температуры сушильного агента[39,100,113]. Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при порозностях образца ТКО 0,62 и 0,7 приведены в приложении 2.



Рисунок – 3.2. Температурная кривая (1) и кривая кинетики сушки (2) образца ТКО с порозностью 0,43 при температуре сушильного агента 192°С



Рисунок – 3.3. Изменение эффективного коэффициента теплопроводности ТКО в процессе сушки (1– 222°С, 2– 192°С, 3– 175°С, 4– 157°С, 5– 146°С,



Рисунок – 3.4. Изменение эффективного коэффициента температуропроводности ТКО в процессе сушки (1– 222°С, 2– 192°С, 3– 175°С, 4– 157°С, 5– 146°С, 6– 132°С)



Рисунок – 3.5. Изменение эффективного коэффициента массопроводности ТКО в процессе сушки (1– 222°С, 2– 192°С, 3– 175°С, 4– 157°С, 5– 146°С,

6-132°C)

Из анализа полученных данных видно, что в процессе испарения влаги из материала происходит уменьшение эффективного коэффициента теплопроводности, а эффективный коэффициент температуропроводности и коэффициент массопроводности возрастают. Повышение температуры сушильного агента приводит к возрастанию теплофизических и кинетических коэффициентов. С увеличением порозности слоя эффективный коэффициент теплопроводности уменьшается, а эффективный коэффициент температуропроводности и коэффициент массопроводности возрастают.

Обработка экспериментальных данных позволила получить следующие эмпирические уравнения для расчета эффективных коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и массопроводности в зависимости от влагосодержания (U=0,05÷1,8 кг/кг), температуры материала (t_{M} =10÷220°C), его порозности (f = 0,43÷0,7) и температуры среды (t_{e} = 130÷225°C):

$$\lambda_{2}(U, t_{M}, t_{2}, f) = 0, 2 - 0, 24f + aU + bU^{2} + cU^{3} + dU^{4} + 4, 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{M},$$
 (3.8)
где $a = 5, 1 \cdot 10^{-3} \cdot t_{2} - 0, 2156;$ (3.9)

$$b = -7, 6 \cdot 10^{-3} \cdot t_{2} + 0,5747; \qquad (3.10)$$

$$c = 4, 3 \cdot 10^{-3} \cdot t_{2} - 0,364; \qquad (3.11)$$

$$d = -8 \cdot 10^{-4} \cdot t_{e} + 0,0724.$$
(3.12)

$$a_{_{9}}(U,t_{_{M}},t_{_{\mathcal{C}}},f) = a + b \cdot \ln U + c \cdot t_{_{M}}, \qquad (3.13)$$

где
$$a = -8,5 \cdot 10^{-9} + 5,926 \cdot 10^{-7} \cdot f - 5,325 \cdot 10^{-10} \cdot t_{2};$$
 (3.14)

$$b = -7, 3 \cdot 10^{-8} + 1, 8 \cdot 10^{-10} \cdot t_{2}; \qquad (3.15)$$

$$c = -7, 6 \cdot 10^{-10} + 7, 3 \cdot 10^{-12} \cdot t_{2}.$$
(3.16)

$$k_{g}(U, t_{M}, t_{e}, f) = a + b \cdot \ln U + c \cdot t_{M}, \qquad (3.17)$$

где
$$a = -1,95 \cdot 10^{-8} + 2,142 \cdot 10^{-7} \cdot f - 3,46 \cdot 10^{-10} \cdot t_{2};$$
 (3.18)

$$b = -6,55 \cdot 10^{-9} + 1,5 \cdot 10^{-11} \cdot t_{2}; \tag{3.19}$$

$$c = -5,86 \cdot 10^{-10} + 4,23 \cdot 10^{-12} \cdot t_{z}.$$
(3.20)

Величина ошибки между опытными и расчетными значениями эффективных коэффициентов не превышает ±12%.

3.2. Исследование внешнего тепло- и массообмена в процессе сушки твердых коммунальных отходов

При расчете процесса конвективной сушки решается сопряженная задача тепло- и массообмена, для которой характерно следующее:

- сушильный агент отдает теплоту высушиваемому материалу и воспринимает испарившуюся влагу;

- высушиваемый материал воспринимает теплоту сушильного агента и отдает ему влагу. Сушильный агент используется и как транспортирующее средство.

В теории сушки используется метод анализа внешнего тепломассообмена [76], основанный на совместном рассмотрении уравнений движения и неразрывности вязкого несжимаемого потока:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot grad\vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\rho}gradP + v\nabla^2 \vec{v} , \qquad (3.21)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + div \rho \vec{v} = 0 , \qquad (3.22)$$

конвективно-диффузионного переноса влаги в движущемся сушильном агенте:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \vec{\upsilon} \cdot gradC = D\nabla^2 C \quad , \tag{3.23}$$

и уравнения, описывающего поле температуры в потоке теплоносителя:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{\upsilon} \cdot gradt = a\nabla^2 t \quad , \tag{3.24}$$

где υ – скорость сушильного агента, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность сушильного агента, кг/м³; P – давление, Па; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; C – концентрация влаги, м³/м³; D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/c; t – температура, °C; a – коэффициент температуропроводности теплоносителя, м²/c.

Трудности анализа внешнего тепломассопереноса теоретическими методами[14,15,29,83] приводят к необходимости применения теории подобия[27] с использованием экспериментальных данных.

При одновременном протекании процессов тепло- и массообмена для определения коэффициента теплообмена используют соотношение, предложенное А. В. Нестеренко [49]:

$$Nu = A \operatorname{Pr}^{0,33} \operatorname{Re}^{n} G u^{m}, \qquad (3.25)$$

где $\Pr = \frac{v}{a}$ – критерий Прандтля; $\operatorname{Re} = \frac{wd}{v}$ – критерий Рейнольдса; $Gu = \frac{T_C - T_M}{T_C}$ – критерий Гухмана; T^C, T^M – температура среды и адиабатного испарения жидкости, соответственно.

Это соотношение выведено для плоской пластины при конвективном подводе тепла. За определяющий размер плиты принят ее размер в направлении потока газов, для шара и цилиндра - их длина в направлении потока.

Наиболее применимым можно считать универсальное критериальное уравнение для коэффициента теплообмена влажных тел, полученное П.Д.Лебедевым [15], которое позволяет рассчитывать коэффициенты теплообмена для любого момента времени всего процесса сушки для всех влажных материалов:

$$Nu = A \operatorname{Re}^{n} \left(\frac{T^{C}}{T^{M}}\right)^{m} \left(\frac{\omega}{\omega_{K}}\right)^{K}, \qquad (3.26)$$

где ω – интегральная текущая влажность материала в период падающей скорости сушки; ω_{k} – интегральная критическая влажность материала.

Значения величины A и показателя степени K параметрического критерия $(\frac{\omega}{\omega_K})$ обусловлены формой связи влаги с материалом и разницей между геометрической и истинной поверхностями испарения.

Структура зависимости (3.26) легла в основу обработки многочисленных экспериментальных данных по конвективной сушке различных материалов (торфа, гипса и др.) [77,83,105]. Однако ее применение для слоя кускового многокомпонентного материала требует корректировки. Такая необходимость обусловлена влиянием на тепломассообмен соотношения между эквивалентным диаметром куска и толщиной прогреваемого слоя[58,65].

Экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного слоя ТКО проведены в четырех температурных режимах при скоростях газового потока: 0,1; 0,5; 1; 1,5 и 2 м/с. Первый режим сушки осуществлялся при постоянной температуре сушильного агента, равной 107°С. Второй, третий и четвертый – при температурах: 127, 147 и 167°С.

На рис.3.6 приведена схема экспериментальной установки для исследования процессов тепломассообмена между слоем ТБО среднего морфологического состава и сушильным агентом (воздухом)[38]. Экспериментальная установка состояла из участка трубы (1) с металлической сеткой для удержания слоя ТБО (рабочая зона) и электрического калорифера (2) для нагрева сушильного агента (воздуха). Подачу воздуха осуществляли вентилятором (4), расположенным перед калорифером. Скорость потока воздуха и его температуру регулировали при помощи блока управления (3) с экраном для вывода информации. Температуру и влажность воздуха фиксировали при помощи датчиков RHP-2S11 (5) с выводом показаний на экран блока управления. Скорость потока воздуха измеряли анемометром Testo 416(6). В ходе эксперимента температуру образца измеряли пятью термопарами типа TXA, установленными в слое ТКО. Преобразователь аналогоцифрового сигнала OBEH MBA8 передавал сигнал на персональный компьютер. Сушку образца выполняли до установления постоянства его массы.



Рисунок – 3.6. Схема экспериментальной установки для исследования процессов сушки ТКО: 1 – рабочая зона; 2 – электрический калорифер; 3 – блок управления; 4 – вентилятор; 5 – датчики температуры; 6 – анемометр

До начала опыта образцы ТБО были помещены в водяную ванну на 20 часов. С помощью центрифуги из образцов удалялась избыточная влага. Затем образец ТКО помещали в рабочую зону установки. Для определения влажности из образца ТКО извлекали навеску. Ее взвешивали на лабораторных электронных весах (ВЛ Э134) 4-го класса точности, помещали в сушильный шкаф, нагретый до температуры 107°С, и выдерживали до достижения постоянной массы.

В процессе сушки фиксировали изменение массы материала. Затем по экспериментальным данным проводился расчет влажности сырья и скорости изменения содержания влаги в слое ТКО.

Экспериментальные данные получены для интервала температур сушильного агента 107 ÷ 220°С и скорости его движения 0,1 ÷ 2 м/с.

В качестве примера на рис. 3.7 приведены экспериментальные данные изменения температуры слоя ТКО в процессе его сушки и изменения влажности образца при четырех температурных режимах сушильного агента, движущегося со скоростью 0,1 м/с, а на рис.3.8 – экспериментальные данные изменения температуры и влажности слоя ТКО в процессе его сушки при температуре воздуха 167°С с различными скоростями движения воздушного потока[20,38]. Анализ полученных данных показывает, что на процесс сушки оказывает влияние скорость движения сушильного агента и его температура.



Рисунок – 3.7. Температура и влажность образца слоя ТКО в процессе сушки (1 – 107°C, 2 – 127°C, 3 – 147°C, 4 – 167° С), скорость воздушного потока 0,1 м/с



Рисунок – 3.8. Температура и влажность образца ТКО при температуре сушильного агента 167°С и скоростях воздушного потока:1–0,1 м/с, 2–0,5 м/с, 3 – 1 м/с, 4 –

1,5 м/с, 5 – 2 м/с

На рис.3.8 приведены кривые скорости сушки, полученные в процессе нагрева слоя ТБО сушильным агентом постоянной температуры. Зависимости получены в виде сплайн - функций в диапазонах влажности:

- 65÷50% параболой с погрешностью 2%;
- 50÷15% прямой линией с погрешностью 7%;
- 15÷0%- параболой с погрешностью 5%.

66



Рисунок – 3.9. Кривые скорости сушки слоя ТКО в температурных режимах:1 – 107°С, 2 – 127°С, 3 – 147°С, 4 – 167°С. Скорость газа 0,1 м/с

Анализ полученных кривых скорости сушки, показывает, что в первом периоде скорость сушки отклоняется от постоянных значений. Это объясняется тем, что, в отличие от классического монодисперсного слоя, где удаляется равное количество влаги в первом периоде, мы имеем дело с полидисперсным слоем, компоненты которого состоят из разных материалов. Во втором периоде характер кривых обусловлен формой связи влаги с материалом и соответствует капиллярно-пористым коллоидным телам.

Опытные данные, полученные в процессе конвективной сушки влажного слоя ТКО при температурных режимах сушильного агента 107 ÷ 220°С, и при скоростях газового потока 0,1 ÷ 2 м/с были обработаны в виде критериальной зависимости:

$$Nu = A \left(\frac{d}{H}\right)^k Re^n E^m \quad , \tag{3.27}$$

где *H* – высота слоя, м; *d* – эквивалентный размер, м; *E* – симплекс, учитывающий изменение влажности материала, т.е. влияние массообмена на теплообмен:

$$E = \frac{100 - W_T}{W_H} \quad , \tag{3.28}$$

где W – интегральная относительная влажность материала, индекс T – текущая, H – начальная, %.

Расчет массообмена можно свести к расчету теплообменного процесса, используя соотношение [49]:

$$Nu = Sh \cdot K_c , \qquad (3.29)$$

где *Sh* – критерий Шервуда; *K_c* – поправочный коэффициент для диффузионного потока:

$$K_c = \frac{1}{1 - p^{cp}} \quad , \tag{3.30}$$

где *p*^{*cp*} – среднелогарифмическое давление паров в пограничном слое.

В результате обработки экспериментальных данных были получены критериальные уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи от сушильного агента к материалу ($Re=400\div4350$, $d/H=0.02\div0.1$, $E=0.6\div1.5$).

Для ламинарного режима движения воздуха получены зависимости:

$$Nu = 1,24 \left(\frac{d}{H}\right)^{0.3} Re^{0.33} E^{0.084} , \qquad (3.31)$$

$$Sh = 0.911 \left(\frac{d}{H}\right)^{-0.2} Re^{0.33} E^{0.084} .$$
(3.32)

Для турбулентного режима движения воздуха критериальные уравнения имеют вид:

$$Nu = 0.107 \left(\frac{d}{H}\right)^{0.38} Re^{0.82} E^{0.12} , \qquad (3.33)$$

$$Sh = 0,066 \left(\frac{d}{H}\right)^{-0.49} Re^{0.82} E^{0.12} .$$
(3.34)

В качестве определяющего размера при расчете теплообмена принят эквивалентный диаметр куска, найденный непосредственным измерением образцов с учетом распределения Гаусса. При расчете массообмена за определяющий размер взята длина поверхности испарения, т.е. минимальная длина поровых каналов в направлении движения сушильного агента. За определяющую температуру была принята средняя температура сушильного агента.

На рис. 3.10 и 3.11 представлены средние значения коэффициентов теплоотдачи сушильного агента к материалу и массоотдачи в процессе сушки слоя ТКО при разных скоростях сушильного агента. Анализ графиков показывает, что с уменьшением относительной влажности материала интенсивность теплоотдачи и массоотдачи снижается.



Рисунок – 3.10. Зависимость коэффициента теплоотдачи от относительной влажности в процессе сушки при постоянной температуре 147°С и скоростях воздуха: 1 – 0,1 м/с, 2 – 0,5 м/с, 3 – 1 м/с, 4 – 1,5 м/с, 5 – 2 м/с



Рисунок – 3.11. Зависимость коэффициента массоотдачи от относительной влажности в процессе сушки при постоянной температуре 107°С и скоростях воздуха: 1 – 0,1 м/с, 2 – 0,5 м/с, 3 – 1 м/с, 4 – 1,5 м/с, 5 – 2 м/с

3.3. Определение погрешности эксперимента

Погрешность эксперимента включает в себя: погрешность определения температуры, массы и насыпной плотности ТКО; расхода и температуры сушильного агента.

1. Погрешность определения температуры состоит:

а) из погрешности термопары ТХК, основная погрешность которой составляет:

$$\delta_{TXK} = \pm 0,5\%$$
;

б) из погрешности МВА - 8, основная погрешность которого составляет:

$$\delta_{\rm MBA8}=\pm0,05\%.$$

Тогда основная относительная погрешность определения температуры δ_T составит:

$$\delta_T = \pm \sqrt{\left(\delta_{TXK}\right)^2 + \left(\delta_{MBA8}\right)^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.05^2} = \pm 0.503 \%$$

Предельная относительная погрешность складывается из основной, дополнительной и методической погрешностей:

$$\delta_{\Pi P} = \pm (\delta_{OCH} + \delta_{AO\Pi} + \delta_{MET}) \, ,$$

При измерении температуры сушильного агента возникает методическая погрешность $\delta_{\rm MET} = 5\%$ [87].

Поскольку все приборы работают в нормальных условиях, то дополнительная погрешность $\delta_{_{DOI}}$ при определении температуры не возникает.

Тогда предельная относительная погрешность определения температуры равна:

$$\delta_{\Pi P.T.} = \pm (\delta_T + \delta_{MET}) = \pm 5,503\%$$
.

2) Погрешность определения насыпной плотности и массы ТКО состоит: а) из погрешности линейки, диапазон измерения которой 100±0,5мм. $\delta_{доп}$ учитывается в величине ±0,5мм, на которую мы можем ошибиться при измерениях.

$$\delta_{JUH} = \pm 0.5\%$$

б) из погрешности измерения весов, основная погрешность которых

$$\delta_{\scriptscriptstyle BEC} = \pm 0,1\%$$
.

При измерении массы ТКО возникает методическая погрешность $\delta_{MET} = 5\%$ [87].

Тогда основная относительная погрешность определения насыпной плотности δ_{a} составит:

$$\delta_{\rho} = \pm \sqrt{\left(\delta_{JIHH}\right)^2 + \left(\delta_{BEC}\right)^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.1^2} = \pm 0.51\%.$$

Дополнительная погрешность $\delta_{доп}$ при определении насыпной плотности не возникают.

Тогда предельная относительная погрешность определения насыпной плотности равна:

$$\delta_{\Pi P.\rho} = \pm (\delta_{\rho} + \delta_{MET}) = \pm 5,51\%.$$

3) Погрешность расхода газа состоит:

a) из погрешности анемометра Testo, диапазон измерения которого от 0 до 10 м/с.

$$\delta_{PACX} = \pm 1,5\%.$$

б) из погрешности измерения секундомера, основная погрешность которого

$$\delta_{CEK} = \pm 0,15\%.$$

Тогда основная относительная погрешность определения расхода газа составит:

$$\delta_P = \pm \sqrt{\left(\delta_{PACX}\right)^2 + \left(\delta_{CEK}\right)^2} = \sqrt{1,5^2 + 0,15^2} = \pm 1,51\%.$$

При измерении расхода газа возникает методическая погрешность $\delta_{MET} = 5\%$ [87].

Поскольку анемометр и секундомер работают в нормальных условиях, то дополнительная погрешность $\delta_{доп}$ при определении расхода не возникает.

Тогда предельная относительная погрешность определения расхода газа равна:

$$\delta_{\Pi P.P.} = \pm (\delta_P + \delta_{MET}) = \pm 6,51\%$$
.

Суммарная погрешность эксперимента составляет:

$$\delta_{\mathcal{P}} = \pm \sqrt{\left(\delta_{\Pi P.T.}\right)^{2} + \left(\delta_{\Pi P.\rho.}\right)^{2} + \left(\delta_{\Pi P.P.}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\pm 5,503\right)^{2} + \left(\pm 5,51\right)^{2} + \left(\pm 6,51\right)^{2}} = \pm 10,15\%$$

3.4. Выводы по третьей главе

- Выполнено экспериментальное исследование процесса конвективной сушки слоя твердых коммунальных отходов, на основе которого предложены критериальные уравнения, позволяющие определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в слое ТКО в зависимости от влажности материала, скорости сушильного агента и высоты слоя.
- 2. На основе экспериментальных кривых кинетики сушки и температурных кривых получены формулы для расчета эффективных коэффициентов теп-
лопроводности, температуропроводности и массопроводности слоя твердых коммунальных отходов в зависимости от влагосодержания, температуры материала, порозности и температуры сушильного агента.

3. Результаты исследований могут быть использованы для расчета полей температур и концентраций влаги в слое ТКО в целях повышения эффективности его переработки в термическом реакторе.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

4.1 Описание объекта исследования

При термической переработке в печах шахтного типа ТКО загружаются в верхнюю часть рабочего пространства печи (реактора) и последовательно проходят зоны сушки и пиролиза (рис.4.1).

В зоне сушки осуществляется нагрев и сушка слоя ТКО за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза, а выделившаяся в процессе сушки влага удаляется из рабочего пространства печи. В зоне пиролиза ТКО разлагаются, образуя пиролизный газ, пригодный для использования в качестве топлива, летучие конденсируемые соединения и углеродистый остаток.



Рисунок – 4.1. Расчетная схема термического реактора

Для достижения требуемой полноты обезвреживания отходов необходимо расчетно-экспериментальное определение температуры и продолжительности процесса термической переработки. При этом большую роль играет влажность ТКО, которая может быть достаточно высокой[24,41]. Так, для среднего состава ТКО первоначальная влажность материала должна быть не более 5%. В печах для термической переработки ТКО, где используется предварительная подготовка по выделению из ТКО негорючей части, первоначальная влажность сырья может достигать 40 % [38,39,98].

Таким образом, с точки зрения энергозатратности, повышенный интерес представляет собой процесс сушки.

4.2 Математическая модель процесса сушки

4.2.1. Постановка задачи

Для расчета температурного поля слоя органического сырья в зоне сушки реактора предложена математическая модель, согласно которой слой ТКО рассматривается как условное квазиоднородное изотропное пористое тело с эффективными теплофизическими свойствами[23,37,40,43]. Модель позволяет перейти от реальной пористой структуры к ее приближению.

Допущения при моделировании:

1. Пористое тело представлено в виде сплошной среды с эффективными теплофизическими характеристиками и усредненными величинами температур, концентраций, порозности и т.д.

2. Материал и газ, заполняющий поры, увлажнены.

3. Температура газа, заполняющего поры, принимается равной температуре материала.

Математическая формулировка задачи представлена дифференциальным уравнением теплопроводности в одномерной постановке с распределенным внутренним источником (стоком) теплоты q_v и эффективными теплофизическими свойствами: теплопроводностью λ_3 и теплоемкостью c_3 , зависящими от температуры *T* и влагосодержания *U*

$$c_{\mathfrak{I}}(T,U)\rho_{\mathfrak{I}}(T,U)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{\mathfrak{I}}(T,U)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}) - q_{V}(x,\tau) , \tau \ge 0, 0 \le x \le R$$
(4.1)

в совокупности с краевыми условиями:

$$T(x,0) = T_0 , (4.2)$$

$$\lambda_{\mathfrak{I}}(T,U)\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0 , \qquad (4.3)$$

$$T(R,\tau) = const , \qquad (4.4)$$

где $\rho_{\mathfrak{I}}$ – средняя эффективная плотность, кг/м³.

В правой части уравнения (4.1): первое слагаемое характеризует перенос теплоты теплопроводностью в пористом теле, второе слагаемое – распределенный внутренний источник (сток), представляющий собой затраты теплоты на испарение влаги в слое в процессе его сушки.

Начальное условие (4.2) показывает, что в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ тело имеет равномерное распределение температуры. Граничное условие (4.3) – это условие термодинамического равновесия с окружающей средой. На поверхности тела x = R принято граничное условие 1 рода (4.4), характеризующееся постоянной температурой.

4.2.2. Определение эффективных теплофизических коэффициентов

В системе дифференциальных уравнений (4.1) – (4.4) эффективный коэффициент теплопроводности определяется по результатам исследований, представленных в главе 3.

Эффективные теплоемкость и плотность рассчитываются на основе принципа аддитивности по известным свойствам влажных материала и газа, заполняющего поры:

$$c_{\mathcal{I}} = c_M (1 - f) + c_\Gamma , \qquad (4.5)$$

$$\rho_{\mathfrak{I}} = \rho_{M}(1-f) + \rho_{\Gamma} \quad . \tag{4.6}$$

4.2.3. Методика определения внутреннего стока теплоты

Закон изменения внутреннего стока теплоты имеет вид:

$$dq_{V}(x,\tau) = \frac{m_{\mathcal{H}}r}{V_{\mathcal{M}}\Delta\tau} = \varepsilon r \rho_{\mathcal{H}}(T,U) \frac{dU(x,\tau)}{d\tau} , \qquad (4.7)$$

где r – скрытая теплота парообразования; $m_{\mathcal{H}}$ – масса испарившейся жидкости за временной промежуток, характеризующий долю переноса энергии в виде пара от общего ее потока. [49].

Начальное значение величины теплового потока, затраченного на испарение влаги в слое, рассчитывается по формуле:

$$q_0 = \frac{\varepsilon \rho_3 r U_0}{\tau} \tag{4.8}$$

Поиск зависимости $q_v(x,\tau)$ осуществлялся решением обратной задачи теплопроводности дискретно для *n* моментов времени при условии минимизации среднеквадратичного отклонения полученных расчетом температур от экспериментально замеренных в нескольких сечениях по высоте образца.

4.2.4. Методика проведения эксперимента

На рис.4.2 показана схема экспериментальной установки, состоящей из воздухоподогревателя 1, цилиндрической камеры с тепловой изоляцией 2, комплекта термопар 3, соединенных с аналоговым модулем MBA-8 и персональным компьютером 4, электронных весов 5 для взвешивания исследуемого образца ТКО 6.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Исследуемый материал (образец слоя ТКО среднего морфологического состава высотой 75 мм с предварительно найденной порозностью, равной 0,5, и начальной влажностью 55%) помещался на сетку и подвешивался к весовому устройству. По высоте слоя вдоль оси через одинаковые расстояния, как это показано на рис.4.2, закреплялись 5 термопар типа ТХА(к). Спаи термопар располагались на расстоянии 1; 15; 35; 55; 75 мм от поверхности исследуемого образца. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль MBA-8 и далее обрабатывался на компьютере. Показания термопар фиксировались с интервалом в одну секунду.

Для получения правильного представления о поле температур высушиваемого образца особое внимание обращалось на точность размещения термопар в образце. Отверстия под термопары накалывались при помощи тонкой стальной иглы, имеющей подвижной ограничитель. Ограничитель позволял размещать термопары точно на заданном расстоянии от поверхности. Для исключения переноса тепла через электроды термопары заделывались с торца и размещались в изотермических поверхностях.

Точки замера температуры выбирались на оси тела или около неё, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Всё это позволяло величину ошибки при замере свести к минимуму.

Образец помещался в изолированную цилиндрическую камеру диаметром 150 мм, продуваемую горячим теплоносителем. Температура теплоносителя измерялась термопарой ТХА(к), установленной в рабочем пространстве цилиндрической камеры.

В процессе нагрева фиксировались убыль массы материала, время сушки и температурные поля в расчетных сечениях по высоте слоя. По величине смещения каждой термопары в процессе нагрева определялась усадка слоя ТКО.

Сушка образца осуществлялась теплоносителем с температурами 200, 220 и 240°С. Использовать сушильный агент с более высокой температурой представляется нецелесообразным, так как выше 240 °С начинается пиролиз ТКО (см. 2 главу), и, таким образом, изменяется физическая картина процесса.



Рисунок – 4.2. Схема экспериментальной установки:

1 – воздухоподогреватель, 2 – цилиндрическая камера с тепловой изоляцией, 3 – термопары ТХА(к), 4 – персональный компьютер, 5 – весы электронные, 6 – ис-

следуемый образец ТКО

Для получения более достоверных результатов и во избежание влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторялся 3 раза. В качестве исходных данных для последующих расчётов принимались усреднённые по числу опытов значения температур $T(\tau)$ для данного режима нагрева.

В результате эксперимента получены зависимости $T(\tau)$, характеризующие изменение температуры в заданных сечениях образца, и кинетические кривые сушки ТКО (рис.4.3 – 4.5), где на рис. 4.3 – 4.5 обозначено: 1– температура на поверхности слоя ТКО; 2,3,4,5 – температуры на расстоянии от поверхности 15, 35, 55 и 75 мм соответственно; 6 – кинетическая кривая.

Для оценки влияния исходной влажности сырья на режим термообработки данный эксперимент был повторен при исходной влажности ТКО 15 и 30%. Результаты приведены в приложении 3.



Рисунок – 4.3. Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 200°С



Рисунок – 4.4. Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 220°С



Рисунок – 4.5. Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 240°С

4.3. Обработка экспериментальных данных

На основе кинетических кривых (рис.4.3 – 4.5) с использованием формул (4.7) – (4.8) был выполнен расчет временной зависимости внутреннего стока теплоты в заданных сечениях образца. Полученные значения q_V были использованы в уравнении (4.1) для расчета температурных полей образца. Расчётные зависимости температуры в заданных сечениях образца сопоставлялись с экспериментальными зависимостями $T(\tau)$ в этих же сечениях. Введением величины усадки, полученной из эксперимента, и корректировкой значений q_V было достигнуто минимальное квадратичное расхождение расчётной и экспериментальной температур в заданных сечениях.

Полученная таким образом зависимость $q_v(x, \tau)$ была аппроксимирована в программном комплексе Table Curve3D с погрешностью не более 5 % уравнением вида:

$$q_{V}(x,\tau) = a + b \cdot x + c \cdot \ln(\tau) + d \cdot x^{2} + e \cdot (\ln(\tau))^{2} + f \cdot x \cdot \ln(\tau) + g \cdot x^{3} + h \cdot (\ln(\tau))^{3} + i \cdot x \cdot (\ln(\tau))^{2} + j \cdot x^{2} \cdot \ln(\tau)$$

$$(4.9)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h, i, j - эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты представлены в виде функциональной зависимости от температуры сушильного агента и начальной влажности ТКО.

Для относительной влажности ТКО 55%:

$$a^{-1} = -1.24 \cdot 10^{-5} + 7.38 \cdot 10^{-13} \cdot T_{e}^{3} , \qquad (4.10)$$

$$b^{-1} = 2.05 \cdot 10^{-5} - 1.86 \cdot 10^{-11} \cdot T_{2}^{2.5} , \qquad (4.11)$$

$$c = -5.35 \cdot 10^3 + 3.03 \cdot 10 \cdot T_{c} \quad , \tag{4.12}$$

$$d = 4.62 \cdot 10^5 - 2.17 \cdot 10^3 \cdot T_{e} \quad , \tag{4.13}$$

$$e = 1.48 \cdot 10^5 - 1.83 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^3 , \qquad (4.14)$$

$$f = -5.85 \cdot 10^5 + 2.46 \cdot 10^3 \cdot T_{e} , \qquad (4.15)$$

$$g = -6.99 \cdot 10^3 + 6.96 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^3 , \qquad (4.16)$$

$$h = -6.5 \cdot 10^4 + 7.22 \cdot 10^{-3} \cdot T_{e}^{3} , \qquad (4.17)$$

$$i = 9.14 \cdot 10^4 - 9.44 \cdot 10^{-3} \cdot T_c^3 , \qquad (4.18)$$

$$j = -1.11 \cdot 10^5 + 5.38 \cdot 10^2 \cdot T_{e} . \qquad (4.19)$$

Для начальной относительной влажности ТКО 30%:

$$a^{-1} = -1.13 \cdot 10^{-5} + 8.56 \cdot 10^{-13} \cdot T_{a}^{3} , \qquad (4.20)$$

$$b^{-1} = 2.45 \cdot 10^{-5} - 3.15 \cdot 10^{-11} \cdot T_{e}^{2.5} , \qquad (4.21)$$

$$c = -4.65 \cdot 10^3 + 3.18 \cdot 10 \cdot T_2 , \qquad (4.22)$$

$$d = 4.59 \cdot 10^5 - 2.08 \cdot 10^3 \cdot T_{e} , \qquad (4.23)$$

$$e = 3.12 \cdot 10^5 - 2.97 \cdot 10^{-2} \cdot T_{e}^3 , \qquad (4.24)$$

$$f = -5.07 \cdot 10^5 + 2.64 \cdot 10^3 \cdot T_{2} , \qquad (4.25)$$

$$g = -7.45 \cdot 10^3 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^3 , \qquad (4.26)$$

$$h = -4.51 \cdot 10^4 + 3.01 \cdot 10^{-3} \cdot T_2^3 , \qquad (4.27)$$

$$i = 8.76 \cdot 10^4 - 9.01 \cdot 10^{-3} \cdot T_{e}^{3} , \qquad (4.28)$$

$$j = -1.18 \cdot 10^5 + 5.89 \cdot 10^2 \cdot T_{e} . \qquad (4.29)$$

Для начальной относительной влажности ТКО 15%:

$$a^{-1} = -1.02 \cdot 10^{-5} + 9.02 \cdot 10^{-13} \cdot T_{2}^{3} , \qquad (4.30)$$

$$b^{-1} = 2.89 \cdot 10^{-5} - 4.81 \cdot 10^{-11} \cdot T_{c}^{2.5} , \qquad (4.31)$$

$$c = -3.78 \cdot 10^3 + 3.75 \cdot 10 \cdot T_{e} , \qquad (4.32)$$

$$d = 4.15 \cdot 10^5 - 1.56 \cdot 10^3 \cdot T_{e} , \qquad (4.33)$$

$$e = 5.03 \cdot 10^5 - 4.22 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^3 , \qquad (4.34)$$

$$f = -4.39 \cdot 10^5 + 4.1 \cdot 10^3 \cdot T_{e} , \qquad (4.35)$$

$$g = -7.87 \cdot 10^3 + 2.91 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^3 , \qquad (4.36)$$

$$h = -5.12 \cdot 10^4 + 3.67 \cdot 10^{-3} \cdot T_c^3 , \qquad (4.37)$$

$$i = 7.16 \cdot 10^4 - 6.42 \cdot 10^{-3} \cdot T_{e}^3 , \qquad (4.38)$$

$$j = -1.42 \cdot 10^5 + 6.48 \cdot 10^2 \cdot T_c \ . \tag{4.39}$$

Графическая интерпретация стока теплоты $q_V(x,\tau)$ при $T_c = 200$ °C, $T_c = 220$ °C и $T_c = 240$ °C. показана на рис.4.6 и в приложении 4.



Рисунок – 4.6 Зависимость внутреннего объемного стока теплоты $q_V(x,\tau)$ при относительной влажности ТКО 55%: а) $T_2 - 200$ °C, б) $T_2 - 220$ °C, в) $T_2 - 240$ °C

4.4. Реализация модели

Математическая модель процесса сушки слоя ТКО реализована в многофункциональном программном конечно-элементном пакете ANSYS[93]. Построение геометрии модели произведено в среде SolidWorks с последующим импортированием в ПК ANSYS-Fluent. Для импортирования модели в пакет ANSYS использована вкладка *ANSYS12.1>Workbench*.

Окно Workbench предоставляет пользователю удобный графический интерфейс, в котором хорошо прослеживается весь ход решения задачи. Алгоритм построения модели приведен в приложении 5. На рис.4.7 представлена геометрическая модель слоя ТКО в зоне сушки реактора с построенной сеткой. Полученные моделированием температурные поля материала в процессе сушки через 2, 18 и 68 мин с момента начала нагрева показаны на рис. 4.8 – 4.10.



Рисунок – 4.7. Геометрическая модель слоя ТКО



Рисунок – 4.8. Температурное поле слоя ТКО через 2 минуты с момента начала

нагрева

A6 : Fluid Flow (Fluent) - CFD-Post	and the second	
File Edit Session Insert Tools Help		
🚰 📽 🛃 🗃 🧳 🤨 🧑 Location 🔻 🥰 📚 🗊 💉 🏚 🔢	影 妕 💿 % 🚾 🌐 🖄 🞯 🙁 🌿 🥕 🏭 🦓 🛍 🛍 👪 🖸	
Outline Variables Expressions Calculators Turbo	* \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	
4 🗟 Cases	View 1 ▼	
duá Case Comparison		
4 🖬 rH+ at 1080s	Temperature Volume Rendering 1	ANCVC
□ III exit	4.627e+002	PIG 2
T It vhod		N10.2
∭] ‡ wall solid		
User Locations and Plots	4.128e+002	
Volume Rendering 1		
Datals of Volume Pendering 2		
Geometry Color Dandar View	3.629e+002	
Domains All Domains	3 1200+002	
Definition	3.13067002	
Variable Temperature		
Range Global 🔻	2.631e+002	
Transparent 263.143 [K]	[K]	
Opaque 462.657 [K]		
Boundary Data 🔘 Hybrid 🔘 Conservative		
Transparency Scale Linear		
Transparency Map Default (Transparency)		
Transparency Tuning		Z
Resolution 20		Y_ 🏌 🔔 X
Transparency 0.2	0 0.050 0.100 (m)	
	0.025 0.075	
Apply Reset Defaults	3D Viewer Table Viewer Chart Viewer Comment Viewer Report Viewer	

Рисунок – 4.9. Температурное поле слоя ТКО через 18 минут с момента начала

нагрева



Рисунок – 4.10. Температурное поле слоя ТКО через 68 мин с момента начала на-

грева

4.5. Проверка адекватности математической модели

4.5.1. Сопоставление с экспериментальными данными.

Для проверки адекватности модели также было выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Проведена серия опытов по сушке образцов ТКО по методике, приведенной в п.4.2.4. Нагрев образцов осуществлялся теплоносителем с температурой 210 и 230°С. Толщина слоя в опытах составляла 75 мм, порозность – 0,5, начальная влажность материала – 55%.

Температурные поля нагреваемых образцов ТКО и кинетические кривые приведены на рис.4.11 – 4.12.



Рисунок – 4.11. Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 210°С: 1– на поверхности ТКО, 2 – 15 мм от поверхности, 3 – 35 мм от поверхности, 4 – 55 мм от поверхности, 5 – 75 мм от поверхности, 6 – относительная влажность ТКО



Рисунок – 4.12. Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 230°С: 1– на поверхности ТКО, 2 – 15 мм от поверхности, 3 – 35 мм от поверхности, 4 – 55 мм от поверхности, 5 – 75 мм от поверхности, 6 – относительная влажность ТКО

На рисунке 4.13 приведены расчетные и экспериментальные данные температуры слоя ТКО при нагреве его теплоносителем с температурой 230°С.



Рисунок – 4.13. Температурное поле слоя ТКО: 1– температура на поверхности слоя ТКО; 2– температура на расстоянии от поверхности 55 мм и 3 – температура центра. — расчет по предложенной методике; ••• эксперимент.

Сравнение результатов расчета по предложенной методике с экспериментальными данными показывает хорошее их совпадение. Погрешность расчета не превышает ±11%, а средняя – 7,2%.

4.5.2. Сопоставление с расчетом по методу С.В.Федосова.

Для решения задачи тепломассопереноса С.В.Федосовым предложен метод «микропроцессов», который позволяет свести нелинейную задачу расчета полей температур и влагосодержаний к линейной. В соответствии с методом, весь процесс делят на *n* элементарных «микропроцессов», в пределах каждого из которых все теплофизические параметры фаз считаются постоянными, т.е. нелинейная задача тепломассопереноса сводится к совокупности *n* линейных задач. В этом случае автор использует комбинированный подход, заключающийся в том, что вначале для каждого «микропроцесса» получают аналитическое решение, а затем весь процесс поэтапно просчитывается на ЭВМ. Метод дает хорошие результаты, если численное решение осуществляется в совокупности с методом интегрального преобразования Лапласа.

Использованием интегрального преобразования Лапласа С. В. Федосовым [83] получено аналитическое решение краевой задачи тепло - и влагопереноса для неограниченной пластины, формулировка которой представлена системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial U(x,\tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 U(x,\tau)}{\partial x^2} , \quad \tau > 0; \quad 0 < x < R , \quad (4.40)$$

$$U(x,0) = U_0$$
, (4.41)

$$\frac{\partial U(0,\tau)}{\partial x} = 0 \quad , \tag{4.42}$$

$$\beta \Big[U_p - U(R,\tau) \Big] = k \frac{\partial U(R,\tau)}{\partial x} \quad , \qquad (4.43)$$

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2} , \ \tau > 0; \quad 0 < x < R; \ , \tag{4.44}$$

$$T(x,0) = T_0$$
, (4.45)

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0 \quad , \tag{4.46}$$

$$\alpha \Big[T_c - T \big(R, \tau \big) \Big] = \lambda \frac{\partial T \big(R, \tau \big)}{\partial r} + q \big(\tau \big) \quad , \tag{4.47}$$

где $q(\tau) = \beta \cdot \rho_0 \left[U(R, \tau) - U_p \right] \cdot r$ – тепловой поток с испаряемой влагой [14, 31].

Для расчета температурного поля рекомендована формула[83]:

$$T(\bar{r},Fo) = 1 - q(LuFo) - \sum_{n=1}^{\infty} B_n(\xi) \psi(\mu_n,q,Fo) , \qquad (4.48)$$

где q(LuFo) – величина потока влаги с поверхности пластины, определяемая выражением:

$$q(LuFo) = \frac{\beta \rho r (U_p - U_0)}{\alpha (T_e - T_m)} \left[\frac{Bi_m}{Bi_m - 0.5\Gamma} \left\{ 1 - \exp \left[LuFo (Bi_m - 0.5\Gamma)^2 \right] \times \right\}, \quad (4.49)$$

×erfc $\left[Bi_m - 0.5\Gamma \right] \sqrt{LuFo} = 1$

$$\psi(\mu_n, q, Fo) = \left[1 + \mu_n^2 \int_0^{Fo} q(LuFo^*) \exp(\mu_n^2 Fo^*) dFo^*\right] \times , \qquad (4.50)$$
$$\times \exp(-\mu_n^2 Fo) - q(LuFo)$$

$$B_n(\xi) = \frac{2\sin\mu_n \cos(\mu_n \zeta)}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} \qquad (4.51)$$

В формулах (4.40) – (4.51): U_p – равновесное влагосодержание, кг/кг; U_0 – начальное влагосодержание, кг/кг; Г– фактор формы, Г=0 для пластины; Lu – критерий Лыкова, Lu = k/a; Fo – число Фурье, Fo = $a \cdot \tau/R^2$; Fo^{*} – число Фурье на i - м интервале времени, Fo^{*} = $a \cdot \tau^*/R^2$; Bi_m – массообменное число Био, $Bi_m = \beta \cdot R/k$; μ_n – корни уравнения, $\mu_n = (2n - 1) \cdot \pi/2$; ξ – безразмерная координата точки, $\xi = 0 \div 1$; R – толщина пластины, м.

По вышеописанному методу выполнен расчет температурного поля слоя ТБО в процессе его сушки теплоносителем с температурой 230°С. Толщина слоя принята 75 мм, порозность – 0,5, начальная влажность материала – 55%.

На рис.4.14 показано сопоставление температурных полей слоя ТКО, полученных экспериментально, рассчитанных по методу С.В.Федосова и по предложенной модели. Анализ полученных данных показывает аналогичный характер кривых нагрева. Метод С.В. Федосова чувствителен к изменениям коэффициента теплоотдачи, особенно на начальном участке нагрева, где коэффициент теплоотдачи изменяется в 2 ÷ 2,5 раза. Этим объясняется расхождение температурных кривых на начальном участке.

Средняя погрешность расчета не превышает ±13%.



Рисунок – 4.14. Температурное поле слоя ТКО 1– температура на поверхности слоя ТКО; 2– температура на расстоянии от поверхности 55 мм и 3 – температура центра. ••• эксперимент; — расчет по предложенной методике; — расчет по методу С.В.Федосова.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Предложена расчетно-экспериментальная методика решения задачи тепломассопереноса в слое ТКО в процессе его сушки, позволяющая учесть структурную деформацию (усадку) слоя.

2. Использование методики позволяет определить затраты энергии на процесс сушки в термическом реакторе.

5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

В технологиях переработки твердых коммунальных отходов используются шахтные печи (см. главу 1), в которых процесс пиролиза сопровождается небольшими подсосами воздуха (окислительный пиролиз).

В существующих установках (например, печь «Тогтах») пиролизный газ, предназначенный для последующего использования, отводится из зоны сушки, где он выполняет роль сушильного агента. В процессе сушки увеличивается влагосодержание газа и, соответственно, снижается его качество. Повышения качества пиролизного газа можно достичь отводом из печи части газа в зоне пиролиза, уменьшая количество газа, подвергающегося окислению и увлажнению в зоне сушки и обладающего более низкой теплотворной способностью.

Практическое осуществление процесса переработки ТКО и его эффективность в значительной мере зависят от конструкции установки и режима ее работы.

5.1. Описание конструкции и принципа действия реактора для утилизации твердых коммунальных отходов

Предлагается конструкция установки для переработки ТКО (рис.5.1), которая включает в себя: 1 – накопительную камеру; 2 – зону сушки; 3 – узел отбора влажного газа; 4 – узел отбора сухого газа; 5 – нагнетатель; 6 – конденсатосборник; 7 – камеру сжигания; 8 – горелку; 9 – топочную дверку; 10 – воздушный коллектор; 11 – патрубок для подвода газа; 12 – регулировочную арматуру; 13 – дымовую трубу; 14 – камеру пиролиза; 15 – регулировочную арматуру; 16 – шлюзовый затвор.



Рисунок – 5.1. Установка для переработки ТКО.

Установка работает следующим образом. Твердые коммунальные отходы загружают в накопительную камеру 1 с зоной сушки 2 печи-реактора без предварительной сортировки. Накопительная камера 1 является своего рода затвором, поскольку высота слоя перерабатываемого сырья, обладая высоким гидравлическим сопротивлением, препятствует выходу газов в атмосферу.

Производят загрузку пускового твердого топлива (дров) в камеру сжигания 7 через топочные дверки 9 и осуществляют его розжиг. Образующиеся высокотемпературные потоки продуктов сгорания передают тепловую энергию перерабатываемому сырью в камере пиролиза 14, омывая наружную поверхность камеры, обеспечивая тем самым равномерность ее прогрева и проведение процесса пиролиза. Полученный в процессе разложения ТКО пиролизный газ делится на два потока. Одну часть газа через узел отбора 4 направляют стороннему потребителю, а другую – в зону сушки 2 для высушивания влажных отходов. Из зоны сушки увлажненный пиролизный газ через узел отбора 3 при помощи нагнетателя 5 направляют в конденсатосборник 6 для охлаждения и удаления влаги и затем в горелки 8, где его используют как основное топливо, обеспечивая полное сжигание посредством подачи воздуха из коллектора 10.

После выхода печи на рабочий режим пусковое твердое топливо не используют. Регулирование процесса окислительного пиролиза осуществляют при помощи регулировочной арматуры 15. Рабочий процесс термического разложения осуществляется за счет энергии, полученной от сжигания пиролизного газа.

Перерабатываемые отходы перемещаются из зоны сушки в зону пиролиза под действием силы тяжести, подвергаясь непрерывной тепловой обработке. Оставшиеся не переработанные частицы поступают на колосниковую решетку, а затем в шлюзовый затвор 16, откуда их удаляют для дальнейшего использования.

Для определения режимных и конструктивных параметров реактора и оценки его эффективности выполнен расчет теплового баланса рабочего пространства и термического КПД при различных режимах окислительного пиролиза.

5.2. Тепловой баланс реактора

Расчет теплового баланса реактора по зонам сушки, пиролиза и камеры горения произведен на основе экспериментальных данных, представленных во 2 главе работы.

При расчете теплового баланса приняты следующие допущения:

1) выход углеродистого остатка и золы не превышает 15% (по данным эксперимента в главе 2);

2) пиролизный газ поступает в камеру сгорания установки полностью осушенным. 5.2.1. Тепловой баланс зоны сушки

Влажные ТКО ($G_{TKO} + G_{eod}$), поступающие в зону сушки термического реактора, нагреваются и высушиваются потоком газа ($G_{nup.cas}^{cyuu}$) из нижерасположенной зоны пиролиза. Сухие отходы направляются в зону пиролиза, а влажный газ ($G_{nup.cas}^{cyuu} + G_{eod}$) удаляется из зоны сушки.

Схемы материальных и тепловых потоков зоны сушки представлены на рис.5.2 и 5.3.



Рисунок – 5.2. Схема материальных потоков зоны сушки.



Рисунок – 5.3. Схема тепловых потоков зоны сушки.

Приходные статьи теплового баланса зоны сушки.

1. Физическое тепло, вносимое с ТКО, кВт:

$$Q_{TKO}^{ex} = G_{TKO} \cdot c_{TKO}^{ex} \cdot t_{Hay}, \qquad (5.1)$$

где G_{ТКО} – производительность установки по сухим ТКО, кг/с;

 c_{TKO}^{ex} – средняя удельная теплоемкость сухих ТКО на входе в зону сушки, кДж/(кг°С);

 $t_{\mu a \gamma}$ – начальная температура ТКО, °С.

2. Теплота, вносимая с влагой, кВт:

$$Q_{BOD}^{ex} = G_{BOD} \cdot c_{BOD} \cdot t_{HAY}, \qquad (5.2)$$

где $G_{\rm sod}$ – количество воды, содержащейся в ТКО, кг/с;

 c_{600} – средняя удельная теплоемкость воды, кДж/(кг°С);

 $t_{\mu a \gamma}$ – начальная температура ТКО, °С.

3. Теплота, вносимая с пиролизным газом, кВт:

$$Q_{nup.ca3}^{ex} = G_{nup.ca3}^{cyu} \cdot c_{nup.ca3}^{ex} \cdot t_{nup.ca3}^{ex} \quad , \tag{5.3}$$

где $G_{nup.ras}^{cyuu}$ – массовый расход пиролизного газа на сушку ТКО, кг/с;

 $c_{nup.cas}^{ex}$ – средняя удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°С);

 $t_{nup.cas}^{ex}$ – температура пиролизного газа на входе в зону сушки, °С.

Расходные статьи теплового баланса зоны сушки.

1. Физическое тепло, уходящее с сухими ТКО, кВт:

$$Q_{TKO}^{\rm surv} = G_{TKO} \cdot c_{TKO}^{\rm surv} \cdot t_{cyu}, \qquad (5.4)$$

где c_{TKO}^{sbix} – средняя удельная теплоемкость сухих ТКО на выходе из зоны сушки , кДж/(кг°С);

 t_{cyuu} – температура ТКО на выходе из зоны сушки, °С.

2. Теплота, уходящая с пиролизным газом, кВт:

$$Q_{mup.ca3}^{sbix} = G_{mup.ca3}^{cyu} \cdot c_{nup.ca3}^{sbix} \cdot t_{nup.ca3}^{sbix}, \qquad (5.5)$$

где: $c_{mup,cas}^{6bix}$ – средняя удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°С); $t_{mup,cas}^{6bix}$ – температура пиролизного газа на выходе из зоны сушки, °С.

3. Теплота, уходящая с водяным паром из зоны сушки, кВт:

$$Q_{nap} = G_{sod} \cdot c_{nap} \cdot t_{yx.nap}, \qquad (5.6)$$

где *с_{пар}* – средняя удельная теплоемкость водяных паров, кДж/(кг°С);

 $t_{yx.za3}$ – температура водяного пара на выходе из зоны сушки, °С.

4. Теплота, затраченная на нагрев и испарение воды, нагрев водяного пара до температуры отбора из зоны сушки, кВт:

$$Q_{60\partial} = G_{60\partial} \cdot c_{60\partial} \cdot (t_{nap} - t_{Hay}) + G_{60\partial} \cdot r + G_{60\partial} \cdot c_{nap} \cdot (t_{yx.nap} - t_{nap})$$
(5.7)

где c_{nap} – средняя удельная теплоемкость водяных паров, кДж/(кг°С);

 t_{nap} – температура парообразования, °C;

г – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

 $t_{yx.nap}$ – температура водяного пара на выходе из зоны сушки, °С.

5. Теплота, затраченная на нагрев сухих ТКО до температуры отбора из зоны сушки, кВт:

$$Q_{TKO} = G_{TKO} \cdot c_{TKO}^{s_{bLX}} \cdot (t_{cyu} - t_{hay}), \qquad (5.8)$$

6. Потери теплоты в окружающую среду в зоне сушки принимаем в количестве 5% от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (5.4) ÷ (5.8), кВт:

$$Q_{nom.cyu} = 0.05 \cdot \left(Q_{TKO}^{6bx} + Q_{nup.ca3}^{6bx} + Q_{nap} + Q_{6od} + Q_{TKO} \right), \tag{5.9}$$

Уравнение теплового баланса зоны сушки имеет вид:

$$Q_{TKO}^{ex} + Q_{6od}^{ex} + Q_{nup.cas}^{ex} = Q_{TKO}^{ebix} + Q_{nup.cas}^{ebix} + Q_{nap} + Q_{6od} + Q_{TKO} + Q_{nom.cyu}.$$
 (5.10)

5.2.2. Тепловой баланс зоны пиролиза

В зону пиролиза поступают из зоны сушки высушенные отходы (G_{TKO}). Они частично окисляются кислородом (G_{O2}) с выделением энергии и разлагаются, образуя пиролизный газ ($G_{nup.ras.}$) и золу ($G_{3on.}$). Схемы материальных и тепловых потоков в зоне пиролиза представлены на рис.5.4 и 5.5.



Рисунок – 5.4. Схема материальных потоков в зоне пиролиза.



Рисунок – 5.5. Схема тепловых потоков в зоне пиролиза.

Приходные статьи теплового баланса зоны пиролиза.

1. Физическое тепло, вносимое с ТКО в зону пиролиза, кВт:

$$Q_{TKO}^{sux} = G_{TKO} \cdot c_{TKO} \cdot t_{cvu} \quad , \tag{5.11}$$

2. Физическое тепло, вносимое с кислородом, кВт:

$$Q_{O2} = G_{O2} \cdot c_{O2} \cdot t_{O2} \quad , \tag{5.12}$$

где G_{O2} – расход кислорода на процесс окислительного пиролиза, кг/с;

 c_{O2} - средняя удельная теплоемкость кислорода, кДж/(кг°С);

 t_{O2} – температура кислорода на входе в зону пиролиза, °С.

3. Теплота химических реакций чистого пиролиза и окисления ТКО, кВт:

$$Q_{nup} = G_{TKO} \cdot q_{nup} , \qquad (5.13)$$

где *q_{пир}* – тепловой эффект пиролиза (см. главу 2), кДж/кг.

4. Тепло, переданное из камеры сгорания через стенку в зону пиролиза – Q_{cm} (расчет приведен в тепловом балансе камеры сгорания, ниже, в 5.24), кВт.

Расходные статьи теплового баланса зоны пиролиза.

1. Теплота, уходящая с пиролизным газом из зоны пиролиза в зону сушки и потребителю, кВт:

$$Q_{mup.cas} = G_{mup.cas} \cdot c_{mup.cas} \cdot t_{mup.cas} \quad , \tag{5.14}$$

где *с_{пир.газ}* – средняя удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°С);

 $t_{nup.ras}$ – температура пиролизного газа, °С.

2. Теплота, уходящая с золой из зоны пиролиза, кВт:

$$Q_{307} = G_{307} \cdot c_{307} \cdot t_{nup. \kappa o H}, \qquad (5.15)$$

где c_{300} – средняя удельная теплоемкость золы, кДж/кг°С;

 $t_{nup.кoh}$ – температура золы на выходе из зоны пиролиза, °С.

3. Теплота, необходимая на нагрев ТКО, пиролизного газа и золы в процессе пиролиза, кВт:

$$Q_{nup.TKO} = G_{TKO} \cdot c_{nup.TKO} \cdot (t_{nup.koh.} - t_{nup.hay.}) + + G_{nup.ras} \cdot c_{nup.ras} \cdot (t_{nup.koh.} - t_{nup.hay.}) + , \qquad (5.16) + G_{30\pi} \cdot c_{30\pi} \cdot (t_{nup.koh.} - t_{nup.hay.})$$

где $c_{nup, TKO}$ – средняя удельная теплоемкость ТКО, кДж/(кг°С);

 $t_{nup.koh}$ – температура окончания процесса пиролиза, °C;

 $t_{пир. нач.}$ – температура начала процесса пиролиза, °С.

4. Потери теплоты в окружающую среду в зоне пиролиза принимаем в количестве 5% от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (5.14) ÷ (5.16), кВт:

$$Q_{nom.nup} = 0.05 \cdot \left(Q_{nup.cas} + Q_{30n} + Q_{nup.TEO} \right), \tag{5.17}$$

Уравнение теплового баланса зоны пиролиза имеет вид:

$$Q_{TKO}^{s_{bLX}} + Q_{O2} + Q_{nup} + Q_{cm} = Q_{nup.ras} + Q_{307} + Q_{nup.TKO} + Q_{nom.nup}.$$
 (5.18)

5.2.3. Тепловой баланс камеры горения

В камеру горения поступают пиролизный газ ($G_{nup.ras}^{2op}$) после осушки и воздух (G_{so3d}) на горение. Образовавшиеся продукты горения (G_{III}) передают свою теплоту через стенку в зону пиролиза и удаляются в атмосферу. Схемы материального и теплового балансов камеры сгорания приведены на рис.5.6 и 5.7.



Рисунок – 5.6. Схема материальных потоков камеры горения.



Рисунок – 5.7. Схема тепловых потоков камеры горения.

Приходные статьи теплового баланса камеры горения.

1. Физическое тепло пиролизного газа, кВт:

$$Q_{nup.ras}^{rop} = G_{nup.ras}^{rop} \cdot c_{nup.ras} \cdot t_{nup.ras}^{rop}, \qquad (5.19)$$

где $G_{mup.ras}^{rop}$ – расход пиролизного газа на горение, определяемый расчетом, кДж/кг°С;

 $c_{nup.ras}$ – средняя удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°С); $t_{nup.ras}^{rop}$ – температура пиролизного газа, поступающего на горение, °С.

2. Физическое тепло воздуха, кВт:

$$Q_{\text{BO3d}} = G_{\text{BO3d}} \cdot c_{\text{BO3d}} \cdot t_{\text{BO3d}} , \qquad (5.20)$$

где *с*_{возд} – средняя удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг°С);

 t_{6030} – температура воздуха, °С;

 $G_{603\partial}$ – расход воздуха на горение, кг/с.

3. Химическая теплота топлива, кВт:

$$Q_x = G_{nup.cas}^{cop} \cdot Q_{\scriptscriptstyle H}^p , \qquad (5.21)$$

где Q_{μ}^{p} – теплота сгорания пиролизного газа, кДж/кг.

Расходные статьи теплового баланса камеры горения.

1.Потери тепла с уходящими газами, кВт:

$$Q_{\Pi\Gamma} = G_{\Pi\Gamma} \cdot c_{\Pi\Gamma} \cdot t_{\Pi\Gamma} , \qquad (5.22)$$

где *с*_{ПГ} – средняя удельная теплоемкость продуктов горения пиролизного газа, кДж/(кг°С);

 $t_{\Pi\Gamma}$ – температура продуктов горения, °C;

 $G_{\Pi\Gamma}$ – выход продуктов горения, кг/с.

2. Потери тепла в окружающую среду принимаем в количестве 5% от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (5.19) ÷ (5.22), кВт:

$$Q_{nom.cop} = 0,05 \cdot (Q_{nup.cas}^{cop} + Q_{6030} + Q_x + Q_{\Pi\Gamma}), \qquad (5.23)$$

3. Теплота, переданная из камеры горения через стенку в зону пиролиза, кВт:

$$Q_{cm} = Q_{nup.cas}^{cop} + Q_{6030} + Q_x - Q_{\Pi\Gamma} - Q_{nom.cop}.$$
 (5.24)

Уравнение теплового баланса камеры горения имеет вид:

$$Q_{nup.ras}^{rop} + Q_{6030} + Q_x = Q_{\Pi\Gamma} + Q_{cm} + Q_{nom.rop}$$
(5.25)

На рис.5.8 и 5.9 показаны схемы материальных и тепловых потоков по всей установке в целом.



Рисунок – 5.8. Схема материальных потоков установки.



Рисунок – 5.9 Схема тепловых потоков установки.

Для расчета термического КПД установки использована формула [90]:

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_{nom.TKO}}{Q_x + Q_{nup} + Q_{6030} + Q_{O2}} , \qquad (5.26)$$

где $\sum Q_{nom.TKO}$ – потери теплоты в процессе переработки ТКО, Вт:

$$\sum Q_{nom.TKO} = Q_{TIT} + Q_{307} + Q_{nup.ras.} + Q_{nap} + Q_{nom.cyu} + Q_{nom.nup} + Q_{nom.rop} .$$
(5.27)

На рис.5.10 представлена графическая зависимость КПД печи от влажности ТКО при различных режимах пиролиза.

103



Рисунок – 5.10 Зависимости КПД от влажности ТКО при различных режимах пиролиза: 1 – чистый пиролиз, 2, 3, 4 – окислительный пиролиз с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10% соответственно

Работа печи с максимальным КПД (рис.5.10) в режиме чистого пиролиза возможна в диапазоне изменения влажности сырья от 0 до 4% [98]. В диапазоне изменения влажности от 4 до 28% эффективен режим окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1%. С увеличением влажности от 28 до 43% максимальный КПД нетто имеет место при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 5%, а при влажности сырья от 43 до 50% - при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 5%, а при влажности сырья от 43 до 50% - при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в атмосфере 10%. При влажности свыше 50% наблюдается резкое снижение КПД, т.е. работа печи становится не эффективна.

5.3. Продолжительность сушки и расчет конструктивных параметров термореактора

По результатам экспериментальных исследований установлено, что значения времени пиролиза и времени сушки ТКО соизмеримы. Уравнение для определения продолжительности сушки (без учета равновесной влажности) имеет вид[57]:

$$\tau = \frac{U_H - U_{KP}}{N} + \frac{U_{KP}}{N} 2,3 \lg \frac{U_{KP}}{U_K},$$
(5.28)

где N – скорость сушки в первом периоде, (кг влаги /кг сухого вещества)/с;

 U_{H}, U_{KP}, U_{K} – начальная, первая критическая и конечная влажности ТКО, кг влаги/ кг сухого вещества.

Результаты расчета приведены на рис. 5.11.



Рисунок – 5.11. Время сушки в зависимости от начальной влажности: 1 – при температуре теплоносителя 240°C; 2 – при температуре теплоносителя 220°C; 3 – при температуре теплоносителя 200°C

Расчет конструктивных размеров термореактора.

1. Объем зоны сушки термического реактора:

$$V = \frac{Q_{3amp}}{\alpha_V \cdot \Delta t_{cp}}$$
(5.29)

Для расчета теплообмена в плотном фильтрующем слое введено понятие объемного суммарного коэффициента теплоотдачи α_v . Связь этого коэффициента с обычным коэффициентом теплоотдачи на поверхности α_F (значения приведены в главе 3) достаточно проста[65]:

$$\alpha_F = \alpha_V \cdot \frac{V_M}{F_M},\tag{5.30}$$

где V_M – объем слоя материала, м³;

 $F_{\scriptscriptstyle M}$ – суммарная поверхность кусков материала, м².

При проектировании объектов, в которых насыпная масса слоя неизвестна, можно с достаточной точностью считать, что поверхность неправильных кусков на 25% больше, чем для шаров того же диаметра:

$$\frac{V_M}{F_M} = \frac{d}{7.5 \cdot (1-i)} \quad , \tag{5.31}$$

где *d* – эквивалентный размер куска ТКО, м;

i – порозность слоя ТКО.

Определение среднелогарифмической температуры осуществляется по формулам:

$$\Delta t_{\tilde{o}} = t_{ex} - t_{\kappa}, \qquad (5.32)$$

$$\Delta t_{_{\mathcal{M}}} = t_{_{\mathcal{B}blx}} - t_{_{\mathcal{H}}} , \qquad (5.33)$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\left(\Delta t_{\delta} - \Delta t_{M}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{M}}\right)} , \qquad (5.34)$$

где t_{κ} – конечная температура нагрева ТКО, °С;

 $t_{\rm H}$ – начальная температура нагрева ТКО, °С;

 t_{ex} – начальная температура газа, °С;

*t*_{вых} – конечная температура газа ТКО, °С.

2. Диаметр установки определяется из уравнения массового расхода ТКО:

$$G_{\rho} = w \cdot F \cdot \rho , \qquad (5.35)$$

где *w* – скорость процесса пиролиза, м/с (глава 2);

F – площадь поперечного сечения шахты реактора, м²;

 ρ – плотность ТКО, кг/м³.

3. Высота зоны сушки рассчитывается как:

$$L = \frac{V}{0.785 \cdot D^2} \ . \tag{5.36}$$

4.Объем камеры горения определяется из соотношения:

$$V_T = \frac{B \cdot Q_{\mu}^p}{q_V} \quad , \tag{5.37}$$

где B – расход пиролизного газа на горение, м³/с;

 q_V – тепловая напряженность топочного объема, кВт/м³, принимается в диапазоне 400 ÷ 600[45].

Габаритные размеры установки приведены на рис. 5.12.



Рисунок – 5.12 Габаритные размеры реактора
5.4. Расчет капиталовложений и сроков окупаемости установки на основе пиролиза твердых коммунальных отходов

Оценка экономической эффективности и срока окупаемости предлагаемого мероприятия производилась в ценах 2016 года. Расчеты выполнены на примере установки с производительностью по переработке ТКО 500 кг/час и их начальной влажностью 25%.

Экономическая эффективность предлагаемого решения основывается на определении структуры и величины доходов и расходов:

- Определение величины капитальных затрат на создание установки;
- Определение величины эксплуатационных затрат на обслуживание установки;
- Определение величины источников дохода от работы установки;
- Расчет показателей экономической эффективности инвестиционного проекта.

Суммарные капитальные затраты на создание установки включают: стоимость технологического и вспомогательного оборудования (с учетом доставки, монтажа); стоимость контрольно-измерительных приборов и средств автоматики.

Ориентировочно стоимость всего оборудования комплекса $K_{o \delta o p}$. представлена в табл. 5.1.

ruomių etromioerb ocopydobumini.		
Наименование оборудования	Стоимость, руб.	
Термореактор	700 000	
Вентилятор	20 000	
Дымосос	30 000	
Компрессор	50 000	
Конденсатосборник	20 000	
ИТОГО	820 000	

Таблица 5.1 С	Стоимость оборудования.
---------------	-------------------------

Капитальные затраты на сооружение данного комплекса определяются по укрупненным показателям сметной стоимости:

$$K_{\text{samp}} = K_{\text{ofop.}} + K_{\text{sd}} + K_{\text{asm}}, \qquad (5.38)$$

где K_{30} – капитальные затраты на строительство зданий и сооружений (принимаются как 35% от стоимости всего оборудования), руб;

*К*_{авт} – капитальные затраты на средства контроля и автоматизации комплекса (принимаются как 5% от всего оборудования), руб.

Суммарные затраты на эксплуатацию и обслуживание включают: фонд оплаты труда обслуживающего персонала; стоимость закупаемой электрической энергии; амортизационные отчисления на полное восстановление (реновацию) основных средств утилизационных установок; расходы на текущие ремонты основного и вспомогательного оборудования.

$$U_{\text{KOMINI}} = K_{3\Pi} + U_{e} + U_{a} + U_{p}.$$
(5.39)

Фонд оплаты труда рассчитывается исходя из численности обслуживающего персонала. Работа машинистов организуется по двухсменному четырехбригадному графику, поэтому для таких работников необходимо предусмотреть резерв, который учитывается при расчете списочного состава. Для рабочих списочный состав определяется по формуле

$$R_{cn} = \frac{R_{_{\mathcal{R}B}}}{k_{_{UDB}}},\tag{5.40}$$

k_{ирв} – плановый коэффициент использования рабочего времени в зависимости от режима работы.

Рабочие непрерывных производств с нормальными условиями труда имеют так же, как и все, нормативную 40-часовую рабочую неделю, но при двухсменном четырехбригадном графике должны находиться на рабочем месте больше времени, чем работники с односменным режимом работы.

Поэтому коэффициент использования рабочего времени для данных работников отличается от k_{ups} для инженерно-технических работников и определяется по формуле:

$$k_{upe} = \frac{n_{nn}}{n}, \qquad (5.41)$$

где *n*_{n1} – планируемый к отработке годовой фонд рабочего времени, ч;

n – фактически необходимое для обслуживания оборудования время за год, ч;

$$n_{nn} = 720 - \sum n_{nom} \,, \tag{5.42}$$

где $\sum n_{nom}$ – планируемые потери рабочего времени: основной и дополнительные отпуска, отвлечение на выполнение важных и государственных обязанностей, болезни.

Явочное число рабочих с учетом графика выхода на работу определяется как:

$$R_{_{\mathcal{B}\mathcal{G}}} = n \cdot N_{_{\mathcal{D}\mathcal{D}\mathcal{U}\mathcal{C}\mathcal{A}\mathcal{O}}},\tag{5.43}$$

где *п* – число единиц оборудования,

N_{бригад} – количество бригад.

Годовой фонд оплаты труда рассчитывается как:

$$\sum 3\Pi = 3\Pi_{cp} \cdot R_{cn} \cdot 12 + страховые взносы$$
(5.44)

где 3П – годовой фонд оплаты труда, руб/год,

ЗП_{ср} – средняя заработная плата одного рабочего, руб/мес,

*R*_{cn} – количество работников установки.

Отчисления в социальные фонды, тыс. руб/год:

$$H_{cou} = 0, 3 \cdot 3\Pi \tag{5.45}$$

Сумма амортизационных отчислений по какому-либо элементу основных фондов определяется путем умножения балансовой стоимости элемента на соответствующую норму амортизации.

Годовая сумма амортизации по зданиям и сооружениям составит, руб/год:

$$H_a^{_{3\partial}} = K_{_{3\partial}} \cdot \frac{a_{_{3\partial}}}{100} , \qquad (5.46)$$

где *К*_{зд} – балансовая стоимость здания;

 $a_{_{3\partial}}$ – норма амортизации по данному типу здания, %.

Годовая сумма амортизации по основному и вспомогательному оборудованию, руб/год:

$$\mathcal{U}_{a}^{obop} = K_{obop} \cdot \frac{a_{obop}}{100} , \qquad (5.47)$$

где K_{ofop} – балансовая стоимость оборудования,

*а*_{обор} – норма амортизации оборудования, %.

Годовая сумма амортизации по КИП и автоматике, руб/год:

$$U_a^{a_{6m}} = K_{a_{6m}} \cdot \frac{a_{a_{6m}}}{100}, \qquad (5.48)$$

где *К*_{авт} – балансовая стоимость КИП и автоматики,

*а*_{авт} – норма амортизации КИП и автоматики, %.

Текущие и капитальные ремонты финансируются из единого ремонтного фонда предприятия. Стоимость ремонтов составляет 200% от амортизации.

Годовые затраты на текущие ремонты составляют, руб/год:

$$M_{m.p.} = 2 \cdot M_a, \tag{5.49}$$

Вспомогательное оборудование, используемое в схеме (вентилятор, насос) в процессе работы потребляет определенное количество электроэнергии. Так как в предложенной схеме отсутствует оборудование, которое могло бы обеспечить внутренние потребности установки в электроэнергии, ее необходимо закупать со стороны.

Тарифная ставка складывается из цены на электроэнергию и надбавки, которая рассчитывается по формуле:

$$C_{\mathfrak{g}} = \mathcal{A}\Pi \cdot \mathcal{K}_{pee} \cdot \mathcal{U}_{\mathfrak{g}} \quad , \tag{5.50}$$

где C_{2} – цена 1 кВт ч для промышленных потребителей,

ДП – доходность продаж, для потребителей с мощностью,%

*Ц*_э-цена электроэнергии, на второе полугодие 2016 года, кВт ч.

Таким образом, годовые затраты на электроэнергию составят:

$$M_{\mathfrak{g}} = W_{\mathcal{C},\mathcal{H}} \cdot C_{\mathfrak{g}} \quad , \tag{5.51}$$

где W_{ch} – количество электроэнергии, потребленное на собственные нужды.

Работа установки предполагает не только переработку ТКО, но так же и получение дохода. Определим доходные статьи работы установки:

- получение дохода от продажи избытка получаемого термогаза;
- сокращение экологических платежей за счет предотвращения экологического ущерба.

В результате работы установки образуется термогаз – среднекалорийное топливо. Частично термогаз используется для поддержания процессов термического разложения массы ТКО. Неиспользуемая часть термогаза с помощью тягодутьевого оборудования подается в газгольдер и может в дальнейшем быть продана стороннему потребителю на различные нужды.

По экологическим соображениям, производимый установкой термогаз целесообразно использовать на нужды отопления жилых и производственных помещений. Для расчета принимаем стоимость 1 ед. продаваемого термогаза равной половине стоимости замещаемого природного газа $C_{\epsilon} = 4,76$ руб/м³ (тарифная стоимость природного газа ОАО «Газпром» для Ивановской области).

В результате теплового расчета было получено, что термореактор вырабатывает для потребителя 250 м³/ч с калорийностью 13,8 МДж/м³. Учитывая непрерывность работы реактора, рассчитаем количество термогаза, произведенного в течение года:

$$V_{200} = V_{4ac} \cdot 8760$$
 . (5.52)

Рассчитаем стоимость произведенного термогаза:

$$\underline{U}_{2} = V_{200} \cdot C_{2} \quad . \tag{5.53}$$

Величину предотвращенного экологического ущерба будем определять согласно «временной методике определения предотвращенного экологического ущерба», утвержденной председателем государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И. Даниловым - Данильяном 9 марта 1999 г.

Основным видом загрязнения, поступающего в окружающую среду при полигонном хранении ТКО, является поступление в атмосферу вредных веществ,

выделяющихся вследствие естественных процессов, протекающих в насыпной массе ТКО (например, гниение).

Для вычисления количества вредных веществ, не поступивших в атмосферу, воспользуемся показателями удельного выхода веществ при размещении одной тонны ТКО на полигоне. Исследования, проведенные в этой области, позволили рассчитать, что в среднем, одна тонна ТКО за год выделяет следующее количество загрязнителей (табл.5.3)[60]:

Компонент	$P_{y\partial.i}$ кг/т отходов в год	
Метан	6,929260	
Толуол	0,094677	
Аммиак	0,069797	
Ксилол	0,058011	
Углерода оксид	0,033000	
Формальдегид	0,012571	
Этилбензол	0,012440	
Ангидрид сернистый	0,009167	
Сероводород	0,003405	

Таблица 5.3. Удельный выход вредных веществ

Количество каждого компонента, не поступившего в атмосферу, рассчитывается по формуле:

$$P_{i} = P_{vo,i} \cdot G_{vcm} \cdot 10^{-3}, \qquad (5.54)$$

где P_i – выход каждого компонента, т/год;

G_{уст} – производительность установки, т/год.

Проведенные исследования показывают, что средняя годовая производительность термореактора составляет $G_{vcm} = 4380$ т/год.

Согласно методике определения предотвращенного экологического ущерба, расчетная формула для оценки предотвращенного ущерба имеет вид:

$$Y_{np} = Y_{y\partial} \cdot \sum M \cdot K_{\gamma} , \qquad (5.55)$$

где Y_{np} – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников в рассматриваемом регионе в течение отчетного периода, тыс. руб.;

 K_{2} – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий в составе экономических районов России, K_{2} =1,9;

 Y_{yo} – показатель удельного ущерба атмосферному воздуху, наносимого выбросом единицы приведенной массы загрязняющих веществ на конец отчетного периода времени для рассматриваемого экономического района РФ, руб./усл.т, Y_{yo} = 57,3 руб/усл.т;

 $\sum M$ – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов, не поступивших в атмосферный воздух.

Приведенная масса выбросов рассчитывается по формуле:

$$\sum M = \sum P_i \cdot K_{\scriptscriptstyle 9,i}, \qquad (5.56)$$

где $K_{3,i}$ – коэффициент относительной эколого-экономической опасности для ⁱ -го загрязняющего вещества или группы веществ.

Таким образом, суммарный доход (руб/год) можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{I}_{cymm} = \mathcal{I}_{c} + \mathcal{I}_{3} + \mathcal{V}_{np} \tag{5.57}$$

Величину ежегодных денежных поступлений рассчитаем по формуле:

$$\Pi = \Pi_{c_{VMM}} - U_{KOMNN}, \qquad (5.58)$$

Конечное значение ежегодных денежных поступлений определится по формуле:

$$\mathcal{A}\Pi = \Pi \cdot (1 - H) + \mathcal{U}_a, \tag{5.59}$$

где *Н* – норма налога на прибыль.

Расчет простого срока окупаемости мероприятия проводится по формуле:

$$PP = \frac{I_0}{CF_t} , \qquad (5.60)$$

где РР – период окупаемости, лет;

 I_0 – первоначальные инвестиции;

 CF_t – чистые денежные поступления от реализации инвестиционного проекта в году *t*.

Дисконтированный срок окупаемости мероприятия находится из равенства:

$$\sum_{t=1}^{\tau_d} \frac{\prod}{(1+\frac{R}{100})^t} = CF_t \quad . \tag{5.61}$$

Для определения дисконтированного срока окупаемости мероприятия изобразим график изменения дисконтированных денежных поступлений от реализации проекта по годам (рис.5.13):



Рисунок – 5.13. График дисконтированных денежных поступлений по годам

Дисконтированный срок окупаемости мероприятия составляет 2,3 года. Чистый дисконтированный доход (ЧДД), или чистую приведенную стоимость NPV определяется по формуле 5.62.

$$\mathcal{H}_{III} = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+R)^t} - I_0$$
(5.62)

Срок службы оборудования - 10 лет.

Индекс прибыльности мероприятия рассчитывается как:

$$PI = \left[\sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+R)^t}\right] / I_0 .$$
 (5.63)

Внутренняя норма доходности мероприятия находится путем решения уравнения:

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{CF_{t}}{(1 + BH \square)^{t}} - I_{0} = 0 .$$
(5.64)

Полученные результаты расчета основных показателей экономической эффективности сведены в табл. 5.4.

Показатель Значение		Критерий эффек-
		тивности
Простой срок окупаемости	1,9 года	РР<7-10 лет
Дисконтированный срок окупаемости	2,3 года	РР<7-10 лет
Чистый дисконтированный доход	4683000 руб.	ЧДД>0
Индекс прибыльности	3,07	PI>1
Внутренняя норма доходности	55.2 %	ВНД>нормы
		дисконта(R)

Таблица 5.4. Показатели экономической эффективности.

5.5. Выводы по пятой главе

1. Выполнен расчет основных конструктивных элементов установки при заданной производительности.

2. Определен выход пиролизного газа в зависимости от его калорийности и начальной влажности ТКО.

3. Получены зависимости КПД печи от влажности исходного сырья и содержания кислорода в атмосфере, на основании которых предложены эффективные режимы ее работы.

4. Рассчитаны показатели экономической эффективности установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен термический анализ смеси ТКО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1%, 5% и 10%, в результате которого определены состав и объемы газов, получаемых при окислительном пиролизе, максимальная скорость убыли массы, температура пиков тепловыделения и величины тепловых эффектов.

2. Экспериментально определены эффективные коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и массопроводности смеси ТКО среднего морфологического состава с учетом влажности сырья, температуры и порозности слоя в процессе его сушки.

3. Получены критериальные уравнения, позволяющие определить коэффициенты тепло- и массоотдачи, влияющие на процесс конвективной сушки слоя ТКО среднего морфологического состава.

4. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения внутреннего источника (стока) теплоты, образующегося в процессе сушки и структурной деформации (усадки) многокомпонентного слоя ТКО среднего морфологического состава.

5. Получены данные по выходу пиролизного газа и КПД установки для утилизации ТКО в зависимости от влажности исходного сырья и содержания кислорода в атмосфере.

6. Результаты экспериментальных исследований эффективных теплофизических свойств, термогравиметрических характеристик ТКО и продуктов их термической конверсии внедрены на производстве ООО «НТИЦ Экосервис Прим» г. Москва при разработке пилотного образца установки термического обезвреживания отходов.

7. Предложена конструкция термического реактора для переработки ТКО с получением газообразного топлива и рациональные режимы работы установки.

8. Результаты работы могут быть использованы для расчета конструктивных характеристик зоны сушки термического реактора с учетом усадки многокомпонентного слоя ТКО среднего морфологического состава.

Список условных обозначений

- *U* влагосодержание, кг/кг;
- a коэффициент температуропроводности, м²/с;
- λ коэффициент теплопроводности, Bt/(м·K);
- с удельная теплоемкость, Дж/(кг°С);
- k коэффициент массопроводности, м²/с;
- α коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);
- β коэффициент массоотдачи, м/с (кг/м²с);
- ρ плотность, кг/м³;
- W относительная влажность, %;
- T_{M} температура материала, °C;
- T_{2} температура газа, °С;
- f порозность;
- *г* удельная теплота парообразования, кДж/кг;
- *т* время, сек (мин)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Алексеев, Г.М. Индустриальные методы санитарной очистки городов (Термическая переработка бытовых отходов и использование продуктов пиролиза)/ Г.М. Алексеев, В.Н. Петров, П.В. Шпильфогель. – Л.:Стройиздат, 1983. – 96 с.

 Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М., Машиностроение. 1988. – 280 с.

Альтшуллер, В.С. Новые процессы газификации твердого топлива / В.С. Альтшуллер. – М.: Недра, 1976. – 280 с.

4. Ансеров, Ю.Д. Машиностроение и охрана окружающей среды / Ю.Д. Ансеров, В.Д. Дурнев. – Л.: Машиностроение, 1979. – 322 с.

 Армишева, Г.Т. Обращение с отходами полимерных упаковочных материалов / Г.Т. Армишева // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2011. – № 4. – С. 64 –77.

6. Бабаш, С.Е. Влияние состава сырья на распределение продуктов пиролиза / С.Е. Бабаш. – М.: МИТХТ, 1971. –186 с.

7. Безмозгин, Э.С. Опыт сбора, транспортировки, переработки и уничтожения бытовых и промышленных отходов и охрана окружающей среды / Э.С. Безмозгин, В.Н. Петров. – Л.: ЛДНТП, 1976. – С. 8–11.

 Безмозгин, Э.С. Жилищное и коммунальное хозяйство / Э.С. Безмозгин. – М.: 1978, №11., С. 25–26.

Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности: в 2 ч. / Н.М. Беляев,
 А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. – 328 с.

10. Беньямовский, Д.Н. Термические методы обезвреживания твердых бытовых отходов / Д.Н. Беньямовский. – М.: Стройиздат, 1979. – 192 с.

11. Беньямовский, Д.Н. Методы расчета горения мусора с использованием топливных параметров / Д.Н. Беньямовский, Р.С. Виллевальд // Водоснабжение и санитарная техника. – 1972. – №11. – С. 23-27.

12. Бровкин, Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах / Л.А. Бровкин. – Иваново: ИЭИ, 1973. – 364 с.

13. Бровкин, Л.А. Решение задач теплопроводности дискретным удовлетворением граничных условий / Л.А. Бровкин, Л.С. Крылова // Сб. Вопросы тепломассообмена в промышленных установках. – Иваново: ИЭИ, 1971. – С. 51.

 Броунштейн, Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Б. И. Броунштейн, Г. А. Фишбейн. – Л.: Химия, 1977. – 280 с.

Брюханов, О. Н. Тепломассообмен / О.Н. Брюханов, С.Н. Шевченко. –
 М.: АСВ, 2005. – 192 с.

Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л.
 Васильев, С.А. Танаева. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.

17. Виллевальд, Р.С. Проектирование и эксплуатация мусоросжигательных заводов / Р.С. Виллевальд, Д.Н. Беньямовский. – М.: Стройиздат, 1982. – 52 с.

18. Высочинин, В.И. Диоксины и родственные соединения / В.И. Высочинин // Аналитический обзор. – Новосибирск: ГПНТБ СО СССР, 1989. – 153 с.

19. Габитов, Р.Н. Экспериментальное определение теплофизических характеристик твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский // Промышленная энергетика. – 2016. – №7. – С.54 – 58.

20. Габитов, Р.Н. Исследование процессов нагрева и сушки слоя органосодержащих отходов в термическом реакторе / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, О.В. Самышина, О.И. Горинов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – №6. – С.17 – 21.

21. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.

22. Гнеденко, В.Г. Плазмохимическая переработка бытовых отходов в
 России / В.Г. Гнеденко, И.В. Горячев // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 10.
 – С. 25–29.

23. Горинов, О.И. Определение температурного поля в пористом теле с подвижной границей зоны пиролиза с учетом фильтрации газов / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Промышленная энергетика. – 2012. – №10. – С.35 – 36.

24. Горинов, О.И. Метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. – 2013. – №6. – С.16 – 19.

25. Грачёв, А.Н. Пиролиз отходов деревообрабатывающих предприятий /
А.Н. Грачёв, Р.Г. Сафин, И.А. Валеев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. –
2006. – Т.49. – №10. – С.104 – 109.

26. Гудзюк, В.Л. Сжигание топлива с минимальными вредными выбросами / В.Л. Гудзюк, А.П. Платонов, В.И. Бахирев. Таллин, 1974. – С. 83–87.

27. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М.: Высш. шк., 1973. – 296 с.

 Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия. 1974. – 264 с.

Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах/ Г.Н. Дульнев, В.Н. Новиков // – Л.: Энергоатомиздат, 1991. –248 с.

30. Ильина, С.А. Экспериментальное определение коэффициента температуропроводности овощей / С.А. Ильина, В.М. Фокин // Вестник АГТУ. – 2006. – №2. – С. 187–190.

31. Ильиных, Г.В. Методическое обеспечение экспериментальных исследований морфологического состава твердых бытовых отходов / Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 52 – 55.

32. Ильиных, Г.В. Обоснование замены углеводородных энергоносителей продуктами переработки твердых бытовых отходов / Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 11. – С. 24 – 29.

33. Ильиных, Г.В. Использование результатов определения морфологического состава твердых бытовых отходов для обоснования системы обращения с отходами / Г.В. Ильиных // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2012. – №1. – С.35 – 42. 34. Исмагилов, З.Р. Синтез катализатора конверсии органического сырья для когенерационных устройств / З.Р. Исмагилов, С.Р. Хайрулин, А.В. Неведров, А.В. Папин, Е.В. Жбырь // Вестник КузГТУ. – 2013. – №1. – С.87-92.

35. Кадыров, Д. Э. Методы переработки органических отходов / Д.Э. Кадыров // ТБО. Твердые бытовые отходы. – 2006. – № 10(4). – С. 24 – 26.

36. Калечиц, И.В. Влияние состава сырья на выход основных продуктов пиролиза / И.В. Калечиц, Н.В. Сокова, С.Е. Бабаш // Обзор ЦНИИТЭнефтехим, М., 1971 – 23 с.

37. Колибаба, О.Б. Математическое моделирование тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, Т.В. Муратова // Вестник ИГЭУ. – 2016. – №. 6. – С. 43-48.

38. Колибаба, О.Б. Исследование сушки слоя твердых бытовых отходов в процессе термической переработки / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, А.И. Сокольский // Вестник ЧГУ, Череповец.: ЧГУ. – 2015. – №. 3. – С. 21–25.

39. Колибаба, О.Б. Определение теплофизических свойств слоя твердых органических отходов для расчетов термических реакторов / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, О.И. Горинов // Промышленная энергетика. – 2015. – №4. – С.57 – 62.

40. Колибаба, О.Б. Расчет термических реакторов по переработке твердых бытовых отходов: учебное пособие / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов. – М.: Руспринт. – 2016. – 88с.

41. Колибаба, О.Б. Исследование влияния влажности на температурный режим переработки твердых бытовых отходов, содержащих текстиль, термическими методами / О.Б. Колибаба, В.А. Горбунов, О.И. Горинов, О.В. Самышина, Р.Н. Габитов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №2(362). – С. 192–195.

42. Колибаба, О.Б. Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 3. – С. 14-19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014

43. Колибаба, О.Б. Фрактальная модель слоя твердых бытовых отходов при его переработке в термическом реакторе / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, И.А. Скворцов, Т.В. Муратова // Вестник ИГЭУ. – 2015. – №. 5. – С. 32-37.

44. Кремнева, Е.В. Исследование процесса термоокислительного пиролиза биомассы в плотном слое / Е.В. Кремнева, М.В. Губинский, Ю.В. Шишко, Г.Л. Шевченко, А.Ю. Усенко // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: Пороги, 2007. – С. 283 – 291.

45. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М.: Инлит.,1961. – 538 с.

46. Крылова, О.Б. Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Крылова Ольга Борисовна. – Ленинград, 1988. – 16 с.

47. Кузнецов, Г.В. Зависимость состава продуктов пиролиза древесной биомассы от режима теплового воздействия / Г.В. Кузнецов, М. Полсонгкрам // Научно-технический вестник Поволжья. –2011. –№ 1. – С.125–129.

48. Куцый, Д.В. Физико-механические свойства отходов в теле полигона ТБО/ Д.В. Куцый, Ю.Б. Матвеев // Твердые бытовые отходы. – 2013. – № 10 (88). – С.14–19.

49. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 430с.

50. Майков, И.А. Исследование термического распада органического сырья растительного происхождения / И.А. Майков, В.А. Синельщиков, А.В. Федюхин // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: МЭИ, 2010. – Т. 3. – С. 262 – 264.

51. Максимова, С.В. Методика определения объема и скорости образования метана на санитарных полигонах захоронения твердых бытовых отходов / С.В. Максимова, И.С. Глушанкова // Геоэкология. – 2004. – №5. – С.433–438. 52. Максименко, Ю.А. Термодинамика внутреннего массопереноса при взаимодействии плодоовощных продуктов с водой / Ю.А. Максименко //Вестник АГТУ. –2012. – №1. – С.41 – 45.

53. Манохин, В.Я. Нормы накопления ТБО, их состав и свойства / В.Я. Манохин, И.А. Иванова, М.В. Манохин // Научный вестник воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: высокие технологии. Экология. – 2013. – №1. – С.21 – 27.

54. Мухина, Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья в присутствии катализатора / Т.Н. Мухина, С.П. Черных, А.Д. Беренц // М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. – 72 с.

55. Мухина Т.Н. Пиролиз углеводородного сырья / Т.Н. Мухина, Н.Л. Барабанов – М.: Химия, 1987. - 240 с.

56. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ./ под ред. Чигир Н.А.// М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.

57. Остриков, А.Н. О теплофизических свойствах поликомпонентного овощного пюре / А.Н. Остриков, А.В. Трушечкин // Новые технологии. – 2011. – №4. – С.70 – 77.

58. Павлов, И.О. Анализ результатов математического моделирования тепломассообмена в процессе сушки / И.О. Павлов, Е.В. Воронова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – №4(36). – С.137 – 141.

59. Пальгунов, П.П. Утилизация промышленных отходов/ П.П. Пальгунов, М.В. Сумароков – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.

60. Переработка твердых бытовых отходов методом пиролиза. Обз. информ. – М.: ЦНИИТЭИМС, 1983. – 40 с.

61. Рудобашта, С.П., Очнев Э.Н., Плановский А.Н. Зональный метод расчета кинетики процесса сушки / С.П. Рудобашта, Э.Н. Очнев, А.Н. Плановский // Теоретические основы химической технологии. – 1975. –Т. 9. – № 2. – С.185.

62. Рудобашта, С.П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С.П. Рудобашта //Инженерно-физический Журнал. – 2010. – Т. 83. – № 4. – С.705–714. 63. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

64. Рудобашта, С.П. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики / С.П. Рудобашта, М.К. Кошелева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6 (360). – С.175–180.

65. Рудобашта, С.П. Теплотехника /С.П. Рудобашта. – М.: "Ассоциация "Агрообразование", 2010. – 598 с.

66. Рудобашта С.П., Моряков А.В., Дмитриев В.М. Массопроводность семян рапса при сушке / С.П. Рудобашта, А.В. Моряков, В.М. Дмитриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 42–46.

67. Самойлов, А.С. Исследовать процесс термического разложения углей подмосковного и экибастузского бассейнов с целью определения оптимальных режимов переработки для двухступенчатого сжигания / А.С. Самойлов, Н.И. Бердова, В.Ф. Корнильева // Научный отчет № 75, ЭНИН, М. – 1989.

68. Самойлов А.С., Курочкин А.И., Пулькина М.К. Кинетические особенности пиролиза тяжелого нефтяного сырья / А.С. Самойлов, А.И. Курочкин, М.К. Пулькина // Химия твердого топлива. –1980. – № 6.– С. 122–127.

69. Сафин, Р.Р. Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев, Р.Г. Сафин
// Вестник МГУЛ - Лесной вестник: Журнал. – 2005. – №2. – С.168 –173.

70. Сафин, Р.Р. Установка для термической переработки отходов древесины / Р.Р. Сафин, И.А. Валеев, М.А. Таймаров, К.Х. Гильфанов, Е.Ю. Разумов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. –№6. – С.95 –100.

71. Сафин, Р.Г. Математическая модель тепломассообменных процессов, протекающих при переработке древесных отходов / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, Д.А. Ахметова, А.В. Сафина, А.Р. Хабибуллина // Вестник Казанского государственного технологического университета. –2015. – Т18. – №3. – С.161-163. 72. Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин М.: Химия, 1984. – 320 с.

73. Систер, В. Г. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание) / В.Г. Систер, А.Н. Мирный, Л.С. Скворцов, Н.Ф. Абрамов, Х.Н. Никогосов. – М: АКХ им. К.Д. Панфилова, 2001. – 320 с.

74. Систер, В. Г. Выбор технологий обезвреживания отходов с учетом их состава и свойств / В.Г. Систер, А.Н. Мирный // Твердые бытовые отходы. – 2009.
 – № 1. – С.16–21.

75. Слюсарь, Н.Н. Изучение фракционного и морфологического состава отходов старых свалок и полигонов / Н.Н. Слюсарь, Ю.М. Загорская, Г.В. Ильиных // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – №3. – С.77 – 85.

76. Сокольский, А.И. Тепломассообмен в потоке газовзвеси / А.И. Сокольский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т.11. –№3. – С.696–699.

77. Сокольский, А.И. Исследование теплофизических свойств золокерамических смесей / А.И. Сокольский, А.В. Козлов, С.В. Федосов // Ученые записки инженерно - технологического факультетата ИГАСА. –1999. вып.2. – С.121–123.

78. Спейшер, В.А. Обезвреживание промышленных выбросов дожиганием / В.А. Спейшер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –168 с.

79. Тимербаев, Н. Ф. Технология переработки древесных отходов в диметиловый эфир / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Л. М. Исмагилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. –№7.– С.95–97.

80. Термическая утилизация твердых бытовых отходов. Концепция НИИСтромкомпозит. Красноярск: 2006. – 15 с.

81. Трейман, М.Г. Полиэтилен как отход: химические свойства, состав, способы переработки и утилизации / М.Г. Трейман // Молодой ученый. – 2010.
 №1-2-1. – С.144–146.

82. Федоров, Л.А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы / Л.А. Федоров. – М.: Наука, 1993. – 266 с. 83. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов /Монография. Иваново, ИПК «Пресс-СТО», 2010. – 363 с.

84. Хабибуллина, А.Р. Конвективная сушка древесных отходов перед стадией пиролиза / А.Р. Хабибуллина, З.Г. Саттарова, М.Н. Суходова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова. –2015. – С. 328–330.

85. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах/ Н.В. Чураев. – М.: Химия, 1990. – 272 с.

86. Шантарин, В.Д. Пиролизная утилизация твердых бытовых отходов /
В.Д. Шантарин, И.О. Коровин // Монография. – Тюмень: Издательско-полиграфический комплекс ТюмГСХА. – 2005. – 139 с.

87. Шипилов, В.М. Планирование теплофизического эксперимента /
В.М. Шипилов, Е.Н. Гнездов // Иваново: ИВГУ, 1981. – 76 с.

88. Шишкин, Ю. Л. Окислительный пиролиз как метод структурногруппового анализа органического вещества и его применение для оценки углеводородного, газового и коксового генерационных потенциалов осадочных пород и пиролизного сырья / Ю. Л. Шишкин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2009. – №6. – С.16–28.

89. Шубов, Л.Я. Термические процессы в технологиях переработки твердых бытовых отходов: аналитическая оценка и практические рекомендации / Л.Я. Шубов, Л.Г. Федоров, Р.В. Залепухин, В.Ф. Кроткова // ВИНИТИ, Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. –1998. – № 5. – С. 33–97.

90. Шубов, Л.Я. Технологии отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, Д.В. Шехирев // ГОУВПО «МГУС». – М., 2006. – 410 с.

91. Уэндландт, У. Термические методы анализа/ У. Уэндландт. – М.: Мир, 1978. – 527 с.

92. Aboulkas, A. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene / A. Aboulkas, K. El Harfi, A. El Bouadil // Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. Energy Conv. Management. – 2010. –V. 51. – Issue 7.

93. ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. – ANSYS, Inc. November 2013. – 2692 p.

94. Antal, M.J. Cellulose pyrolysis kinetics: The current state of knowledge /
M.J. Antal, G. Vgrhegyi // Ind. Eng. Chem. Res. 34. –1995. – P.703–717.

95. Babu, B.V. Parametric study of thermal and thermodynamic properties on pyrolysis of biomass in thermally thick regime/ B.V. Babu, A.S. Chaurasia // Energy Conversion and Management. $-2004. - N \cdot 45(1). - P. 53-72.$

96. Babu, B.V. Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum / B.V. Babu, A.S. Chaurasia // Energy Conversion and Management. $-2004. - N_{2}45$ (9–10). -P. 1297–1327.

97. Basu, P. Modeling of pyrolysis and gasification in fluidized beds / P. Basu,
P. Kaushal // Chemical product and Process Modeling. – 2009. – Vol. 4. – Iss.1.Art. 21.

98. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory /
P. Basu // Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA. – 2010. –365 p.

 Brammer, J.G. Drying technologies for an integrated gasification bioenergy plant / J.G. Brammer, A.V. Bridgwater // Renewable and Sustainable Energy Reviews
 3. –1999. – P. 243–289.

100. Bukhmirov, V.V. Experimental research of municipal solid waste drying in the process of thermal processing / V.V. Bukhmirov, O. B. Kolibaba, R.N. Gabitov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing. – $2015. - N \ge 93. - P.1 - 5.$

101. Kozlov, A.N. Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion / A.N. Kozlov, D.A. Svishchev, I.G. Donskoi, A.V. Keiko // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2012. – Vol. 109, No. 3. – P. 1311–1317.

102. Open database of mass spectra of NIST: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <u>http://webbook.nist.gov/</u>

103. Sherwin, E.T. Solid wastes resource recovery: Technology assessment / E.T. Sherwin, P.E. Nollet //Mechanical Engineering № 5, USA. –1980. – P. 26–35.

104. Some thoughts on industrial waste. – Waste Management № 3, England, 1983. – P. 104–110.

105. Wronski, S. Przyklady obliczen z terodynamiki I kinetuki procesow inzynierii chemicznej/ S. Wronski, R. Pohorecki, S. Siwinski // Warszawa, – 1979. – 360 p.

106. Патент РФ №2433344 Установка для термического разложения не сортированных твердых бытовых отходов/ Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горинов О.И., Горбунов В.А. Опубл.: 10.11.2011, Бюл. №31

107. Патент РФ №2254518 Способ обработки твердых бытовых отходов/ Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горинов О.И., Горбунов В.А. Опубл.: 20.12.2011, Бюл. №35

108. Патент РФ № 2525558 Способ порционной термической переработки несортированных твердых бытовых отходов на полигоне /Горинов О.И., Долинин Д.А., Семин Е.С., Самышина О.В., Габитов Р.Н., Колибаба О.Б., Горинов П.О. Опубл.: 20.08.2014, Бюл. №23

109. Патент РФ №2536896 Переносная установка для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне/ Горинов О.И., Долинин Д.А., Семин Е.С., Самышина О.В., Габитов Р.Н., Колибаба О.Б., Горинов П.О. Опубл.:27.12.2014, Бюл. №36.

110. Патент РФ №2617230 Переносная установка – модуль для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне/ Горинов О.И., Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Габитов Р.Н., Самышина О.В., Скворцов И.А. Опубл.:07.03.2017, Бюл. №7.

111. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/gosdoklad-eco-2015.

112. Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления", отдельные законодательные акты Российской

Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации" от 29.12.2014 N 458-ФЗ (последняя редакция от 28.12.16) официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_ LAW_172948/

113. Gabitov, R.N. Experimental determination of thermal characteristics of municipal solid waste / R.N. Gabitov, V.V. Bukhmirov, O. B. Kolibaba // "Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, (HMTTSC 2016). – 2016. – $N_{2}72$. – P.1 – 5. DOI: 10.1051/matecconf/20167201047

114. Gabitov, R.N. Experimental study of thermal processing of solid waste / R.N. Gabitov, O. B. Kolibaba // "Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, (HMTTSC 2017). – 2017. – $N_{\rm P}110. - P.1 - 7.$ DOI: 10.1051/matecconf/201711001028

приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Результаты термогравиметрического анализа смеси ТКО и ее компонентов



Рисунок П1.1 – Результаты термогравиметрического анализа хлопковой ткани при содержании O₂ =1%



Рисунок П1.2 – Результаты термогравиметрического анализа хлопковой ткани при содержании О₂ =10%



Рисунок П1.3 – Результаты термогравиметрического анализа полимерной пленки при содержании O₂ =1%



Рисунок П1.4 – Результаты термогравиметрического анализа полимерной пленки при содержании O₂ =10%



Рисунок П1.5 – Результаты термогравиметрического анализа картофеля при содержании O₂ =1%



Рисунок П1.6 – Результаты термогравиметрического анализа картофеля при содержании O₂ =10%

136



Рисунок П1.7 – Результаты термогравиметрического анализа бумаги при содержании O₂ =1%



Рисунок П1.8 – Результаты термогравиметрического анализа бумаги при содержании O₂ =10%

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Удельные теплопроводности, температуропроводности, массопроводности смеси ТКО



Рисунок П2.1 – Изменение эффективного коэффициента теплопроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,7 (1– 222°C, 2– 192C, 3– 175°C, 4– 157°C, 5– 146°C, 6– 132°C)



Рисунок П2.2 – Изменение эффективного коэффициента температуропроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,7

(1-222°C, 2-192°C, 3-175°C, 4-157°C, 5-146°C, 6-132°C)



Рисунок П2.3 – Изменение эффективного коэффициента массопроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,7 (1–222°C, 2–192°C, 3–175°C, 4–157°C, 5–146°C, 6–132°C)



Рисунок П2.4 – Изменение эффективного коэффициента теплопроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,62 (1–222°C, 2–192C, 3–175°C, 4–157°C, 5–146°C, 6–132°C)



Рисунок П2.5 – Изменение эффективного коэффициента температуропроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,62

(1-222°C, 2-192C, 3-175°C, 4-157°C, 5-146°C, 6-132°C)



Рисунок П2.6 – Изменение эффективного коэффициента массопроводности ТКО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,62 (1–222°C, 2–192C, 3–175°C, 4–157°C, 5–146°C, 6–132°C)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Результаты экспериментальных исследований процесса сушки ТКО



Рисунок ПЗ.1 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 200°С



Рисунок ПЗ.2 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 220°С



Рисунок ПЗ.3 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 240°С



Рисунок ПЗ.4 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 200°С



Рисунок П3.5 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 220°С



Рисунок П3.6 – Температурное поле образца ТКО и кинетическая кривая при температуре сушильного агента 240°С

На рисунках П3.1 – 6 обозначено: 1– температура на поверхности слоя ТКО; 2,3,4,5 – температуры на расстоянии от поверхности 15 мм, 35 мм, 55 мм и 75 мм соответственно; 6 – кинетическая кривая


ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Зависимости внутреннего объемного стока теплоты

Рисунок П4.1 – Зависимость внутреннего объемного стока теплоты $q_v(x,\tau)$ при относительной влажности 15% а) $T_c = 200$ °C, б) $T_c = 220$ °C, в) $T_c = 240$ °C



Рисунок П4.2 – Зависимость внутреннего объемного стока теплоты $q_v(x,\tau)$ при относительной влажности 30% а) $T_e = 200$ °C, б) $T_e = 220$ °C, в) $T_e = 240$ °C

146

ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Алгоритм построения модели

Создается геометрия слоя ТКО в зоне сушки в виде цилиндра, приведенного на рисунке П5.1, с высотой 0,068 м и диаметром 0,145 м. Задаются поверхности входа и выхода.



Рисунок П5.1 – Геометрическая модель

Создается и адаптируется конечно-элементная сетка модели, необхо-

димая для получения численного решения (Рисунок П5.2).



Рисунок П5.2 – Сетка модели

На рисунке П5.3 приведено задание эффективных теплофизических свойств ТКО в первый период нагрева.

File Mesh Define Solve Adapt Surface Dis	play	Report Parallel View He	elp					
💼 📴 🕶 🖬 🕶 🎯 🞯 🗔 💠 🍳 🕀 🥕		乳洗 詰・□・ /ゑ・	🔳 🗸 🚺 🔁 🖊	٨	17 MOE			
General	Ma	terials			1: Mesh 🔹			
H → H Models H → J Materials H → → Cell Zone Conditions	F	Create/Edit Materials						×
Boundary Conditions Dynamic Mesh	S	Name tbo		Mi	aterial Type olid	_	•	Order Materials by
Solution Methods		Chemical Formula tbo		Fk	uent Solid Materials		•	Fluent Database
Solution Controls Monitors J ₁₀ Solution Initialization				Mi	xture one		Ŧ	User-Defined Database
		Properties Density (kg/m3)	constant	_	Edit]	•	
⊕ ூ Graphics ⊕ III Animations ⊕ _ Piots ⊕ ⊕ Reports ⊕ ⊕ Parameters & Customization			437.43 constant 3070.3			Edit		
		Cp (specific Heat) (j/kg-k)			• Edit			
		Thermal Conductivity (w/m-k)	constant		- Edit]	E	
			0.347					

Рисунок П5.3 – Выбор материала и задание эффективных теплофизических

свойств ТКО

Во вкладке «Cell Zone Condition» (Условия ячеистой зоны) задаются внутренние условия объектов модели, а именно внутренний источник теплоты (Рисунок П5.4).



Рисунок П5.4 – Изображение вкладки «Cell Zone Condition»

Во вкладке «Boundary Conditions» задаем граничные условия первого рода. Для этого в разделе «Thermal Conditions» задаем температуры на входе и выходе. Затем нажимаем кнопку «OK».

Во вкладке быстрого доступа «Solution Initialization проинициализируем модель перед началом решения. Для этого нажимаем «Initialize» (Рисунок П5.5).



Рисунок П5.5 – Окно настройки вкладки Solution Initialization

Далее переходим во вкладку «Run Calculation» (Выполнение расчёта) и в параметрах настройки (рис. П5.6) указываем значение «Time Step Size» (размер шага по времени) 60 с и «Number of Time Steps» (количество временных шагов) равное 40. Затем в области «Max Iterations» (максимум итераций) зададим 20. Данного количества итераций будет достаточно для сходимости.



Рисунок П5.6 – Окно настройки вкладки Run Calculation

Нажимаем «Calculate». В процессе решения задачи появится окно, в котором в реальном времени будет отображаться ход решения задачи.

Результат расчета можно посмотреть во встроенном во Fluent постпроцессоре или CFD-Post, запуск которого осуществляется открытием последней строчки «Result» блок-схемы в AnsysWorkbench.

Для просмотра результатов нажмем «Result» откроется окно «Fluid Flow (Fluent) – CFD – Post», в котором нажмем «Volume Rendering». Так как меня интересует распределение температур по слою ТКО, в области Geometry в строке Variable выбираем «Temperature» и нажимаем «Apply». С помощью инструмента «Probe» замеряем температуру в центре модели, резльультат которого отражается в области «Temperature». Аналогично задаем свойства и просчитываем остальные периоды нагрева. Пример расчета на модели приведен на рисунке П5.7.



Рисунок П5.7 – Температурное поле слоя ТКО через 40 минут с момента начала нагрева

ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Документы, подтверждающие практическую реализацию работы



АКТ

внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет» результатов диссертационной работы Габитова Рамиля Наилевича

В учебном процессе при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Технология термической переработки органических масс», «Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки», «Использование газообразного топлива в теплотехнологии» для студентов направления подготовки Теплоэнергетика и теплотехника: «Энергетика теплотехнологий» (13.03.01; 13.04.01), а так же в дипломном проектировании и научно – исследовательской работе студентов используются результаты научных исследований Габитова Р.Н., включенные в состав его кандидатской диссертации: результаты лабораторных исследований термогравиметрических характеристик твердых бытовых отходов и продуктов их термической конверсии, эффективных теплофизических свойств и тепломассообменных коэффициентов влажных отходов.

По материалам диссертационной работы издано учебное пособие «Расчет термических реакторов по переработке твердых бытовых отходов» в соавторстве с Колибабой О.Б..

Декан Инженерно – физического факультета ИГЭУ

Заведующий кафедрой «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение» ИГЭУ

С.Г. Андрианов

О.Б. Колибаба



Сбербанка России ОАО, г. Москва, р/с 40702810138120104558, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 Адрес юридический:111116, Москва, ул. Энергетическая, д.16, корп. 3 Адрес фактический:111116, Москва, Энергетический проезд, д.8, стр.9, оф.3.4 Тел./факс: (495)918-0490, 918-0941, 362-7315 e-mail: ecoservprim@mail.ru www.ecoservice-prim.ru



Акт о внедрении результатов научных исследований

Настоящий акт составлен Ипполитовым В.А., заместителем генерального директора по науке ООО "НТИЦ"ЭКОСЕРВИС ПРИМ" в том, что полученные экспериментальные данные термогравиметрических характеристик ТБО и продуктов их термической конверсии, эффективных теплофизических свойств влажных ТБО на базе Ивановского государственного энергетического университета им. Ленина доцентом Колибабой О.Б. и аспирантом Габитовым Р.Н. при выполнении диссертационной работы, использованы при разработке пилотного образца установки термического обезвреживания отходов ООО"НТИЦ "Экосервис Прим".

Утверждаю ктор ООО «Чистое поле» 2013г.

Адрес организации: г. Иваново, ул. Жиделева, д.21, оф.201

АКТ

использования научно-технической разработки по реализации технологии термической переработки твердых бытовых отходов, выполненной в Ивановском Государственном энергетическом университете.

Настоящий акт составлен в том, что предприятием ООО «Чистое поле» принята к внедрению разработка технологии термической переработки несортированных твердых бытовых отходов (ТБО) методом пиролиза-газификации, созданная на основании патента МПК RU 2437030 C1 «Способ термической переработки несортированных твердых бытовых отходов» при участии Колибабы О.Б., Горинова О.И., Горбунова В.А., Семина Е.С., Габитова Р.Н., Долинина Д.А.. Самышиной О.В.

Внедрение указанной технологии позволяет перерабатывать до 90тонн ТБО по результатам расчета в сутки (расчет прилагается). Предложенная технология позволяет исключить затраты на предварительную подготовку отходов и получить газообразное топливо.

Тепловой и конструктивный расчет реактора по переработке твердых бытовых отходов при производительности по бытовым отходам 1 кг/с.

Результаты расчета приведены в таблице.1

Таблица 1.

N⁰	Параметр	Формула	Значе
-			ние
1	Массовый расход ТБО, кг/с (т/сут)	G_{TEO}	1 (86)
2	Высота слоя подсушки с учётом холостой зоны, м	h _{nc}	1,2
3	Средняя плотность насыпного слоя ТБО, кг/м ³	$ ho_{{\scriptscriptstyle T\!E\!O}}$.	220
4	Массовая доля пиролизного газа	$\mu_{nup.r.}$	0,4
5	Массовая доля жижки	$\mu_{_{ m m >cu m >cu m >c}}$	0,23
6	Массовая доля ТУО	$\mu_{_{TYO}}$	0,22
7	Температура начала процесса пиролиза, °С	t_{I}	250
8	Температура окончания процесса пиролиза, °С	. t2	560
9	Состав термогаза, %	$\begin{array}{c} CH_4\\ CO\\ H_2\\ N_2\\ CO_2\\ H_2O\end{array}$	8,7 26,2 1,4 44,7 15,7 6,3
10	Высота зоны газификации, м	h_{ϵ}	0,15÷ 0,25

11	Расход термогаза на сжигание, м ³ /с кг ТБО	$\mathbf{B} = V_{m.r.} \cdot k$	0,45
13	Скорость движения ТБО в реакторе, м/с	$W_{TEO} = rac{h_{mup}}{ au_{mup}}$	0,0018
14	Диаметр корпуса реактора, м	$d = \sqrt{\frac{4G_{TEO}}{\pi \cdot \rho_{TEO} \cdot W_{TEO}}}$	1,8
15	Высота зоны пиролиза, м	$h_{nup} = -\frac{\lambda_{_{3\phi}}}{c_{_{3\phi}} \cdot W_{_{TEO}} + b} \cdot \ln\left(\frac{t_{h.nup.} - t_{_{250}}}{t_{_{560}} - t_{_{250}}}\right)$	0,16
16	Высота термокамеры, м	$h_{TK} = rac{4 \cdot V_T}{\pi \cdot d^2}$	3,1
17	Объём термокамеры, м ³	$V_T = \frac{B \cdot Q_{\mu}^p}{500}$	7,7
18	• Выход термогаза, м ³ /с кг ТБО	$V_{m.r.} = \frac{(\mu_{nup.r.} + \mu_{cxc} + \mu_{ras})}{\mu_{nup.r.}} \cdot V_{nup.r.}$	2,5
19	Выход пиролизного газа, м ³ /с кг ТБО	$V_{nup.e.} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (-1,65 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,1155t - 12,9) dt$	0,56
20	Тепловая мощность термореактора, МВт	$Q_{ycm} = V_{m.r.}(1-k) \cdot Q_{u}^{p} \cdot \eta$	16,94
21	Низшая теплота сгорания, МДж/м ³	$Q_{\mu}^{p} = \frac{CH_{4}}{100} \cdot Q_{\mu}^{p}(CH_{4}) + \frac{CO}{100} \cdot Q_{\mu}^{p}(CO) + \frac{H_{2}}{100} \cdot Q_{\mu}^{p}(H_{2})$	8,6÷8, 7
22	Минимально необходимая высота реактора, м	$H = h_{nc} + h_{nup} + h_{z} + h_{TK}$	4,66

Доцент кафедры

«Энергетика теплотехнологий и газоснабжения» ИГЭУ, к.т.н. Директор ООО «Чистое поле» Жижка А.В.

155