

На правах рукописи



ГАБИТОВ Рамиль Наилевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Специальность: 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»

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

Иваново – 2017

Работа выполнена на кафедре «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Колибаба Ольга Борисовна**

Официальные оппоненты:

Рудобашта Станислав Павлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева», профессор кафедры «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий»

Глазов Василий Степанович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново

Защита состоится «16» февраля 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Gabitov.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____

Учёный секретарь
диссертационного совета

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В Российской Федерации по состоянию на 2016 г. накоплено более 35 млрд. тонн 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. 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.

В России до 90% образовавшихся ТКО подвергают захоронению на полигонах и свалках. С 2010 г. по 2015 г. 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. Термическую переработку ТКО осуществляют в специальных печах – термических реакторах.

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 г.), 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 calorийность 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 основ-

ные 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 многокомпонентного 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 от-

ходов 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 ком-

плекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH и на лабораторных установках собственной разработки.

На защиту выносятся:

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 тех-

нологического оборудования ..., сбережение энергетических ресурсов»; **в части области исследования специальности:** пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массо-переноса в тепловых системах и установках, использующих тепло»; пункту 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и тепло-использующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими 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 научно-технических 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 научно-практическая 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 объём диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, обозначены цели и основные задачи работы, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в работе ре-

зультатов, описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрены способы термической переработки твердых бытовых отходов, дан анализ продуктов сгорания. Показано, что сжигание ТКО не решает проблемы защиты окружающей среды от воздействия вредных компонентов в продуктах сгорания.

Анализ литературных источников показывает, что основной тенденцией решения проблемы ТКО является метод пиролиза, в результате которого при разложении органических компонентов образуются горючие газообразные продукты, содержащие молекулярный водород, метан и оксиды углерода. Это дает возможность использовать пиролизный газ в качестве топлива для теплоэнергетических установок вместо природного газа или мазута.

Для реализации этого метода в мировой практике используют различные установки, различающиеся по способу подвода теплоты в систему. Отмечены их достоинства и недостатки. При этом следует заметить, что для эффективной термической переработки ТКО необходима подготовка сырья, которая заключается в подсушке ТКО до низкого влагосодержания. Расчеты процессов сушки ТКО требуют знания закономерностей изменения теплофизических характеристик продукта в зависимости от влагосодержания и температуры. Необходимо разработать математическую модель тепло- и массообмена в процессе сушки плотного слоя с учетом многокомпонентного состава ТКО; провести исследование процесса окислительного пиролиза с помощью термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Указанные мероприятия позволяют разработать конструкцию, усовершенствовав тепловую работу шахтной печи для переработки ТКО методом пиролиза.

По результатам обзора литературных данных сформированы выводы и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса пиролиза ТКО среднего морфологического состава. В установках шахтного типа пиролиз протекает с небольшими подсосами кислорода (воздуха), т.е. протекает, так называемый, окислительный пиролиз.

В качестве методов термического анализа для исследования процесса окислительного пиролиза ТКО использованы: термогравиметрический (ТГ) анализ, в ходе которого непрерывно регистрировалось изменение массы образцов при изменении его температуры; дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), в ходе которой непрерывно регистрировались термические эффекты; масс-спектрометрия (МС) газовых

смесей.

Экспериментальные исследования выполнялись при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH, который состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 C Aeolos и блока импульсного термического Pulse TA.

В результате термического анализа получены термогравиметрические кривые. По значению производной от ТГ кривой (ДТГ) установлены температура, и интервал времени, при которых происходит максимальное уменьшение массы образца. С помощью ДСК определено количество теплоты, которое выделяется или поглощается в результате химических реакций. Состав пиролизного газа определен с помощью масс-спектрометра. Результаты исследований окислительного пиролиза смеси ТКО представлены на рис. 1.

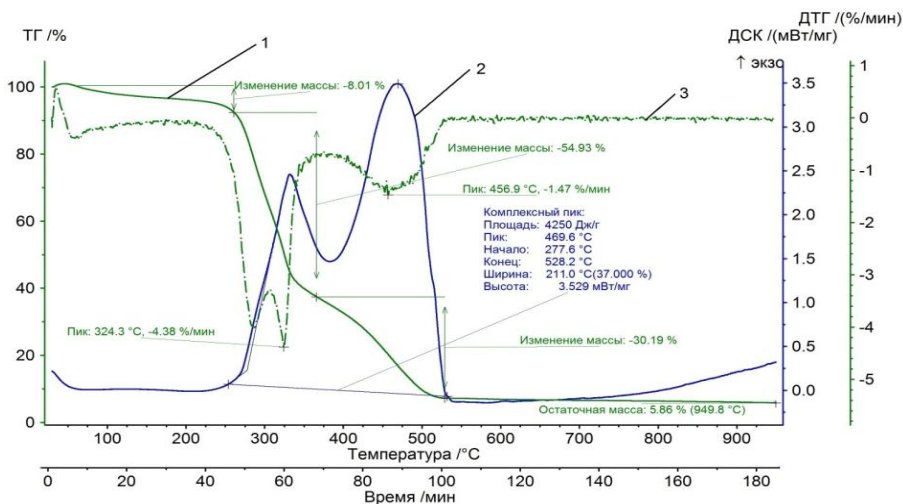


Рисунок 1. Результаты термического анализа: 1- ТГ, 2 - ДСК и 3 - ДТГ для образцов ТКО при содержании кислорода в атмосфере 1%

Анализ полученных кривых показывает, что в интервале температур 20÷220°C происходит незначительное изменение массы образца (0,5÷8%) за счет испарения влаги с поверхности пористой структуры материала. В интервале температур 320÷330°C происходит интенсивное уменьшение массы, обусловленное термическим разложением вещества и интенсивным выходом летучих соединений. При дальнейшем увеличении температуры выход летучих соединений снижается и при $t = 540^{\circ}\text{C}$ выход пирогаза заканчивается. Максимальная убыль массы об-

разца имеет место при температурах 330°C и 470°C, что соответствует максимальному выходу летучих веществ.

Для идентификации компонентов пиролизного газа использована база данных масс- спектрометров NIST(National Institute of Standards and Technology), содержащая информацию о масс- спектрах веществ. Основными компонентами пиролизного газа являются H₂, CH₄, H₂O, CO, CO₂. Количественный состав пирогаза определен по интенсивности сигналов анализируемых соединений с сигналами калибровочного газа.

Для расчета массовых долей компонентов в пиролизном газе использована методика Козлова А.Н и Кейко А.В. В табл. 1 приведены данные о качественном и количественном составе газа, выделившегося в процессе малоокислительного пиролиза с различным содержанием кислорода в атмосфере.

Таблица 1. Массовые доли основных компонентов пиролизного газа, %

Вещество	CH ₄			CO			H ₂ O			CO ₂			H ₂		
	Содержание O ₂			Содержание O ₂			Содержание O ₂			Содержание O ₂			Содержание O ₂		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
ТКО	22,5	18,7	11,9	41,2	36,4	32,9	18,9	23,1	26,6	17,2	21,7	28,4	0,14	0,06	0,03
Бумага	20,7	16,2	11	52,5	48,1	44,5	13,8	16,9	19,6	12,9	18,6	24,7	0,05	0,04	0,02
Картофель	22,9	20,4	14	32,5	26,1	22,5	24,3	27,9	32,3	22,1	25,5	31,0	0,09	0,04	0,03
Ткань	16,2	11,4	7,2	41,8	37,8	35,8	20,5	23,2	26,9	20,4	27,0	29,9	0,81	0,41	0,06
Полиэтилен	21,8	14,2	9,3	45,0	39,4	29,93	20,2	25,6	29,7	12,7	20,6	30,9	0,07	0,03	0,01

Результаты расчета теплотворной способности горючего газа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Теплотворная способность пиролизного газа, МДж/кг

Вещество	Q, при содержании кислорода 1%	Q, при содержании кислорода 5%	Q, при содержании кислорода 10%
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

Анализ проведенных исследований малоокислительного пиролиза ТКО позволяет использовать представленные результаты для расчета конструктивных и режимных параметров термического реактора по переработке ТКО.

В третьей главе рассматриваются закономерности процесса сушки влажного тела, сопровождаемого одновременным протеканием ряда

физических явлений переноса теплоты и массы: теплообменом между поверхностью материала и окружающей средой, испарением влаги с поверхности материала в окружающую среду, перемещением теплоты и влаги внутри материала. Приводятся наиболее часто используемые уравнения для расчета коэффициентов внешнего тепло- и массообмена. Представлены уравнения, полученные автором при проведении экспериментальных исследований, для расчета коэффициентов тепло- и массообмена между твердой и газовой фазами.

Для ламинарного режима движения воздуха получены зависимости:

$$Nu_T = 1,24 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,3} Re^{0,33} E^{0,084}; \quad (1)$$

$$Nu_D = 0,911 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0,2} Re^{0,33} E^{0,084}; \quad (2)$$

для турбулентного режима движения теплоносителя:

$$Nu_T = 0,107 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,38} Re^{0,82} E^{0,12}; \quad (3)$$

$$Nu_D = 0,066 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0,49} Re^{0,82} E^{0,12}, \quad (4)$$

где H – высота слоя, м; d – эквивалентный размер, м; E – симплекс, учитывающий изменение влажности материала (ТКО): $E = \frac{100 - W_T}{W_H}$, где

W_H и W_T – текущая и начальная относительная влажность материала, %, Re – критерий Рейнольдса; Nu_T – критерий Нуссельта; Nu_D – диффузионный критерий Нуссельта.

Зависимости (1) – (4) применимы в диапазоне: $Re=400 \div 4350$, $d/H=0,02 \div 0,1$, $E=0,6 \div 1,5$.

В этой же главе приводится методика определения коэффициентов внутреннего тепломассопереноса. Для их определения использовался зональный метод, широко применяемый для определения коэффициента массопроводности влажного тела. Этот метод был дополнен снятием наряду с кинетической кривой сушки температурной кривой, которая также разбивалась на «п» зон, соответствующих зонам кривой кинетики. Для каждой из зон определяли начальную и конечную температуру влажного материала и составляли тепловой баланс, из которого, считая, что количество теплоты, необходимое для нагревания образца и содержащегося в нем влаги, а также на испарение части влаги, подводится

путем теплопроводности через разделяющую стенку, по закону Фурье рассчитывали коэффициент теплопроводности влажного материала.

Таким образом, были определены значения коэффициентов тепло- и массопроводности ТКО в зависимости от их влагосодержания и температуры. Эмпирические выражения, позволяющие рассчитывать значения этих коэффициентов, приведены в тексте диссертационной ра-

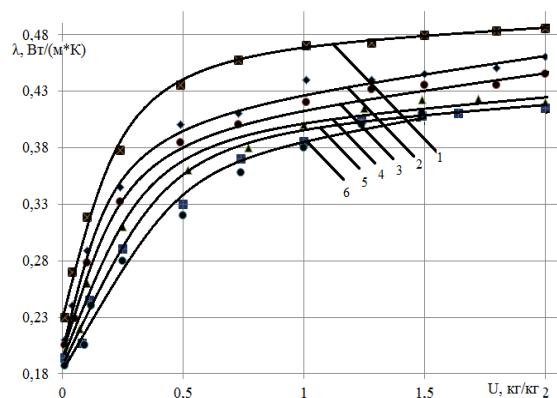
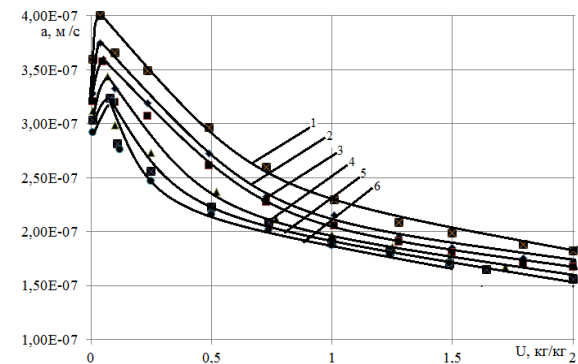


Рисунок 2. Изменение эффективного коэффициента теплопроводности слоя ТКО с порозностью 0,43 в процессе сушки при температуре сушильного агента: 1– 222°C, 2– 192°C, 3– 175°C, 4– 157°C, 5– 146°C, 6– 132°C



боты. Там же представлена принципиальная схема экспериментальной установки и методика эксперимента, прокомментированная соответствующими графическими иллюстрациями.

Изменение кинетических коэффициентов в процессе сушки представлены на рис. 2, 3.

Рисунок 3. Изменение эффективного коэффициента температуропроводности слоя ТКО с порозностью 0,43 в процессе сушки при температуре сушильного агента: 1– 222°C, 2– 192°C, 3– 175°C, 4– 157°C, 5– 146°C, 6– 132°C

Четвертая глава посвящена разработке математической модели процесса сушки ТКО.

При термической переработке ТКО в печах шахтного типа материал загружают в верхнюю часть рабочего пространства реактора, где он последовательно проходит зоны сушки и пиролиза.

В зоне сушки происходит нагрев и удаление влаги из слоя ТКО за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза. В зоне пиролиза ТКО разлагаются, образуя пиролизный газ, пригодный для использования в качестве топлива, летучие конденсируемые со-

единения и углеродистый остаток. Для достижения требуемой полноты обезвреживания отходов необходимо расчетно – экспериментальное определение температуры и продолжительности процесса термической обработки. При этом большую роль играет влажность ТКО.

Так, для среднего состава ТКО первоначальная влажность материала, поступающего в зону пиролиза, должна быть не более 5%.

Таким образом, с точки зрения энергоэффективности, интерес представляет определение температурного поля в слое ТКО и расчет стока теплоты в зоне сушки.

Для расчета температурного поля в слое органического сырья в зоне сушки реактора предлагается математическая модель, согласно которой слой ТКО рассматривается как условное квазиоднородное изотропное пористое тело с эффективными теплофизическими свойствами с учетом порозности слоя ТКО.

При моделировании приняты следующие допущения:

1) Пористое тело представлено в виде сплошной среды с эффективными теплофизическими характеристиками и усредненными величинами температур, концентраций, порозности;

2) Материал и газ, заполняющий поры, увлажнены;

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

Математическая формулировка задачи представлена дифференциальным уравнением в одномерной постановке с распределенным внутренним источником (стоком) теплоты q_v и эффективными теплофизическими свойствами

$$c_{\vartheta}(T,U)\rho_{\vartheta}(T,U)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{\vartheta}(T,U)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}) - q_v(x,\tau); \quad (5)$$

$$\tau \geq 0, 0 \leq x \leq R;$$

с краевыми условиями

$$T(x,0) = T_0; \quad (6)$$

$$\lambda_{\vartheta}(U,T)\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$T(R,\tau) = const, \quad (8)$$

где ρ_{ϑ} – средняя эффективная плотность, кг/м³, U – влагосодержание, кг/кг; λ_{ϑ} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); τ – время, с; R – толщина пластины, м.

В правой части уравнения (5): 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 (6) показывает, что в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ тело имеет равномерное распределение температуры. На поверхности тела $x = R$ принято граничное условие 1 рода (8), которое указывает на то, что теплота подводится к телу посредством температуры. Граничное условие (7) – это условие термодинамического равновесия с окружающей средой.

Закон изменения внутреннего стока теплоты имеет вид:

$$dq_v(x, \tau) = \frac{m_{ж} r}{V_M \Delta \tau} = \varepsilon r \rho_{\vartheta}(T, U) \frac{dU(x, \tau)}{d\tau}, \quad (9)$$

где r – скрытая теплота парообразования; $m_{ж}$ – масса испарившейся жидкости за временной промежуток, характеризующий долю переноса энергии в виде пара от общего ее потока; ε – коэффициент внутреннего испарения влаги; V_M – объем материала, м³.

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

$$q_0 = \frac{\varepsilon \rho_{\vartheta} r U_0}{\tau}. \quad (10)$$

Поиск зависимости $q_v(x, \tau)$ осуществляется решением обратной задачи теплопроводности дискретно для «n» моментов времени при условии минимизации среднеквадратичного отклонения полученных расчетов температур от экспериментально замеренных в нескольких сечениях по высоте слоя.

Схема экспериментальной установки представлена в тексте диссертации. Следует отметить, что термопары устанавливались вдоль оси сушильной камеры через одинаковое расстояние от поверхности слоя ТКО. Сушка образца осуществлялась теплоносителем с температурой 200÷240°C. В процессе нагрева фиксировалась убыль массы материала, время сушки и температурные поля по высоте слоя.

На основе полученных кинетических кривых проведен расчет временной зависимости внутреннего стока теплоты в заданных сечениях образца. Полученная зависимость $q_v(x, \tau)$ аппроксимирована в программном комплексе Table Curve 3D уравнением вида:

$$q_v(x, \tau) = a + b \cdot x + c \cdot \ln(\tau) + d \cdot x^2 + e \cdot (\ln(\tau))^2 + f \cdot x \cdot \ln(\tau) + g \cdot x^3 + h \cdot (\ln(\tau))^3 + i \cdot x \cdot (\ln(\tau))^2 + j \cdot x^2 \cdot \ln(\tau) \quad (11)$$

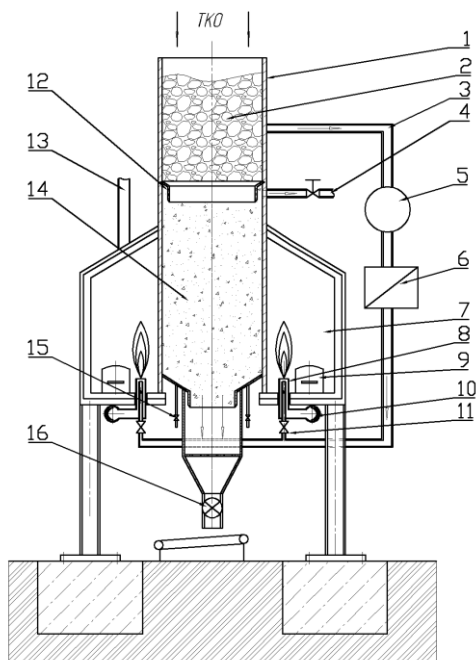
где $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ – эмпирические коэффициенты, приведены в

тексте диссертации.

Полученные значения q_v использовались для расчета температурных полей в слое ТКО и сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

Математическая модель процесса сушки слоя ТКО реализована в многофункциональном программном конечно - элементном пакете ANSYS и приведена в приложении диссертации. Погрешность расчета температурных полей слоя ТКО по предложенной методике при сопоставлении с экспериментальными данными не превышает $\pm 12\%$.

Пятая глава посвящена конструктивному оформлению термического реактора (рис.4) на основе расчетно-экспериментальных данных. Установка термического разложения твердых органических отходов 1 со-



держит накопительную камеру с зоной сушки 2 печи-реактора, камеру пиролиза 14 с зоной отбора пиролизного газа и отверстиями для вывода пиролизного газа, водяных паров и легких летучих соединений с козырьками 12 (узел отбора) и патрубком 4, конденсатосборником 6, камеру сжигания 7 с горелками 8, топочной дверкой 9 для загрузки твердого топлива, коллектор воздуха 10, регулировочную арматуру 11, дымовую трубу 13, патрубок для отвода газа 3, нагнетатель 5, регулировочную арматуру 15, шлюзовый затвор 16.

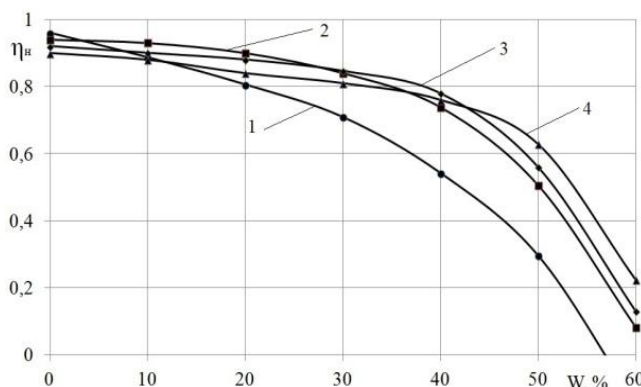
Рисунок 4. Установка для переработки ТКО

С использованием полученных в результате проведенных исследований данных, проведен расчет теплового баланса реактора, определены режимные параметры и технико-экономические показатели установки в зависимости от влажности исходного сырья и содержания кислорода в атмосфере при производительности 500 кг/ч. Зависимости

КПД печи от влажности исходного сырья при различных режимах окислительного пиролиза приведены на рис.5.

Работа печи с максимальным КПД (рис.5) в режиме чистого пиролиза возможна в диапазоне изменения влажности сырья от 0 до 4%. В диапазоне изменения влажности от 4 до 28% эффективен режим малоокислительного 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% – с содержанием кислорода в атмосфере 10%. При влажности свыше 50% наблюдается резкое снижение КПД, т.е. работа печи становится не эффективна.

Результаты расчета пилотной установки производительностью вне-



дрены на производстве ООО «НТИЦ Экосервис Прим» г. Москва.

Рисунок 5. КПД установки в зависимости от влажности сырья при режимах окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере: 1 – 0%; 2 – 1%; 3 – 5%; 4 – 10%

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. 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.

2. Горинов, О.И. Метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, **Габитов Р.Н.**, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. - 2013. - Вып. 6. - С. 16-19.

3. Колибаба, О.Б. Исследование процессов нагрева и сушки слоя органосодержащих отходов в термическом реакторе / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, **Р.Н. Габитов**, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. - 2014. - Вып. 6. - С. 17-21.

4. Колибаба, О.Б. Исследование сушки слоя твердых бытовых отходов в процессе термической переработки / О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, **Р.Н. Габитов** // Вестник Череповецкого государственного университета. - 2015. - № 3. - С. 21-25.

5. 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. - Вып. 5. - С. 32-37.

6. Колибаба, О.Б. Определение теплофизических свойств слоя твердых

органических отходов для расчетов термических реакторов / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, **Р.Н. Габитов** // Промышленная энергетика. - 2015. - Вып. 4. - С. 57-62.

7. 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. - Вып. 6. - С. 43-48.

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

9. 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 высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2016. - № 2 (362). - С. 192-196.

10. **Габитов, Р.Н.** Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. - 2017. - Вып. 3. - С. 14-19.

По перечню изданий, индексируемых в базе данных SCOPUS

11. Bukhmirov, V.V. Experimental research of 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. - №93. - P.1-5.

12. Bukhmirov, V.V. Experimental determination of thermal characteristics of municipal solid waste / V.V. Bukhmirov, O.B. Kolibaba, **R.N. Gabitov** // MATEC Web of Conferences: Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016). -2016. - №72. - C. 01047- P.1-5.

13. **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. – №110. – P.1 – 7. DOI: 10.1051/mateconf/201711001028

Публикации в других изданиях

14. Горинов, О.И. Температурное поле слоя и размер прогретой зоны в процессе термического разложения ТБО / О.И. Горинов, **Р.Н. Габитов**, С.А. Зайцев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения). Материалы конференции. - Иваново: ООО "ПресС-то".2011. - т.2. - С.236 – 239.

15. Gorinov, O.I. A way and installation of utilization of municipal solid waste by thermal processing methods with production of gaseous fuel / O.I. Gorinov, O.B. Kolibaba, D.A. Dolinin, E.S. Semin, O.V. Samyshina, **R.N. Gabitov**// Euro-Eco-2012 -Hannover: 2012. - P.56 – 57.

16. Лопатина, М.В. Расчетно-экспериментальный метод определения эффективного коэффициента температуропроводности пористой структуры /

М.В. Лопатина, **Р.Н. Габитов**, О.Б. Колибаба // Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2013". - Иваново: ИГЭУ. -2013. - т.2. -С.125 -126.

17. Муратова, Т.В. Экспериментальное определение влажности слоя твердых бытовых отходов в процессе его сушки/Т.В. Муратова, **Р.Н. Габитов**// Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2014".- Иваново: УИУНЛ ИГЭУ. - 2014. - т.2. - С.150.

18. Муратова, Т.В. Математическое моделирование процесса сушки слоя органосодержащего сырья / Т.В. Муратова, **Р.Н. Габитов** // Материалы докладов XI международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения", 23-25 марта 2016 г., г. Казань: тезисы докладов.- Казань: КГЭУ.- 2016.- Т.2. - С.139 - 140.

Результаты интеллектуальной деятельности

19. Патент на изобретение РФ №2433344. Установка для термического разложения несортированных твердых бытовых отходов / Долинин Д.А., **Габитов Р.Н.**, Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горбунов В.А., Горинов О.И.; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. №31.

20. Патент на изобретение РФ №2437030. Способ термической переработки несортированных твердых бытовых отходов / Долинин Д.А., **Габитов Р.Н.**, Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горбунов В.А., Горинов О.И.; заявл. 25.03.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. №35.

21. Патент РФ на изобретение №2525558. Способ порционной термической переработки несортированных твердых бытовых отходов на полигоне / Долинин Д.А., **Габитов Р.Н.**, Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горинов П.О., Горинов О.И.; заявл. 06.03.2013; опубл. 20.08.2014, Бюл. №23.

22. Патент РФ на изобретение №2536896. Переносная установка для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне / Долинин Д.А., **Габитов Р.Н.**, Семин Е.С., Самышина О.В., Колибаба О.Б., Горинов П.О., Горинов О.И.; заявл. 19.09.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. №36.

23. Патент на изобретение 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.; заявл. 31.08.2015; опубл. 07.03.2017, Бюл. №7.

ГАБИТОВ Рамиль Наилевич ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

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

Подписано в печать 14.12.2017 г. Формат 60х84^{1/16}.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №135.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.