



На правах рукописи

ТАРАСОВ ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ГАЗИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ В ШАХТНОМ
РЕАКТОРЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ**

Специальность 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре Инновационных технологий наукоемких отраслей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

**Научный
руководитель:**

Яновский Леонид Самойлович

член – корреспондент РАН, д.т.н., профессор, начальник отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология» ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

**Официальные
оппоненты:**

Гурьянов Александр Игоревич

доктор технических наук, доцент, и.о. директора института авиационных технологий и инженерной физики, профессор кафедры общей и технической физики ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени имени П.А. Соловьева».

Колибаба Ольга Борисовна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина».

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Защита диссертации состоится «» _____ в ____ часов ____ мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.121 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 17, ауд. Г-406. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, дом 14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МЭИ. 121

доктор технических наук

Терешин Алексей Германович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Проблема утилизации медицинских отходов (МО) требует комплексного решения, нейтрализации патогенной среды, химических загрязнителей и исключения повторного использования медицинских отходов. Захоронение МО на полигонах, как устаревший метод, не обеспечивает необходимый уровень экологической и санитарной безопасности. Существующие альтернативные методы обезвреживания (автоклавирование, обработка микроволновым излучением и т.д.) имеют ограничения по составу отходов и не решают проблемы полностью.

Согласно требованиям законодательства РФ, для утилизации МО подходят термические методы. Наибольшее распространение из них получило сжигание в инсинераторах. Оно осуществляется в установках малой производительности, конструкция которых зачастую не учитывает особенностей МО (инфекционную опасность, гетерогенность состава, влажность и т.д.).

Альтернативой может быть газификация, но существующие технологии газификации МО имеют ряд проблем, таких как чувствительность к составу отходов, осаждение смол в трактах установок и неравномерное газораспределение.

В работе рассматривается перспективная технология слоевой газификации МО в противоточном шахтном реакторе. Особенностью данной технологии является наличие рециркуляции продуктов газификации в слой и добавление инертного материала. Рециркуляция позволяет быстро влиять на температуру в зоне газификации и стабилизировать режим работы. Добавление инертного материала необходимо для регулирования температуры продуктов газификации на выходе из реактора, увеличения осаждения смол внутри реактора и возвращения тепла в зону газификации для уменьшения влияния состава МО.

Объект исследования: термохимический реактор-газификатор для обезвреживания медицинских отходов.

Предмет исследования: теплотехнические и термохимические процессы обезвреживания медицинских отходов.

Степень разработанности темы исследования

Проблемы управления и обращения с медицинскими отходами описаны в работах Степанова Е.В., Орлова А.Ю., Балакаева А.В. и др. Общий анализ и оценка различных технологий отражены в работах Перелыгина В.В., Yin Ting Chu, Chandra W. P. Вопросам организации термической переработки и экспериментальному исследованию свойств медицинских отходов и схожих с ними по морфологии посвящены работы Тугова А.Н., Зройчикова Н.А., Бернадинера И.М., Колибаба О.Б. Герасимова Г.Я., Двоскина Г.И. и др. Достижения в области технологий газификации различных отходов описаны в работах Глазова С.В., Копытова В.В., Падалко О.В., Lars W., Waldheim C., Yong-Chil Seo, Tanvir A. и др.

В ряде работ отмечается, что газификация является перспективной альтернативой сжиганию для утилизации МО, однако использование

существующих технологий, разработанных для других видов сырья, сопряжено с опасностями, вызванными особенностями МО, что делает задачу разработки специализированного реактора актуальной.

Цель работы

Разработка теплотехнических основ для создания реактора-газификатора термохимического обезвреживания медицинских отходов с рециркуляцией продуктов их газификации.

Задачи исследования

1. Анализ технологий утилизации медицинских отходов. Оценка влияния особенностей медицинских отходов на организацию их утилизации.
2. Проведение экспериментальных исследований термического разложения модельных образцов медицинских отходов.
3. Разработка модели реактора-газификатора медицинских отходов. Определение влияния состава сырья и расходных характеристик на основные рабочие параметры процесса.
4. Численное исследование газодинамической картины смешения реагентов в зоне газификации.

Научная новизна

1. Получены новые экспериментальные данные, позволяющие математически описывать процесс термического разложения медицинских отходов в условиях реактора-газификатора с учетом их гетерогенности.
2. Получены данные по кинетике реакции термического разложения декана ($C_{10}H_{22}$) в ранее неизученном диапазоне температур (400-450 °C).
3. Разработана балансовая зональная модель тепловых процессов в реакторе-газификаторе медицинских отходов с рециркуляцией газообразных продуктов.
4. Предложен и валидирован подход для оценки газодинамической картины смешения двух реагирующих потоков в слое зернистого материала.

Практическая значимость

1. Разработанная модель реактора-газификатора может применяться для оценки массовых и тепловых потоков при конструировании газификаторов медицинских отходов и других, схожих с ними по составу отходов. Модель может служить основой для создания автоматической системы управления процессом в реакторе.
2. Реализован и валидирован подход к численным исследованиям газодинамической картины зоны ввода рециркуляции, позволяющий оперативно оценивать технические решения при проектировании узла фурм.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе использованы методы математического моделирования и анализа, методы экспериментального исследования и обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту

- результаты экспериментальных исследований свойств образцов медицинских отходов при их термическом разложении;
- модель реактора-газификатора с рециркуляцией газообразных продуктов;

- основные характеристики процесса газификации медицинских отходов в зависимости от их состава и регулирующих параметров;
- результаты численного моделирования газодинамической картины смешения двух реагирующих потоков в слое зернистого материала.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

обеспечиваются корректным использованием теории тепломассообмена, применением современных, аттестованных экспериментальных установок и методов обработки опытных данных, а также удовлетворительными результатами сопоставления полученных в работе данных с результатами исследований других авторов.

Апробация

Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», Воронеж (2018 г.); международной научно-практической конференции «Наука сегодня: реальность и перспективы», Вологда (2019 г.); XII Российской конференции (с международным участием) «Актуальные проблемы нефтехимии», Грозный (2021 г.); XVI Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву, Суздаль (2022 г.); на Двадцать девятой и Тридцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва (2023, 2024 гг.); XXV Международной конференции по химическим реакторам «ХИМПЕАКТОР-25», Тюмень (2023 г.); IV Международном научном форуме «Перспективные задачи инженерной науки», Москва (2023 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ: 4 статьи в изданиях, индексируемых в библиографической базе данных Scopus; 1 статья, входящая в список ВАК, 1 патент РФ на изобретение, 1 патент РФ на полезную модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 171 с., включая 58 рисунков и 47 таблиц. В список литературы включено 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, дана аннотация диссертационной работы. Сформулированы цель и задачи исследований, а также научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приводится анализ законодательной базы обращения с МО и основных материалов, поступающих на утилизацию. Отмечается, что со стороны законодательства для обезвреживания МО лучше всего подходят термические методы. При этом основными особенностями организации утилизации МО

являются: высокая инфекционная опасность; гетерогенность состава; высокая влажность; повышенное содержание хлора в общей массе отходов; малые объемы образования отходов.

Проанализирован опыт применения установок для утилизации МО на основе сжигания, пиролиза и газификации. Сжигание МО в смеси с другими отходами допустимо исключительно в экстренных ситуациях. Сжигание МО без перемешивания с другими отходами в специально сконструированных установках (инсинераторах) применимо, но осуществление процесса осложняется особенностями МО и является опасным. В связи с этим требуется разработка альтернатив. Установки на основе пиролиза хорошо подходят для создания передвижных платформ, но сложно масштабируются и не могут полноценно заменить инсинераторы. Классические реакторы для слоевой газификации не пригодны для работы на МО из-за сильной чувствительности к размеру и фракционному составу сырья. Однако, как технология, газификация является весьма перспективной альтернативой сжиганию МО из-за большей инерционности и лучшей экологичности.

Показано, что для методов обезвреживания (за исключением прямого сжигания) принято выбирать время обработки более 30 мин., при температуре выше 140 °С для деструкции патогенов. Высокая гетерогенность МО требует дополнительных параметров для регулирования процесса при термическом обезвреживании, а также требуется учитывать высокое содержание из-за ПХДД/ПХДФ. Образование МО мало в сравнении с другими типами отходов и сильно зависит от размера лечебного учреждения, что требует оптимизации типоразмерного ряда для малых объемов образования.

Рассмотрена возможность применения противоточного шахтного реактора с добавлением инертного материала (керамические шары из глинозема – Al_2O_3) к МО и рециркуляцией продуктов в зону окисления (рис. 1). Отходы при загрузке смешиваются с инертным материалом и подаются через шлюз в реактор. По мере продвижения вниз, отходы сушатся и пиролизуются, нагреваясь восходящими продуктами газификации. В зоне газификации коксовый остаток (фиксированный углерод и зольная часть) встречаются с подаваемым воздухом, и происходит процесс сжигания кокса. Температура в этой зоне контролируется долей подаваемого газа по линии рециркуляции, который может выступать как захлаживающим теплоносителем, так и топливом в зависимости от режима. Инертный материал, выходя из зоны газификации, остывает, нагревая воздух. Такой подход может нивелировать чувствительность к составу сырья путем введения двух дополнительных управляющих параметров: расхода инертного материала и доли рециркуляции, а также повысить газопроницаемость. Однако данные, необходимые для оценки работоспособности такого реактора, в литературе отсутствуют.

Применение этой перспективной технологии сдерживается тем, что отсутствуют экспериментальные и расчетные данные, обеспечивающие возможность проектирования такой установки с учетом особенностей МО. Поэтому необходимо разработать модель рассматриваемого реактора и провести анализ режимов работы при различном составе сырья. Также необходимо оценить газодинамическую картину смешения реагентов в зоне ввода рециркуляции и оценить темпы образования отложений в трактах установки, где есть поток продуктов газификации. Для этого необходимо провести комплексные экспериментальные исследования термического разложения образцов МО, элементный и технический анализ типовых образцов МО. Эти данные, хоть и частично представлены в литературе, но фрагментированы по температурным диапазонам, методам исследования и оборудованию.

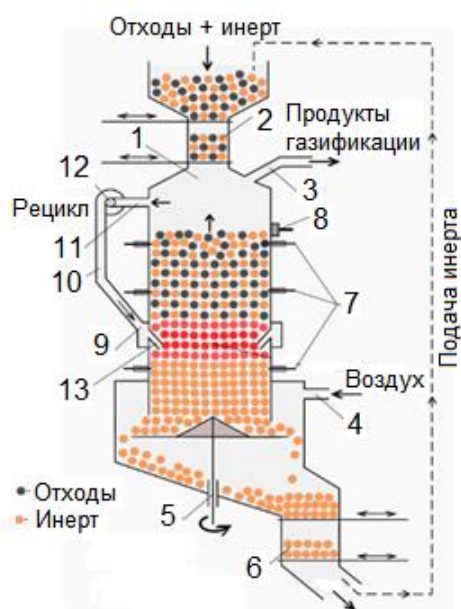


Рис. 1 – Шахтный газификатор с восходящим потоком окислителя.
1 - Реактор; 2 – Загрузочный затвор; 3 - Выпуск газа; 4 - Воздухозаборник;
5 - Вращающаяся решетка; 6 - Выпускной затвор; 7 – Датчики температуры; 8 – Датчик уровня; 9 - Распределительный коллектор горячего газа; 10 - Газопровод; 11 – Отбор рециркуляционного газа; 12 - Вентилятор; 13 -Фурмы.

Вторая глава посвящена комплексным исследованиям термического разложения медицинских отходов. Задачами являются получение данных для моделирования зоны

пиролиза установки (продукты пиролиза неминуемо попадают в линию рециркуляции, и их состав влияет на процесс в зоне газификации) и изучение процесса образования смол.

Поскольку выделить средний состав МО невозможно (сильно зависит от места образования и большая часть информации не публикуется) в качестве модельных образцов МО (далее модельные образцы) выбраны самые часто встречающиеся в литературе материалы: бумага, трикотаж хлопковый, полипропилен, синтетическая ткань спанбонд (SMS-20), нитрил, поливинилхлорид (ПВХ) и каучук синтетический. Результаты технического и элементного анализа показывают, что образцы бумаги и трикотажа обладают идентичными величинами изученных характеристик (указаны % масс.), а именно влажность ≈ 0.2 %, зольность ≈ 0.5 %, летучие ≈ 79 %, фиксированный углерод ≈ 20 %, низшая теплота сгорания ≈ 17 МДж/кг, углерод ≈ 45 %, водород $\approx 6,5$ %, кислород ≈ 47 %. Образцы полипропилена и ткани SMS-20 обладают идентичными свойствами за исключением зольности. Зольность образца полипропилена составляет 3.2 % по массе, у образца ткани SMS-20 этот показатель меньше 0.1 % по массе.

Остальные характеристики приблизительно равны: влажность ≈ 0.1 %, зольность ≈ 1 %, летучие ≈ 97 %, фиксированный углерод ≈ 0.3 %, низшая теплота сгорания ≈ 43.5 МДж/кг, углерод ≈ 84 %, водород ≈ 15.4 %, кислород ≈ 0 %. Остальные образцы обладают различными характеристиками, что является следствием свойств их молекул.

Исследования компонентного состава продуктов пиролиза модельных образцов проводились по методу, описанному в ГОСТ 3168–93 с заменой алюминиевой реторты на стальную для расширения температурного диапазона. Опыты проводились при 400, 500, 600 °С с навеской 30 г и скоростью нагрева 10 °С /мин. Определялись выход кокса, жидких продуктов и газа (по балансу).

Выявлена общая тенденция: с увеличением температуры процесса массовая доля твердого остатка в виде полукокса уменьшается и выходит на асимптоту (масса кокса при 600 °С близка к сумме золы и фиксированного углерода), при этом увеличиваются доли смолы, газа и пирогенной воды (для образцов из группы углеводов). Для оценки влияния температуры рабочего процесса на выход отдельно взятого компонента можно использовать математическую зависимость вида:

$$C(M) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{b}\right) + C(M)_0, \quad (1)$$

где $C(M)$ – доля компонента M в общей массе, %; A – предэкспоненциальный множитель; b – коэффициент, t – температура, °С; $C(M)_0$ – асимптотический предел концентрации компонента, %.

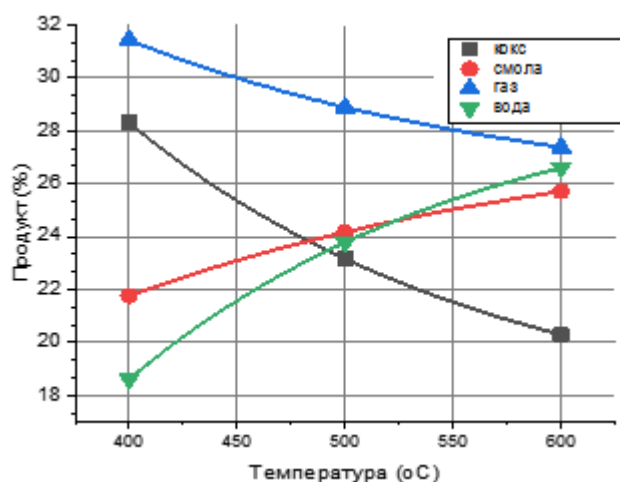


Рис. 2 – Зависимость компонентного состава продуктов пиролиза бумаги от температуры (точки экспериментальные данные)

Получены коэффициенты уравнения (1) для всех исследованных образцов. На рис. 2 приведены эти зависимости компонентного состава продуктов от температуры пиролиза для бумаги. Приведены результаты исследования элементного состава компонентов продуктов пиролиза модельных образцов, полученных в опытах на реторте. Элементный состав продуктов пиролиза группы углеводов имеет общие закономерности. Уменьшение количества кокса согласуется с увеличением С, Н и О в смоле и газе с ростом температуры пиролиза, и достаточно равномерно. Однако совсем иная картина наблюдается при

пиролизе группы полиолефинов. Содержание углерода и водорода резко уменьшается в полукоксе при температуре разложения 400 - 600 °С и увеличивается в смоле до содержания С и Н в исходном полимере. Этот факт говорит о том, что полимеры разлагаются при этих температурах, но лишь до той степени, когда они переходят в парообразное состояние, после чего выходят из

реторты и конденсируются далее почти без изменения состава. Малый выход газа пиролиза подтверждает это предположение. Предложено использовать математическую зависимость (1) для оценки массовой доли элементов в продуктах в диапазоне температур 400 – 600 °С на основе данных экспериментов. Получены коэффициенты уравнения для всех исследуемых образцов. На рис. 3 приведен пример полученных температурных зависимостей и экспериментальных точек, по которым они были получены для оценки содержания С, Н и О в продуктах термического разложения бумаги

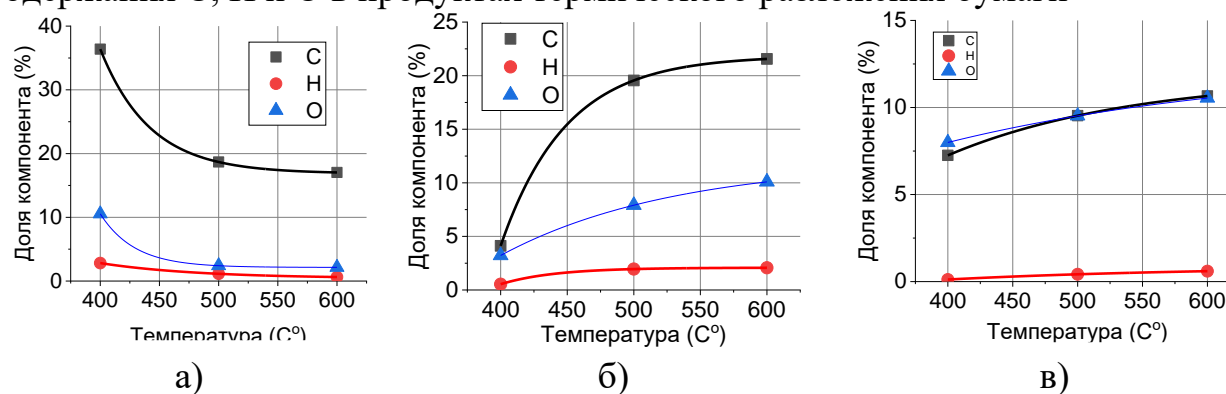


Рис. 3 - Содержание С, Н и О: (а) кокс, (б) смола, (в) газ для бумаги

Полученные результаты были использованы для определения продуктов пиролиза МО (путем аддитивного сложения результатов для отдельных образцов) при математическом моделировании противоточного вертикального газификатора с рециркуляцией генераторного газа в зону газификации.

Приведены результаты ТГ-анализа (термогравиметрического анализа) модельных образцов (рис. 4). Измерения проводились до конечной температуры 920°С со скоростью нагрева 10°С/мин. Во время опыта реакционный объем продувался азотом с расходом 50 мл/мин. Измерения производились в корундовых (Al_2O_3) тиглях объемом 0,3 мл.

Показано, что раньше всего начинают разлагаться резина, ПВХ и углеводы. Наибольшей термической стабильностью обладают полиолефины. Для резины и ПВХ показано, что реакция термического разложения протекает в несколько стадий (в две и три соответственно). Учитывая это, можно сделать вывод, что наибольшее количество смол в продуктах газификации будет наблюдаться при температуре порядка 400-450 °С, а их количество в трактах можно ограничить путем регуляции температуры на выходе из газификатора.

Дополнительно для образцов, содержащих ПВХ, был проведен анализ на содержание хлора в коксовом остатке. Результаты показали, что при нагреве до 350 °С в газовую фазу выходит до 86—88 % хлора, содержащегося в поливинилхлориде.

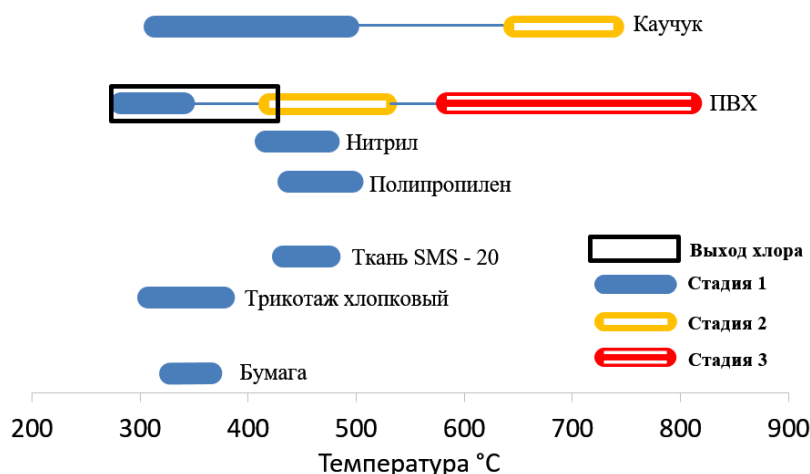


Рис. 4 - Начало и конец разложения модельных образцов при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ (разными цветами помечены стадии пиролиза)

Для исследований термического разложения образцов в газовой фазе использована манометрическая установка на базе сосуда Бурдона (рис. 5). Рассматривается проблема осаждения продуктов газификации в трактах рециркуляции и подачи продуктов газификации в дожигатель. Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса термического разложения модельных образцов легких смол, углеводов и пластиков.

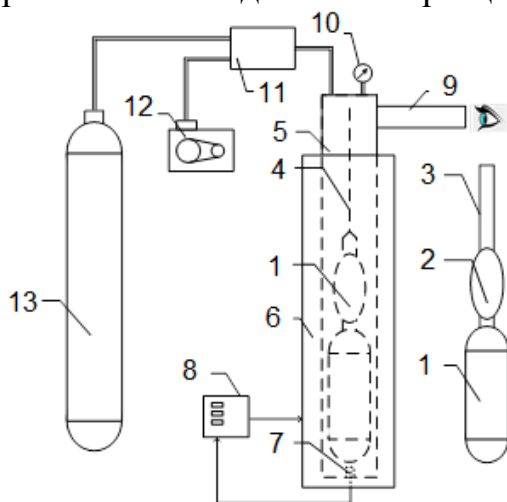


Рис. 5 - Манометрическая установка
1 – сосуд из стекла; 2 – манометрическая мембрана; 3 – трубка; 4 – стрелка; 5 – камера компенсации давления; 6 – термостат; 7 – термopapa; 8 – система управления термостата; 9 – окуляр для определения положения стрелки; 10 – вакуумметр и манометр; 11 – система регулирования давления; 12 – насос вакуумный; 13 – баллон с азотом

Кинетику термического разложения при исследовании манометрическим методом можно описать уравнением реакции 1-го порядка:

$$P = P_\infty + (P_0 - P_\infty) \exp(-kt), \quad (2)$$

где P_∞ – конечное давление газовыделения при экстраполяции на бесконечное время проведения реакции; P_0 – начальное давление исходного соединения; k – константа скорости реакции, с^{-1} . t – время, с .

Далее по результатам измерения давления в эксперименте определяются аррениусовские зависимости констант скоростей реакций газовыделения:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

где k_0 и E – предэкспоненциальный множитель, с^{-1} и энергия активации, ккал/моль ; $R = 1,987 \text{ ккал/(K} \cdot \text{моль)}$; T – абсолютная температура, K .

В качестве модели легколетучих смол был выбран декан ($C_{10}H_{22}$), близкий по своей структуре к полиолефинам ($[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$ - полипропилен, $[-CH_2-CH_2-]_n$ - полиэтилен и т.д.), основным источникам смол, и являющийся промежуточным продуктом их термического разложения.

Исследования кинетики разложения декана в газовой фазе на манометрической установке проводились в диапазоне температур 410-450 °С (Рис. 6).

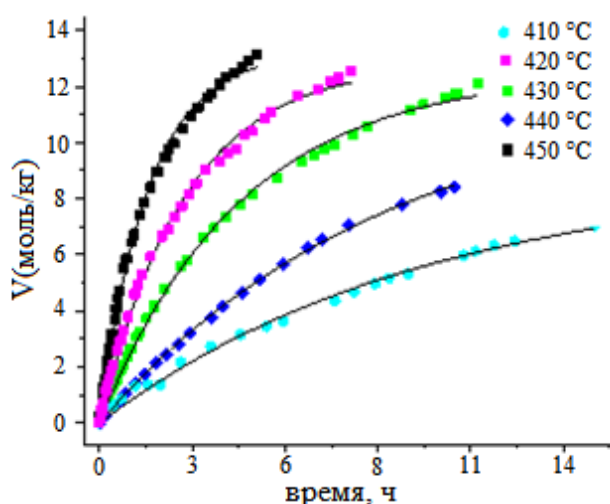


Рис. 6 - Изменение концентрации V газообразных продуктов реакции в опытах при различных температурах

Уравнение Аррениуса для скорости газовой выделения при разложении декана в паровой фазе при температурах 410 – 450 °С имеет следующий вид

$$k = (10 \pm 0,11)^{12,04} \exp((-52,23 \pm 0,38) \cdot 10^3 / RT), \text{ с}^{-1} \quad (4)$$

$$R = 1.987 \text{ кал/}(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Полученная энергия активации процесса термического разложения декана равна $52,23 \pm 0,38$ ккал/моль. Эти данные сопоставимы с данными других авторов.

Приведены результаты исследования термического разложения в газовой фазе образцов

полипропилена (ПП) и хлопчатобумажной ткани. Опыты проводились при температурах 420 и 430 °С. По результатам эксперимента определено, что кинетика термического разложения полипропилена при постоянной температуре может быть описана в виде уравнения первого порядка (кинетические кривые представлены на рис. 7а. Кинетические кривые, полученные при исследовании образца хлопчатобумажной ткани, представлены на рис. 7б. Как видно из графиков реакция протекает с высокой скоростью и имеет начальный участок характерный для автокаталитических реакций.

На основе проведенных исследований рекомендуется ограничить температуру продуктов газификации на выходе из реактора до 200-250 °С. При таком режиме выходящие из реактора смолы будут достаточно жидкие для стекания в смолосборники при конденсации, но при этом скорость их разложения (скорость образования коксового остатка) мала. При повышении температуры до указанных значений необходимо начинать захлаживание реактора, путем добавления дополнительного инертного материала. Температуру вспомогательного обогрева трактов рекомендуется держать не ниже 140 °С для нейтрализации патогенной среды и повышать с ростом температуры продуктов газификации для предотвращения обильной конденсации смол.

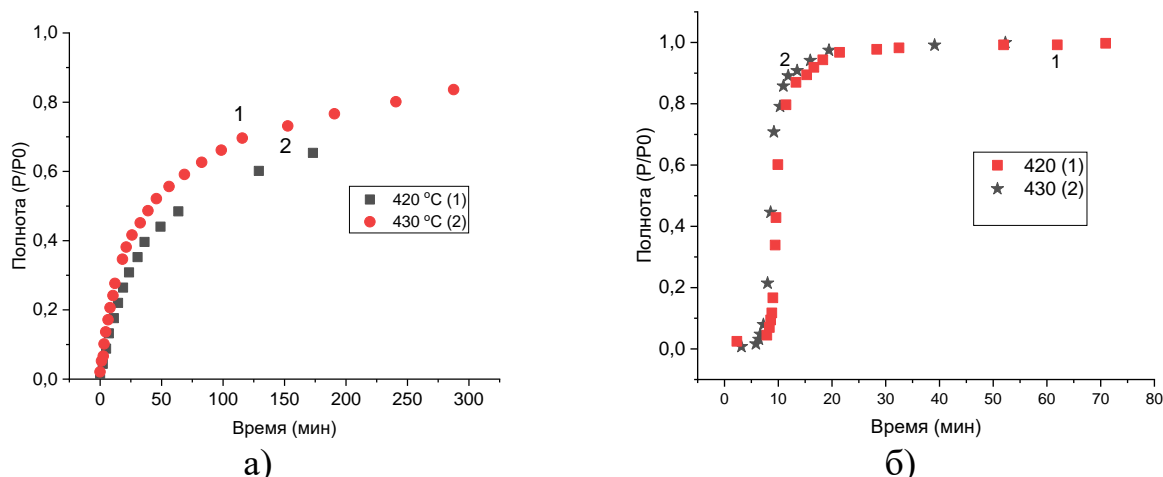


Рис. 7 - Кинетические кривые термического разложения полипропилена (а) и бинта (б)

Третья глава посвящена разработке математической модели противоточного вертикального газификатора для переработки МО с рециркуляцией генераторного газа. При создании математической модели приняты следующие допущения:

1. Реактор имеет идеальную теплоизоляцию, (адиабатическая стенка).
2. Высота реактора обеспечивает достаточный теплообмен (выравнивание температуры потока газа и потока твердых частиц) во всех зонах.
3. Время пребывания в реакторе веществ достаточно для полного протекания реакций.

Исходя из допущений справедливо рассматривать реактор-газификатор, как реактор, а уравнения для описания характеристик газификации МО выводить на основании материальных балансов. Для удобства математического описания, модель реактора разбивается на три зоны: зону сушки и пиролиза, зону газификации и зону остывания. Зона газификации моделируется как реактор полного смешения. Зона сушки и пиролиза и зона остывания описываются через балансовые уравнения тепла и массы. Для поддержания заданного режима и взаимосвязи зон используются три управляющих параметра: доля рециркуляции, расход воздуха и расход инертного материала.

Расчеты выполнены для стационарного режима при заданном расходе МО. Смешение реагентов в газификаторе принято идеальным. Температура в зоне горения принята равной 900 °C (минимизация плавления шлака), на выходе не менее 100 °C (вывод влаги из реактора).

В расчетах горючая фракция МО рассматривалась как смесь полипропилена (C_3H_6)_n в качестве модели пластика и целлюлозы ($C_6H_{10}O_5$)_n в качестве модели бумаги, текстиля. Массовые пропорции полипропилена и целлюлозы подобраны таким образом, чтобы теплотворная способность сухой массы модельной смеси была равна теплотворной способности среднего состава МО. Таким образом, 63% в модельной смеси приходится на целлюлозу, 20% на пластики. Оставшиеся 17% негорючего материала (зола) добавляются к инертному материалу при расчете. Теплотворная способность сухой массы МО составляет 23,3 МДж/кг.

Ниже приведен тепловой баланс по зонам реактора, по аналогичной схеме составлен и материальный баланс.

Тепловой баланс зоны сушки и пиролиза (подготовка топлива) определяется следующим уравнением:

$$(\mu_w^*c_w + \mu_m^*c_m + \mu_h^*c_h + \mu_d^*c_d)*(T_c - T_g) - (M_c^*c_c + M_a^*c_a + M_i^*c_i)*(T_c - T_0) = M_f^*Q_p + M_w^*Q_w + (M_w^*c_w + M_p^*c_p)*(T_g - T_0), \quad (5)$$

где, $\mu_w, \mu_h, \mu_m, \mu_d$ - массовые расходы, водяного пара, H_2 , CO , CO_2 , кг/с; T_0, T_c и T_g - начальная (комнатная) температура, температура сгорания и температура генераторного газа на выходе из реактора, К; $M_c, M_p, M_f, M_w, M_a, M_i$ - массовый расход кокса, газов пиролиза, горючей массы МО, влаги в МО, золы в МО, инертного материала, кг/с; Q_w, Q_p - теплота испарения воды, энтальпия реакции пиролиза, Дж/кг; c - теплоемкость (индексы w, h, m, d, n, i, a, o и p относятся к воде, H_2 , CO , CO_2 , N_2 , инертному материалу, O_2 , и пиролизному газу соответственно), Дж/(кг·К).

Тепловой баланс в зоне конверсии имеет форму равенства суммы энтальпий воздуха, кокса, твердых негорючих веществ и генераторного газа, поступающих в зону горения, каждый со своей температурой (соответственно: T_c , и T_g), сумме энтальпий синтез-газа и твердых негорючих веществ, которые покидают зону горения, имея температуру (T_c).

$$M_n^*H_n(T_c) + M_o^*H_o(T_c) + M_i^*H_i(T_c) + M_a^*H_a(T_c) + M_c^*H_c(T_c) + \alpha m_w^*H_w(T_g) + \alpha M_p^*H_p(T_g) + \alpha \mu_h^*H_h(T_g) + \alpha \mu_d^*H_d(T_g) + \alpha M_p^*H_p(T_g) + \alpha M_w^*H_w(T_g) = \mu_w^*H_w(T_c) + \mu_m^*H_m(T_c) + \mu_h^*H_h(T_c) + \mu_d^*H_d(T_c) + M_i^*H_i(T_c) + M_a^*H_a(T_c), \quad (6)$$

где M_n, M_o - массовый расход азота и кислорода, кг/с; α - доля рециркуляции газообразных продуктов; m_w - расход водяного пара из пиролизного газа, кг/с; $H_j(T) = H_j^0 + c_j^*(T - T_0)$, где H_j^0 стандартная энтальпия образования Дж/(кг·К), c_j - удельная теплоемкость.

Твердые частицы из зоны горения, т.е. керамические шары и зола МО, выходят из зоны горения при ее температуре. Твердые частицы постепенно отдают свое тепло восходящему потоку воздуха. Предполагается, что поток керамических шаров регулируется таким образом, чтобы обеспечить равенство средней теплоемкости потока материала, выходящего из зоны газификации, величине средней теплоемкости потока подаваемого воздуха.

$$M_n^*c_n + M_o^*c_o = M_i^*c_i + M_a^*c_a. \quad (7)$$

Элементный состав и теплота сгорания продуктов термического разложения определялись из результатов экспериментов.

Процесс в зоне сжигания/газификации описан как преобразование газов рециркуляции и кокса в синтез-газ путем частичного окисления в противоточном движущемся слое гранулированного теплоносителя.

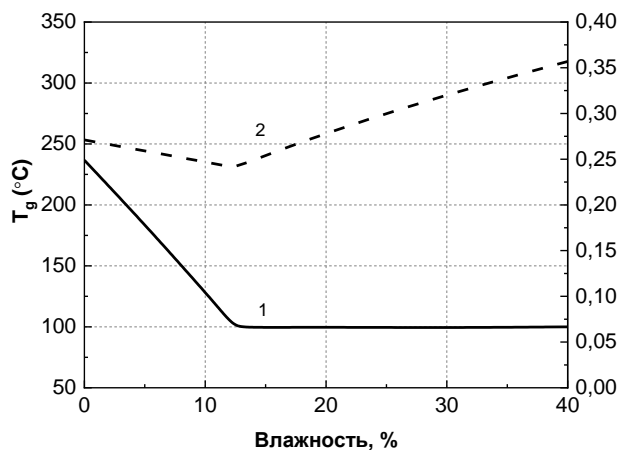


Рис. 8 - Зависимости температуры синтез-газа T (1) и доли рециркуляции генераторного газа α (2) от влажности МО

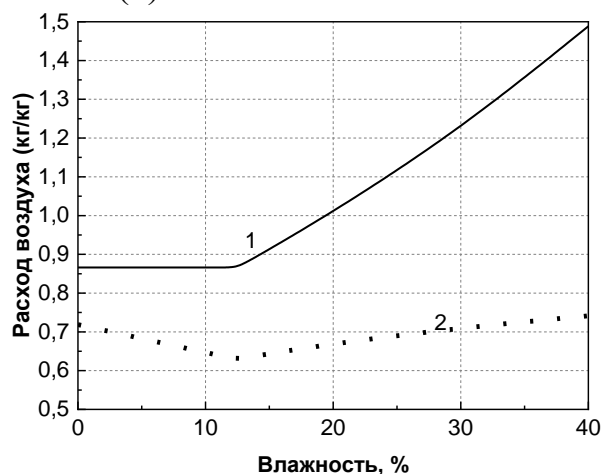


Рис. 9 - Зависимости расхода воздуха от влажности МО относительно горючей массы (1) и относительно общей массы (2)

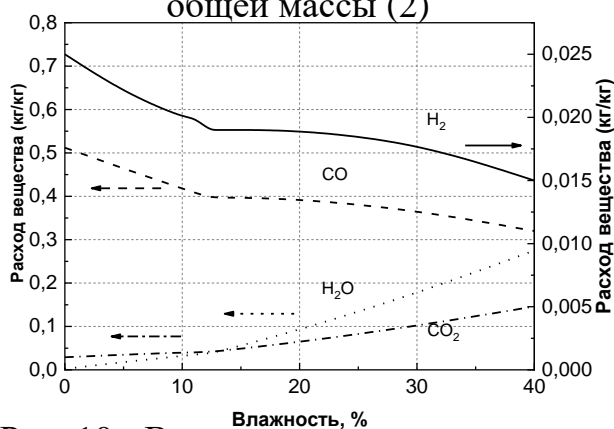


Рис. 10 - Выход компонентов синтез-газа в кг на кг общей массы МО в зависимости от влажности МО.

Расход твердых негорючих веществ рассчитывается по тепловому балансу зоны сушки таким образом, чтобы обеспечить равенство (7). Это обеспечивает наилучшую рекуперацию тепла и максимальную энергоэффективность газификации.

Проведена оценка влияния влажности на основные управляющие параметры: расход воздуха, расход инертного материала и долю рециркуляции (рис. 8). При расчетах влажность поступающих МО варьировалась от 0 до 40 мас.%. Показано, что при низкой влажности (ниже 15%) температура синтез-газа оказывается выше 100°C . Расход воздуха относительно расхода горючей массы (рис. 9) в пределах этого диапазона влажности остается постоянным и равным расходу, необходимому для полного окисления кокса. Рециркуляция в этом диапазоне уменьшается поскольку с повышением влажности газ становится холоднее и содержит больше пара (требуется меньшее его количество для поддержания температуры в зоне газификации путем захлаживания).

На рис. 10, показано, что качество газа (удельный выход горючих продуктов) на выходе из зоны газификации снижается с увеличением влажности МО. Температура сгорания генераторного газа на выходе из реактора также снижается с увеличением влажности МО, тем не менее, при влажности до 40% адиабатическая температура сгорания (на рис. 11, расчет представлен для воздуха с температурой 20°C) остается достаточно высокой для

обеспечения автотермичности реактора, поскольку воздух поступает в зону газификации с высокой температурой, что обеспечивается уравнением (7).

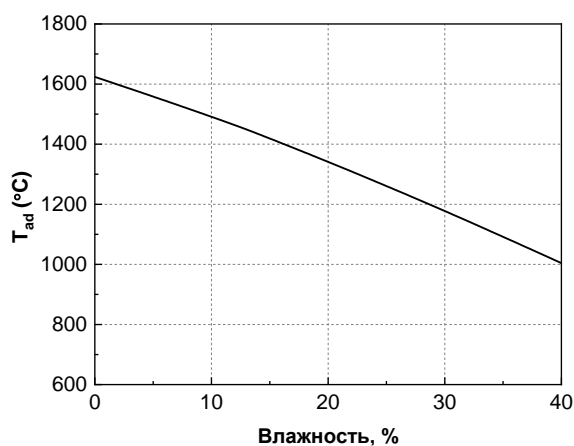


Рис. 11 - Адиабатическая температура стехиометрического сгорания генераторного газа (T_{ad}) при дожигании в

Представленные в главе расчеты показывают, что при расчетном составе МО могут быть эффективно газифицированы с использованием выбранного режима. В широком диапазоне влажности МО процесс остается устойчивым с точки зрения автотермичности.

Четвертая глава посвящена численному моделированию газодинамической картины смешения реагентов в зоне газификации. В качестве подхода было выбрано связанное моделирование методом вычислительной гидродинамики (CFD; Computational Fluid Dynamics) и методом дискретных элементов (DEM; Discrete Element Method).

Допущения, принятые при

моделировании:

1. Расчет выполнялся в нестационарной постановке до достижения установившегося режима течения газа. Ввиду этого, фронт газификации в модели определяется по линии расходования окислителя, а не температурному профилю.
2. Расчетная область ограничена зоной смешения (подвод топлива в слой).
3. Стенка реактора принимается как адиабатическая.
4. Поскольку целью моделирования является получение профиля фронта газификации, справедливо упростить многостадийный механизм конверсии до одной суммарной реакции полного окисления.
5. Слой твердой фазы принят неподвижным. Топливо - этанол (C_2H_5OH) (стандартное топлива для работы на используемой установке).
6. Не моделируются процессы качения, адгезии, абразивного износа, дробления частиц, а также теплообмен между частицами и между частицами и стенкой.

Моделируется участок (рис. 12), представляющий наибольший интерес, а именно зона высотой 100 мм и диаметром 66 мм, включающая зону ввода реагентов и формирования фронта газификации. Ввод этанола, как и в эксперименте, осуществляется через два симметрично расположенных патрубка с диаметром 1 мм и заглублением 15 мм. Дискретизация области осуществлялось с использованием неструктурированной полигексаэдральной сетки. Общее количество элементов составило 4 миллиона. Размер ячейки в CFD-модели составляет 0.5 мм, общее количество ячеек в модели – 4 миллиона. Выбранный размер ячейки обусловлен тем, что он должен быть кратно меньше частицы (диаметр 6 мм) для корректного распределения свойств дискретной фазы в объеме при их переносе из DEM в CFD-модели и необходимости разрешения градиентов концентраций в течениях у стенок.

В качестве математической основы для моделирования газовой фазы используется полная система уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу. Для замыкания системы используется стандартная двухпараметрическая k - ε модель турбулентности. Для описания химического превращения этанола использована одностадийная реакция полного окисления. Исходя из принятых допущений, кинетика химического превращения рассчитывается по диффузионной модели.

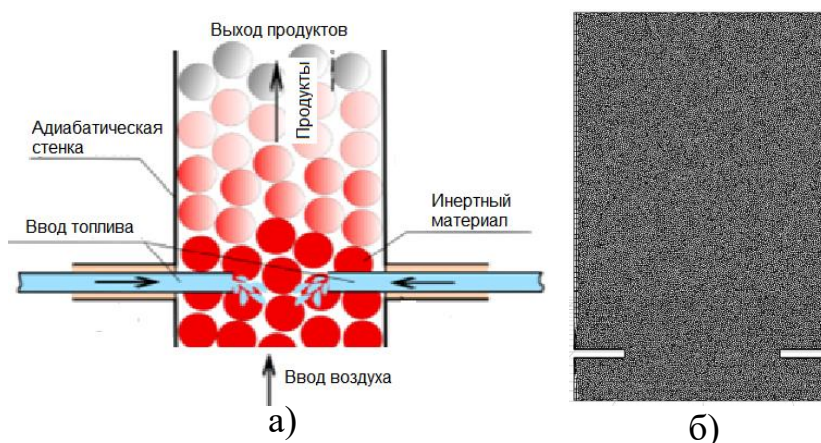


Рис. 12 – Схема моделируемой зоны (а) и расчетная область (б)

Физическая суть метода DEM заключается в описании поведения каждой отдельной частицы на основе законов Ньютона-Эйлера. Для этого рассчитываются траектории всех частиц. Ключевым элементом модели является описание контактных взаимодействий между частицами и частицами и стенкой. Для этого используется неупругая модель контакта с учетом нормальных и тангенциальных сил, что позволяет реалистично смоделировать плотный фильтрующий слой. Взаимодействие между фазами определяется через аэродинамическое сопротивление. Для расчета силы взаимодействия частиц и газа используется модель Гидаспова.

Граничные условия были заданы в соответствии с режимными параметрами эксперимента. На входных границах для реагентов использовалось условие I рода (вектора скорости направлены по нормали к плоскостям с равномерным распределением значений по сечению; для концентрации реагентов заданы массовые доли). На выходе задано условие II рода для скорости и условия I рода для температуры и концентрации. На стенках заданы условия прилипания для скорости и условие адиабатической стенки. Параметры граничных условий сведены в таблицу 1.

Температура потоков принята равной 900 К, что соответствует температуре инертного теплоносителя в стационарном режиме работы реактора в эксперименте. Это исключает необходимость моделирования, не связанного с реакцией теплообмена в нижней части реактора. Также задание температуры 900 К для топлива соответствует быстрому испарению в непосредственной близости от ввода. Явное моделирование этого фазового перехода потребовало бы значительного усложнения модели.

Таблица 1 – Параметры, заданные на границах модели

Граница	Параметр
Ввод топлива	($m=0.174$ г/с, $T=900$ К, $c(C_2H_5OH)=1$)
Ввод воздуха	$m=0.72$ г/с, $T=900$ К, $c(O_2)=0.23$, $c(N_2)=0.23$,
Выход	$p=100$ Па (изб.), $T=900$ К (для обратных токов)
Стенки	$V=0$, $dT/dn=0$

В ходе эксперимента осуществлялся отбор проб газа по центру реактора и вблизи стенки реактора. Как видно из таблицы 2, наблюдается неравномерность состава газа по сечению реактора. В центральной части реактора состав продуктов отвечает более богатой смеси – наблюдаемые значения α на 20-30% ниже среднего значения, а в пристеночной области продукты соответствуют более бедной смеси (α на 15-20% выше среднего значения). Неравномерность сохраняется и при других расходах топлива и окислителя.

Таблица 2 – Параметры конверсии этанола и состав газообразных продуктов

Gair, л/с	Geth, г/с	Способ отбора	Состав газообразных продуктов, об.%						α
			CO ₂	N ₂	CO	C ₂ H ₄	CH ₄	H ₂	
0.6	0.174	Центр	9.88	66.45	8.40	3.05	4.64	6.75	0.41
		У стенки	11.50	72.57	5.79	1.96	2.85	4.49	0.54
		Среднее	11.16	71.14	6.03	2.01	3.14	5.70	0.52

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных осуществлялось по положению фронта газификации. Для эксперимента за профиль газификации принимается полученный в результате тепловизионной съемки профиль температур. Для результатов моделирования, исходя из принятых допущений, фронтом является зона расходования кислорода (рис. 13).

И для эксперимента, и для модели можно выделить две характерные зоны (рис. 13). Первой является зона, где реакции идут в районе стенки реактора, что характеризуется более высокой температурой для эксперимента и положением линии, в пределах которой расходуется кислород при моделировании (хорошо видно в плоскости перпендикулярной вводу). Как вторую зону можно выделить область пристеночного течения кислорода (явна видна в плоскости параллельной вводу. Заметно, что пристеночный слой течения кислорода в перпендикулярной вводу топлива плоскости тоньше, чем в параллельной, этим можно объяснить более высокую температуру в зоне 1 (рис. 13а).

Результаты численного моделирования качественно согласуются с экспериментальными результатами по сопоставлению профиля смещения, полученного при численном моделировании, и профиля температур, полученного в эксперименте.

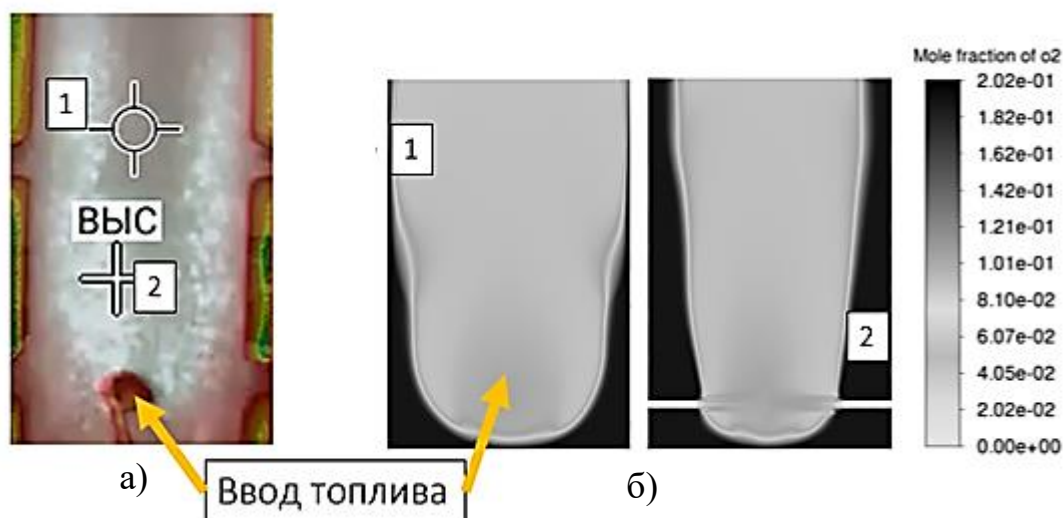


Рис. 13 – Тепловой профиль во время эксперимента (белый цвет соответствует наивысшей температуре) (а) и профили концентрации кислорода в модели (разрез по оси) (б), где 1 – зона пристеночной реакции; 2 – зона пристеночного тока окислителя

При проектировании число вводов должно исключать ассиметричное смешение, степень заглубления необходимо выбирать в диапазоне от 0,1 до 0,2 от радиуса, также возможно решение с вводом под наклоном навстречу потоку. Первичную оценку можно проводить путем численного моделирования с применением предложенного подхода.

На основании этих рекомендаций разработан трехмерный технический облик реактора (рис. 14). Все геометрические размеры, а также количество линий рециркуляции, фурм, их наклон и т.д. можно задавать через управляющий файл. Данный облик используется для проработки первичных эскизных проектов и создания численных моделей для решения задач газодинамики.

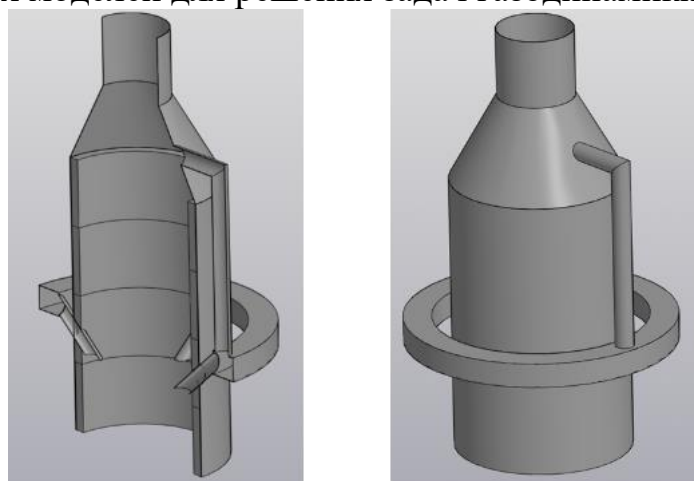


Рис. 14 - Трехмерный вид реактора с рециркуляцией

Для биобезопасности реактор должен быть герметичным, работать под разрежением, иметь узлы для прожига/обработки паром и проходить дезинфекцию перед ремонтом.

Основные результаты и выводы

1. Установлены критические параметры проектирования газификаторов МО: время термической обработки более 30 мин. при температуре свыше 140 °С для деструкции патогенов; необходимость дополнительных параметров для регулирования в условиях гетерогенности МО; при высоком содержании хлора необходимо предусматривать способ подавления ПХДД/ ПХДФ.

2. Получены данные для моделирования процесса пиролиза МО (результаты технического и элементного анализа; количественная оценка по выходу продуктов пиролиза и их элементному составу в зависимости от температуры) и для оценки образования смолистых отложений в трактах (результаты ТГ-анализа и кинетических исследований на манометрической установке).

3. Создана зональная балансовая модель тепловых процессов в ректоре-газификаторе с рециркуляцией продуктов газификации, демонстрирующая возможность и эффективность утилизации МО в таком реакторе:

- выбраны основные режимные параметры: -температура газификации 900 °С; -температура продуктов на выходе >100 °С -расход воздуха должен обеспечивать стехиометрическое сгорание фиксированного углерода; -расход инертного материала должен обеспечивать баланс теплоемкостей потоков, соответствующий режиму с максимальной рекуперацией.

- показано, что выбранные режимные параметры обеспечивают работу в широком диапазоне влажности МО в автотермическом режиме.

- доказана осуществимость процесса при варьировании влажности МО от 0 до 40% за счет регулирования доли рециркуляции, расхода воздуха и инертного материала.

4. Показано, что предложенный метод численного моделирования фронта газификации в зоне узла ввода топлива в зернистый слой материала позволяет оценивать смешение подаваемых продуктов газификации с воздухом.

Перспективы дальнейшей разработки имеют следующие направления:

- на основе разработанной в работе балансовой модели разрабатывается одномерная модель рассматриваемого реактора, учитывающая теплообмен и кинетику реакций;

- установление количественной связи между скоростью подачи, количеством, конструкцией и конфигурацией фурм, и степенью смешения потоков;

- использование предложенного метода моделирования смешения и разработанного трехмерного облика для создания автоматизированной системы проектирования узла фурм для разных габаритов реактора;

- разработка эскизного проекта реактора-газификатора в составе установки для обезвреживания МО.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки

1. А. Ю. Зайченко, Д. Н. Подлесный, Е. В. Полианчик, Г.А. Тарасов и др. Окислительная конверсия этанола в синтез-газ в реакторе с подвижным слоем

инертного теплоносителя. Влияние газодинамических факторов /// Химическая физика. – 2025. – Т. 44, № 7. – С. 15-25.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и WoS

2. Gerasimov G., Khaskhachikh V., Kornilieva V., **Tarasov G.** Study of pyrolysis of components and mixture of medical waste // Chemical Engineering Transactions. – 2019. – Vol. 76. – P. 1423-1428.

3. **Tarasov G. A.**, Molokanov A. A., Plishkin N. A., Kazakov A. I., Varlamova N. I., Yanovskiy L. S., Larikova T. S. A complex of manometric methods for studying thermophysical, thermochemical properties and thermal stability of energy-intensive compounds // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1891. – Art. No. 012001.

4. Зройчиков Н.А, Фадеев С.А, Двоскин Г.И, Дудкина Л.Д, Корнильева В.И, **Тарасов Г.А.** Предварительная дегалогенизация хлорсодержащих медицинских отходов // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 9. – С. 4-9.

5. Polianczyk E., Tarasov G., Zaichenko A. Gasification in the filtration combustion mode for disposal of medical waste with heat generation // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 474. – Art. No.01013

Свидетельства на результаты интеллектуальной деятельности

6. Установка для утилизации твердых хлорсодержащих медицинских отходов : полезная модель к пат. 190915 U1 Рос. Федерация : МПК F23G 5/027, A61L 11/00, C08J 11/20, B29B 17/00 / Бирюков Я. А., Двоскин Г. И., Зройчиков Н. А., **Тарасов Г. А.**, Фадеев С. А. ; патентообладатель Акционерное общество "Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского" (АО "ЭНИН"). – № 2019112630 ; заявл. 25.04.2019 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.

7. Способ и устройство для исследования процесса термического разложения органических материалов : пат. 2721617 C1 Рос. Федерация : МПК F23G 5/027, G01N 1/22 / Двоскин Г. И., Бирюков Я. А., Зройчиков Н. А., **Тарасов Г. А.**, Фадеев С. А., Пай А. В. ; патентообладатель Акционерное общество "Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского" (АО "ЭНИН"). – № 2019111677 ; заявл. 18.04.2019 ; опубл. 21.05.2020, Бюл. № 15.

Подписано в печать _____ 2025_ г. Зак. _____ Тир. 50. П.л. 2,5.
 Типография МЭИ, Красноказарменная ул., д. 13, стр. 4