

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

Швец Анатолий Сергеевич

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
КОМПОЗИЦИОННОЙ БИОМАССЫ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ
НАГРЕВЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Работа выполнена в Научно-образовательном центре И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией теплопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Официальные оппоненты:

Салганский Евгений Александрович

доктор физико – математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горения в высокоскоростных потоках федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН

Богомолов Александр Романович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики Института энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»

Защита состоится 19 декабря 2024 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR – кода.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.18
кандидат технических наук, доцент



Табакаев Роман Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы многие предприятия деревоперерабатывающей и сельскохозяйственной отраслей промышленности в мире сталкиваются с существенным увеличением объемов формируемых отходов. Это обусловлено ростом темпов производства продукции вследствие повышения численности населения. В то же время повышается спрос на тепловую и электрическую энергию, продукты с высокой добавленной стоимостью из возобновляемых источников. Но пока более 85% мирового спроса в энергии обеспечивается с применением углеводородных топлив. Развитие возобновляемых источников энергии имеет жизненно важное значение для снижения выбросов парниковых газов, обеспечения суверенитета и надежности энергетических систем. Одной из наиболее важных проблем для развивающихся стран является обеспечение доступа к довольно большим энергетическим потокам в сельских районах, не подключенных к централизованным системам. Один из способов решения выделенной проблемы – использование биомассы в качестве основного и/или дополнительного источника энергии. Типичными примерами биомассы являются: отходы деревообрабатывающей промышленности, опад (листья, веточки, хвоинки, кора), торф, некоторые виды растений и агрокультур. Известные примеры производства газообразных, твердых и жидких топлив из биомассы позволяют выделить их экологические, социальные и экономические преимущества. В частности, экологическими преимуществами являются пониженные выбросы парниковых газов, полезные изменения в землепользовании, биоразнообразии. В социальном плане наиболее важными являются развитие сельских районов, а также утилизация агропромышленных отходов. Экономическим преимуществом является рентабельность инвестиционных проектов по производству биоэнергии с учетом удаленности централизованных систем и специфических климатических условий.

В области термической конверсии биомассы и промышленных отходов наиболее значимые результаты получены известными специалистами: Алексеенко С.В., Аньшаков А.С., Баранова М.П., Богомоллов А.Р., Бурдуков А.П., Ведрученко В.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Горлов Е.Г., Дектерев А.А., Делягин Г.Н., Дзюба Д.А., Заворин А.С., Зайченко А.Ю., Заостровский А.Н., Козлов А.Н., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Кузнецов Г.В., Кулагин В.А., Ларионов К.Б., Любов В.К., Мальцев Л.И., Мессерле В.Е., Моссэ А.Л., Мостовщиков А.В. Мурко В.И., Няшина Г.С., Овчинников Ю.В., Осинцев В.В., Пак А.Я., Патраков Ю.Ф., Попов В.И., Пузырев Е.М., Рыжков А.Ф., Салганский Е.А., Саломатов В.В., Свищев Д.А., Стрижак П.А., Сыродой С.В., Табакаев Р.Б., Тугов А.Н., Устименко А.Б., Федорова Н.И., Федяев В.И., Ходаков Г.С., Чернецкий М.Ю., Шарыпов О.В., Veneroso D., Brodie G., Gajewski W., Hu B., Kefa C., Kijo-Kleczkowska A., Kim S.H., Lee C.H., Liu J., Liu H., Luo J., Lei H., McKendry P., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Salema A., Svoboda K., Wang H., Zhou R., Zhu M. и др. Неизученными в полной мере остаются процессы термической конверсии композиционной биомассы при микроволновом нагреве. Для ускоренной переработки с меньшими затратами лигноцеллюлозного сырья целесообразно использовать термохимические методы конверсии. Микроволновый нагрев с целью термического разложения имеет преимущества: бесконтактный, селективный и объемный с высокими темпами; быстрое иницирование и останов процессов; высокий уровень безопасности

и автоматизации. Развитие системы непрерывного микроволнового нагрева для интенсификации термического разложения является основным направлением исследований вследствие перспективности технологии валоризации отходов переработки биомассы. Для повышенной производительности необходимо иметь прогностический математический аппарат, позволяющий оптимизировать размеры реакторов. Перевод систем микроволнового нагрева для термического разложения отходов биомассы от периодического режима к непрерывному обеспечит повышенные скорости конверсии при меньшем потреблении энергии. Пока не разработаны научные основы технологий микроволнового нагрева композиционной (с учетом синергетических эффектов от совместного использования различного сырья) биомассы для получения генераторного газа, как энергоресурса с повышенными экологическими, экономическими и технологическими характеристиками. Данная проблема мотивировала диссертационное исследование.

Цель диссертационной работы – определение по результатам экспериментальных исследований, стендовых испытаний и численного моделирования необходимых условий и интегральных характеристик микроволнового нагрева композиционной биомассы для интенсификации ее термического разложения, направленного на получение генераторного газа в реакторе с учетом взаимного влияния исходного сырья.

Для достижения сформулированной цели решались задачи:

1. Разработка экспериментальной методики, создание лабораторного и испытательного стендов, планирование и проведение исследований с целью установления совокупности основных входных параметров, влияющих на характеристики термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве.
2. Определение номенклатуры и допустимых концентраций перспективных компонентов биотоплива для обеспечения эффективной термической конверсии при микроволновом нагреве.
3. Изучение механизма и закономерностей термического разложения композиционной биомассы с применением перспективных схем подвода энергии в условиях микроволнового нагрева.
4. Регистрация интегральных характеристик процесса термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве: время задержки и длительность выхода летучих компонентов, необходимый критический тепловой поток, оптимальный темп нагрева, минимальные и максимальные концентрации компонентов генераторного газа, доля твердого остатка и жидкого продукта.
5. Определение по результатам экспериментов и стендовых испытаний влияния основных входных параметров (мощность СВЧ-излучения, дисперсность частиц биомассы, влажность материала, структура слоя навески, длительность воздействия СВЧ-излучения, компонентный состав биомассы, состав парогазовой смеси в реакторе и др.) на характеристики (продолжительность термического разложения, концентрации компонентов генераторного газа и др.) и критические условия физико-химических процессов.
6. Разработка физической и математической моделей, описывающих процесс термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве.

7. Проведение параметрических исследований с целью установления характеристик термического разложения биомассы при варьировании значений технологических параметров в диапазонах, соответствующих промышленным реакторам.
8. Формулирование обобщенных критериальных выражений и сравнительный анализ эффективности процесса термического разложения композиционной биомассы в разногабаритных реакторах.
9. Разработка схем микроволновых реакторов для термического разложения композиционной биомассы с учетом полученных результатов экспериментов, математического моделирования, стендовых испытаний и аналитических расчетов.
10. Разработка рекомендаций по применению результатов диссертационных исследований для развития технологий термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве в промышленных реакторах.

Научная новизна работы. Установлены характеристики и необходимые пороговые условия микроволнового нагрева композиционной биомассы для наиболее полного термического разложения сырья с получением повышенных концентраций компонентов генераторного газа за счет синергетических эффектов. Определены зависимости интегральных характеристик, в частности, времени задержки, длительности термического разложения, концентрации компонентов генераторного газа от совокупности входных параметров. На основании результатов экспериментальных исследований и стендовых испытаний разработана физическая и математическая модели термического разложения композиционной биомассы. Применение разработанных моделей позволило установить зависимости характеристик исследованного процесса от мощности микроволнового излучения в диапазонах, соответствующих промышленным реакторам.

Теоретическая значимость. Результаты выполненных экспериментальных исследований, стендовых испытаний и разработанные физические и математические модели представляют новые знания в области термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве. Экспериментальные данные являются основой для верификации математических моделей, алгоритмов численного решения задач термического разложения композиционной биомассы при разных параметрах микроволнового нагрева. Результаты математической обработки экспериментальных данных позволили установить функциональные связи выходных параметров с входными, которые позволяют выполнять разномасштабные параметрические исследования с варьируемыми свойствами и составом сырья.

Практическая значимость. Определены пороговые (необходимые для инициирования) и эффективные (по мультикритериальным оценкам) условия микроволнового нагрева для интенсификации термического разложения композиционных смесей на основе биомассы с учетом совокупности определяющих параметров, например, мощность СВЧ, структура слоя, состав и свойства материала, схема загрузки. Результаты исследований и прогностические модели целесообразно использовать на предприятиях топливно-энергетического сектора для расширения номенклатуры сырьевой базы, обеспечения получения генераторного газа с повышенными интегральными характеристиками, его использования в качестве основного и дополнительного источника энергии, улучшения экологической

обстановки вблизи объектов генерации тепловой и электрической энергии. Проведенные исследования позволили обосновать рентабельность применения микроволновых реакторов для получения генераторного газа при термическом разложении композиционной биомассы с применением различных газифицирующих сред (воздух, пар, углекислый газ, их смесь). Разработаны схемы микроволновых реакторов непрерывного действия. На основе экспериментальных данных, результатов испытаний и моделирования рассчитаны необходимые и достаточные значения параметров работы реакторов для обеспечения эффективного термического разложения композиционной биомассы.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов диссертационных исследований подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов опытов при идентичных начальных значениях основных параметров, использованием малоинерционных и высокоточных программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других исследователей в ряде примеров.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования режимов и критических условий микроволнового нагрева композиционной биомассы выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект программы БРИКС № 19-53-80019, выполненный сотрудниками Лаборатории теплопереноса ТПУ совместно с коллегами из Индии и Бразилии). Мультикритериальный анализ эффективности систем термической конверсии смесевых составов с учетом экономических, энергетических, экологических, эксплуатационных и иных параметров проводился в рамках исследований по проекту Приоритет-2030-ЭБ-018-202-2024. Тематика исследований соответствует приоритетному направлению СНТР РФ: «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. В идентичных условиях микроволнового нагрева концентрации основных компонентов генераторного газа (CO , CH_4 , H_2) при термическом разложении соломы выше на 25–85%, чем в опытах с другими видами биомассы (листья березы, сосновые, кедровые и березовые опилки). Определяющую роль играет наименьшее значение CO_2 , зафиксированное для композиционной биомассы (ниже на 44–48 % по сравнению с другим сырьем). За счет воспроизведения установленных в опытах синергетических эффектов при термическом разложении композиционной биомассы можно воспроизводить условия для гибкого управления составом генераторного газа в энергетических системах.
2. Варьирование схемы расположения биомассы в тигле реактора показало, что концентрации H_2 при равномерном распределении навески по всей поверхности основания тигля увеличились с 29% до 50%, CO – с 38% до 50%. Концентрации диоксида углерода меньше в 2.5–3 раза по сравнению со схемой, при которой

биомасса размещена на 50% поверхности тигля. Создание на поверхности биомассы искусственных каналов пористости позволяет увеличить выход H_2 и CO в 2–3 раза. Установленные закономерности позволяют повысить эффективность термической конверсии биомассы на энергетических предприятиях.

3. Увеличение доли влаги в образце композиционной биомассы с 25 % до 75 % способствует снижению концентраций компонентов генераторного газа. Концентрации CO , CO_2 , CH_4 и H_2 уменьшились на 62–65%, 60–64%, 46–50% и 51–55%, соответственно. Поддержание повышенной концентрации пара в реакторе сдерживает термическое разложение композиционной биомассы. Установлены оптимальные соотношения влаги в навеске и водяного пара в газифицирующей среде, а также дополнительно введенного в объем реактора CO_2 для получения генераторного газа с повышенными концентрациями CO , CH_4 и H_2 .
4. При повышении мощности микроволнового излучения с 840 Вт до 2200 Вт выход CO увеличился в 4 раза, H_2 – в 8 раз, CH_4 – в 3 раза. Масса твердого остатка снизилась на 80–85%. При выборе мощности СВЧ-излучения в промышленных реакторах целесообразно учитывать значения относительных показателей эффективности микроволнового термического разложения сырья в теплогенерирующих реакторах с учетом энергетических, экологических, экономических и технологических индикаторов.
5. Разработаны физическая и математическая модели термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве, отличающиеся от известных учетом одновременного влияния совокупности основных процессов теплопереноса, фазовых превращений и химического реагирования в реакторе. Выполнены параметрические исследования, позволившие установить интегральные характеристики термического разложения биомассы в широких и типичных для промышленных реакторов диапазонах варьирования входных параметров (мощность СВЧ, время нагрева, тип тигля, влажность биомассы, её расположение на поверхности тигля и др.).
6. Разработаны схемы микроволновых реакторов для реализации термической конверсии композиционной биомассы. Результаты выполненных технико-экономических расчетов использованных реакторов обосновывали эффективность систем микроволнового нагрева для термической конверсии композиционной биомассы в энергетических установках различной производительности.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, проведении опытов и расчетов, обработке результатов экспериментальных и теоретических исследований, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций практического использования полученных результатов, формулировке положений и выводов. Разработка методик измерений, физических и математических моделей, анализ и обобщение результатов, подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем. Автор диссертации выражает благодарность коллективу Лаборатории теплопереноса ТПУ за помощь в проведении экспериментов и испытаний.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований апробированы в виде докладов на конференциях: XV Всероссийская (VII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов, и молодых ученых «Энергия – 2020» (г. Иваново, 7-10 апреля 2020 года); XXVII Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (г. Екатеринбург, 2-7 апреля, 2023 года); XXVI международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 3-7 апреля 2023 года); I Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика – 2023» (г. Красноярск, 28-31 марта 2023 года); международная научно – практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023» (г. Севастополь, 18-21 сентября 2023 года); XVIII Всероссийская (X Международная) научно-техническая конференция «ЭНЕРГИЯ – 2023» (г. Иваново, 16-18 мая 2023 года); XXVIII международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 1-3 апреля 2024 года); IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли» (г. Ижевск, 11-12 апреля 2024 года).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 3 – в журналах из списка ВАК РФ: «Кокс и химия» (Coke and Chemistry), «Инженерно-физический журнал» (Journal of Engineering Physics and Thermophysics). Опубликовано 6 работ в международных рецензируемых изданиях, индексируемых «Scopus» и «Web of Science»: «Journal of Analytical and Applied Pyrolysis» (Q1), «Energies» (Q1), «Applied Sciences» (Q2), «Waste to Profit: Environmental Concerns and Sustainable Development». Подготовлены заявки на патентование концептуальной технологической схемой организации термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве, лабораторного и испытательного стендов для проведения исследований в области термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве. Подготовлена заявка на получение свидетельства на программу для ЭВМ, позволяющую прогнозировать времена задержки термического разложения и выхода компонентов генераторного газа, рассчитывать параметры для оптимизации процесса термического разложения биомассы при микроволновом нагреве.

Акты и заключения об использовании результатов исследований. Результаты проекта используются в образовательном процессе при подготовке студентов, магистрантов и аспирантов НИ ТПУ, а также при проведении научно-производственных работ на предприятиях г. Томска, Ижевска и Нефтеюганска.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков и 12 таблиц. Библиография включает 213 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований термического разложения биомассы, сформулированы нерешенные задачи в данной области, определены сложности, сдерживающие развитие технологий микроволнового нагрева композиционной биомассы с целью ее термического разложения.

Во второй главе приведены полученные результаты экспериментальных исследований характеристик и предельных условий микроволнового термического разложения композиционной биомассы. Представлено описание разработанных автором диссертации экспериментального и испытательного стендов (рисунки 1, 2) и методики проведения исследований, оценок погрешностей измерений, результатов исследования закономерностей и характеристик термического разложения биомассы. Обоснованы причины выбора состава композиционной биомассы и методик ее подготовки.

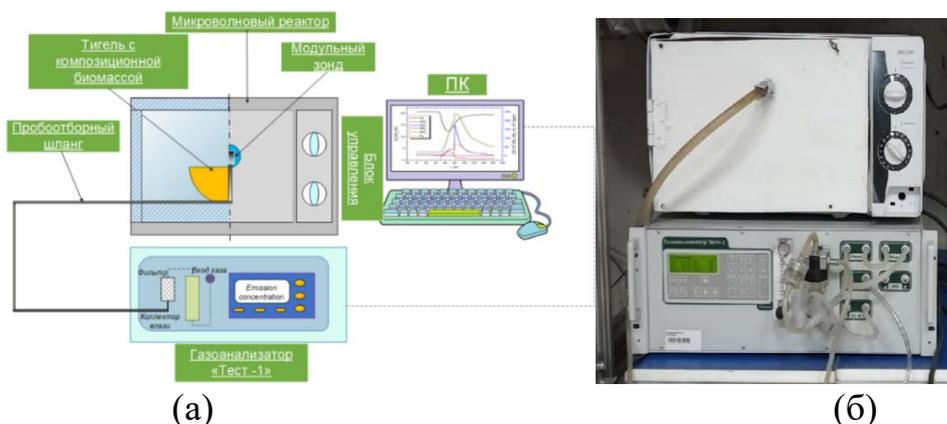


Рисунок 1 - Схема (а) и внешний вид (б) стенда мощностью 800 Вт.

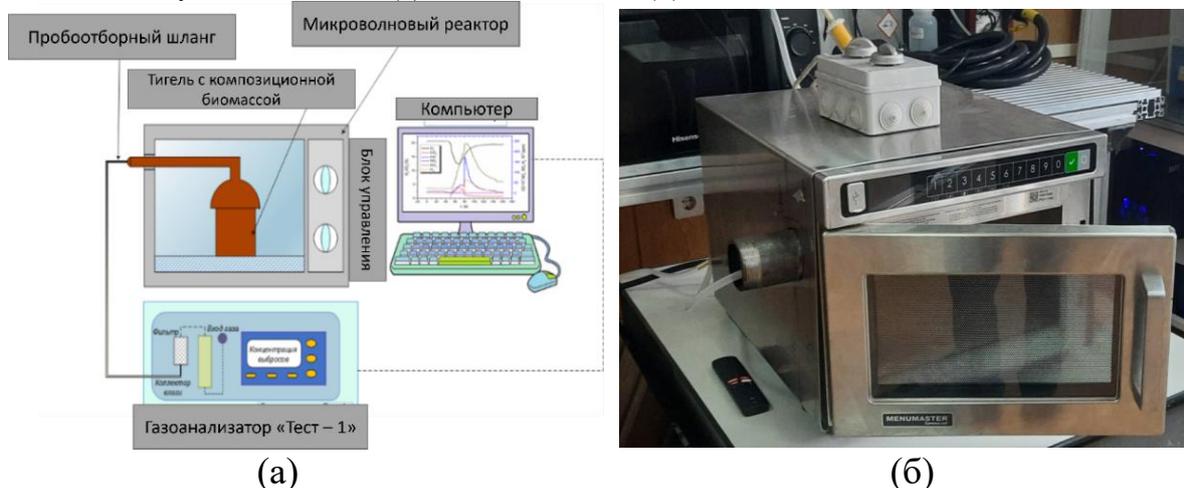


Рисунок 2 – Схема (а) и внешний вид (б) стенда мощностью 2200 Вт.

По результатам обобщения преимуществ и недостатков конструкций опытных установок спроектированы стенды для проведения диссертационного исследования. В камеру микроволнового реактора помещался тигель с образцом композиционной биомассы. Нагрев внутреннего пространства реактора осуществлялся с помощью микроволновых волн магнетрона. Блок управления реактором позволял регулировать мощность нагревателя в диапазоне от 200 Вт до 2200 Вт. После ввода образца в реактор дверца герметично закрывалась, в ней размещался газоотборный канал. Для стенда мощностью 800 Вт забор газовой пробы происходил непосредственно из

камеры реактора, для стенда мощностью 2200 Вт забор газовой пробы выполнялся из тигля, закрытого крышкой. Для измерения концентрации газов применялся газоанализатор Тест 1 («Бонэр»). Система включает: модульный зонд, конденсатосборник, элемент фильтрации пробы, вычислительный блок газоанализатора, внутри которого установлены побудитель расхода, капилляр, форкамера и измерительные электрохимические сенсоры O_2 , CO , SO_2 , NO_x , NO_2 , H_2S , HCl . Дополнительно газоанализатор Тест 1 оснащен оптическими сенсорами CO_2 , CH_4 и полярографическим сенсором H_2 . Газоанализатор Тест 1 подключался к компьютеру по интерфейсу RS 232.

При анализе концентраций компонентов генераторного газа принимались во внимание тренды от начала их выделения до завершения процесса. Рассчитывались средние значения концентраций по методу трапеций. Микроволновый нагрев выполнялся при нескольких схемах. Первая – до достижения максимального значения концентраций основных компонентов генераторного газа (CO , CH_4 и H_2). Как только концентрации основных компонентов генераторного газа начинали снижаться, магнетрон отключался. В дальнейшем процесс разложения завершался в течение длительного периода времени без подвода энергии. Вторая – выполнялось импульсное включение магнетрона до инициирования выхода CO_2 . Пока концентрации CO_2 были близки к нулевым, магнетрон работал. Как только начинал выделять углекислый газ в реакторе, магнетрон отключался. Данные схемы соответствуют разным режимам термической конверсии композиционной биомассы.

Проведенные диссертационные исследования показали, что на концентрации компонентов генераторного газа влияет совокупность факторов: свойства сырья,

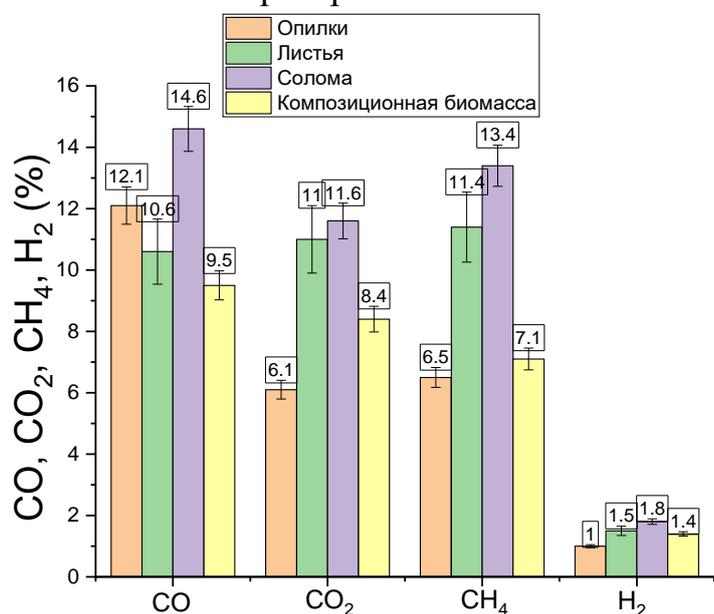


Рисунок 3 – Значения зарегистрированных концентраций компонентов генераторного газа при варьировании состава биомассы.

дисперсность частиц, влажность биомассы, темп нагрева, катализаторы, состав газифицирующей среды и др. Одними из основных параметров, влияющих на выход генераторного газа, являются состав и свойства биомассы.

Синергетические эффекты возможны при работе с композиционной биомассой, содержащей вещества с существенно отличающимся элементным составом и теплофизическими свойствами. В диссертационных исследованиях установлено влияние свойств биомассы на интегральные характеристики выхода и состав

генераторного газа при микроволновом нагреве. В соответствующих экспериментах нагрев проводился до достижения экстремума (максимума) по выходу компонентов генераторного газа. Далее процесс термического разложения протекал без подвода тепла от внешнего источника. В качестве образцов использовались листья березы,

солома, смесь опилок (кедровые 30 %, березовые 30 %, сосновые 30 %), смесь (солома 50 %, опилки 25 %, листья 25 %). Масса навески в этих опытах составляла 15 г. В диссертационной работе она варьировалась в диапазоне 5–50 г с целью выделения пороговых условий для фиксированного объема реактора и разных схем загрузки биомассы. Средние значения концентраций компонентов газовой смеси приведены на рисунке 3. Анализ полученных в ходе эксперимента данных показал, что в идентичных условиях нагрева при термическом разложении соломы концентрации СО выше (на 18–28 %), чем у других видов биомассы. Наименьшее значение СО₂ зафиксировано для опилок – около 6 %, что на 44–48 % меньше по сравнению с другими видами биомассы. При термическом разложении смеси концентрации горючих газов уменьшились в 1.5 раза по сравнению с отдельными компонентами. Выделены синергетические эффекты взаимного влияния компонентов биомассы на разложение друг друга, обусловленные смещением стадий реагирования гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина (им соответствуют разные пороговые температуры и скорости разложения). Также важную роль играют химические реакции между компонентами генераторного газа. При термическом разложении соломы зарегистрированы повышенные значения концентраций СО, СО₂, СН₄ и Н₂, составившие около 14%, 12%, 13%, 2%. Разница в концентрациях газов обусловлена составом биомассы, плотностью и содержанием летучих веществ. Применение биомассы с невысокой термической стабильностью (на примере листьев) приводит к быстрому разложению и выходу низкоэнергетических компонентов. Другие виды биомассы (опилки, солома) являются более стабильными и способными сохранять свою структуру во время микроволнового нагрева. Более стабильные виды биомассы являются предпочтительными для термического разложения в микроволновых системах. На характеристики генераторного газа влияет состав биомассы и поглощающая способность (к микроволновому нагреву).

С точки зрения экологических аспектов опилки являются наиболее перспективными для термической переработки, так как выделяется не только меньшее количество СО₂, но и опасного Н₂С (101 ппм), что в 1.4–2 раза меньше, чем выделяется при термическом разложении листьев и соломы. Биомасса с повышенным содержанием влаги требует больше энергии для испарения во время термического разложения. Эндотермический фазовый переход замедляет образование генераторного газа и повышает удельные энергетические затраты. Установлено, что на процесс термического разложения биомассы оказывает влияние схема расположения навески в тигле (рисунок 4). Обосновано, что концентрации СО при расположении образца композиционной биомассы на половине тигля увеличиваются почти в 2 раза по сравнению с расположением образца на периферии тигля (рисунок 4), и в 1.5 раза по сравнению с расположением образца по всей поверхности тигля в виде монослоя. Выделенные отличия концентрации компонентов генераторного газа обусловлены разной площадью контакта биомассы с поверхностью тигля и площадью свободной поверхности, которая определяет выход газа в объем реактора. Характеристики термического разложения образца при микроволновом нагреве также существенно зависят от структуры его поверхности, пористости и размеров, электромагнитных и тепловых параметров. Для интенсификации теплопередачи частицы биомассы целесообразно измельчать до мелких размеров. Они

агломерируют и уплотняют навеску. Однако при плотном расположении частиц энергия микроволн медленно проходит в глубинные слои навески биомассы, что снижает эффективность процесса ее термического разложения. Если биомасса расположена вблизи микроволнового излучателя, то это приводит к повышенной температуре и более интенсивному разложению. Данный фактор оказывает влияние на конечные продукты термического разложения. Важно обеспечивать равномерность прогрева слоев образца для повышения удельных характеристик разложения. Это можно обеспечить за счет варьирования схемы размещения навески в реакторе с учетом свойств исходного сырья. В частности, для образцов с пониженной долей летучих целесообразно применять распределенную систему подачи биомассы в реактор (размещение по периферии, секторами, кольцами и др.),

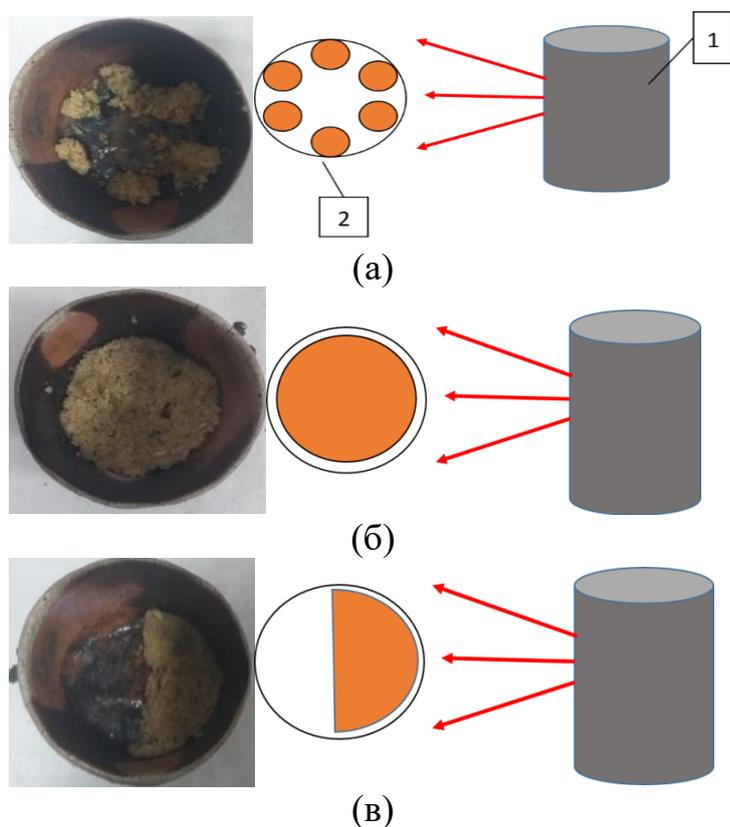


Рисунок 4 – Расположение биомассы в тигле: на периферии (а); равномерная насыпка по всей поверхности (б); на половине поверхности (в); магнетрон (1); биомасса (2).

в обратном случае достаточно применять слоевую загрузку. В диссертационной работе выполнены расчеты для прогнозирования рациональных условий загрузки композиционной биомассой реакторов с варьируемым объемом.

Микроволновый нагрев интенсифицирует прогрев глубинных слоев вследствие поглощения энергии микроволнового излучения. Поэтому необходимы навески с повышенной диэлектрической проницаемостью. В связи с этим в рамках диссертационных исследований воспроизведены условия интенсификации термического разложения композиционной биомассы с разной долей влаги. При микроволновом нагреве вода

интенсивно прогревается и испаряется. Вода и водяной пар интенсифицируют поглощение микроволнового излучения в слое навески и парогазовой смеси, соответственно. Доля воды в навеске должна быть сбалансирована с учетом доступной энергии излучения и схемы нагрева. На рисунке 5 представлены установленные значения концентраций компонентов газовой смеси при варьировании содержания влаги опилок с размерами частиц 2000 мкм. Установлено, что увеличение влажности образца биомассы (с 25 до 75 %) ведет к снижению концентраций всех компонентов газовой смеси. Для CO , CO_2 , CH_4 и H_2 снижение составило на 62-64%, 61-63%, 47-48%, 51-53%. Доля коксового остатка при увеличении влаги возрасла более чем в 2 раза. Полученные результаты обусловлены формированием паровоздушной смеси в зоне реакции термического разложения,

которая поглощает значительную долю подводимой тепловой энергии, снижая тем самым общую мощность нагрева.

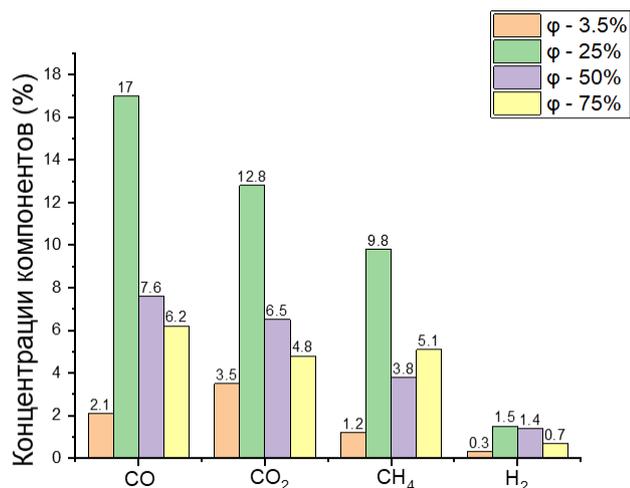


Рисунок 5 – Концентрации компонентов газовой смеси при варьировании влажности биомассы.

Проведенные эксперименты показали, что важно выдерживать определенный баланс между влажностью композиционной биомассы и темпом нагрева. При медленном нагреве (мощность магнетрона не более 800 Вт) даже в условиях повышенной доли влаги в навеске обеспечиваются высокие концентрации генераторного газа. В случае повышенных скоростей нагрева (мощность магнетрона более 2000 Вт) интенсификация испарения в приповерхностных слоях приводит к формированию буферных паровых зон, которые замедляют прогрев глубинных слоев. В диссертационных экспериментах увеличение относительной доли влаги в образце биомассы на 50% приводило к снижению концентраций H₂S, SO₂ и NO более чем в 3 раза. Соответствующие эффекты обусловлены интенсификацией взаимодействия водяного пара с оксидами серы и азота, а также снижением температуры в зоне реагирования вследствие эндотермических фазовых превращений. В таких условиях в основных реакциях участвуют топливные сера и азот, термические и быстрые оксиды не формируются.

Выход газообразных продуктов термического разложения зависит от состава биомассы и переменных параметров процесса термического разложения. В таблице 1 приведены полученные в экспериментах значения компонентов газовой смеси при варьировании мощности микроволнового излучения. При увеличении мощности СВЧ с 840 Вт до 2200 Вт выход CO увеличился – в 4 раза, H₂ – в 8 раз, CH₄ – в 3 раза, CO₂ – в 2 раза. Это обусловлено большей полнотой реагирования биомассы. С применением полученных данных можно прогнозировать потенциальный состав генераторного газа при варьированной в более широком диапазоне мощности микроволнового нагрева.

Таблица 1 – Значения концентраций компонентов газовой смеси.

Мощность, Вт	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
840	7.1	7.5	0.3	3.5
1760	8.9	8.9	1.8	4.7
2200	16.8	32.1	2.5	10.5

Известные экспериментальные данные и результаты моделирования обосновывают, что микроволновый нагрев способствует глубокому преобразованию веществ на молекулярном уровне. Во время термического разложения биомасса

подвергается первичным и вторичным реакциям с интенсификацией нескольких механизмов теплопереноса. Первичные реакции включают разложение целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, присутствующих в биомассе, что приводит к образованию первичных и промежуточных продуктов. Промежуточные продукты подвергаются вторичному крекингу. Первичные реакции включают дегидратацию и обугливание, а вторичные - разложение и улетучивание промежуточных продуктов. Продукты термического разложения, полученные в таких реакциях, чувствительны к рабочим параметрам, таким как мощность и температура. В диссертационном исследовании установлены интересные синергетические эффекты, проявляющиеся в нелинейных изменениях концентраций компонентов генераторного газа при варьировании состава биомассы и условий нагрева.

На рисунке 6 показаны установленные значения длительности выделения

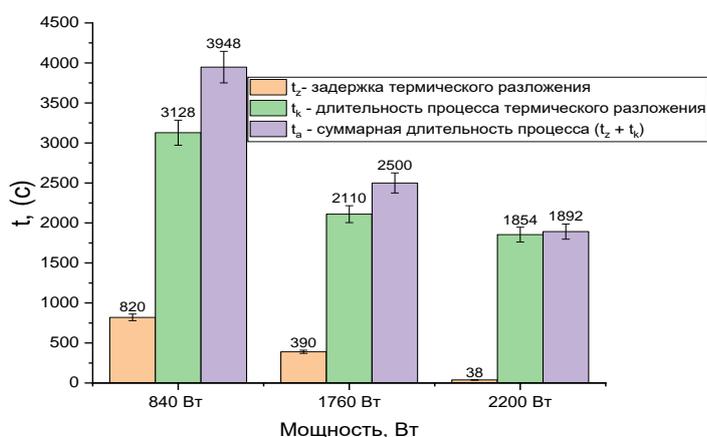


Рисунок 6 – Время выхода генераторного газа.

генераторного газа при варьированной мощности СВЧ. Наименьшее время выделения зафиксировано для 2200 Вт – 1892 с, наибольшее для 840 Вт – 3948 с. С ростом мощности уменьшалось время задержки выделения компонентов генераторного газа. При мощности 840 Вт рост концентраций начинался спустя 820 с после включения магнетрона, а для 2200 Вт выделение генераторного газа

регистрировалось через 38 с. Основная роль мощности магнетрона заключается в обеспечении необходимого количества теплоты для разрыва связей в структуре биомассы. Соответственно, существенно отличаются температуры слоев биомассы. При невысокой (<300°C) температуре разложение происходит на участках гетероатомов. Это приводит к образованию тяжелых смол. При повышенной (>550°C) температуре первичные и вторичные реакции термического разложения изменяют состав генераторного газа. Для модельных соединений лигнина требуется более высокая температура (550–650°C). Даже при повышенной температуре (800–900°C) термическое разложение лигнина обеспечивает конверсию биомассы в пределах 60%. Как правило, целлюлоза и гемицеллюлоза производят больше летучих веществ. Лигнин трудно фрагментировать даже при высоких температурах, и он входит в состав полукокса. Под действием повышенной температуры биомасса подвергается более глубокой конверсии, о чем свидетельствует пониженная масса твердого остатка.

В третьей главе представлены результаты математического моделирования процессов термического разложения биомассы при микроволновом нагреве с учетом варьирования входных параметров в широких диапазонах. Одной из основных задач при моделировании процесса термического разложения композиционной биомассы являлось исследование при варьировании параметров процессов в диапазонах, соответствующих промышленным условиям. Результаты соответствующих

исследований необходимы для прогнозирования рациональных размеров реакторов и схем размещения магнетронов. При планировании постановки задачи считалось, что на слой биомассы, помещенной в тигель, воздействует электромагнитное излучение с заданной мощностью. За счет диэлектрического нагрева образец прогревался. Интенсифицировались процессы термического разложения биомассы с последующим выделением генераторного газа. В камере реактора формировалась парогазовая смесь, содержащая компоненты: CO, H₂, CH₄, SO₄, NO, CO₂. Созданная пространственная модель описывала взаимосвязанные процессы тепломассопереноса с фазовыми превращениями и химическим реагированием.

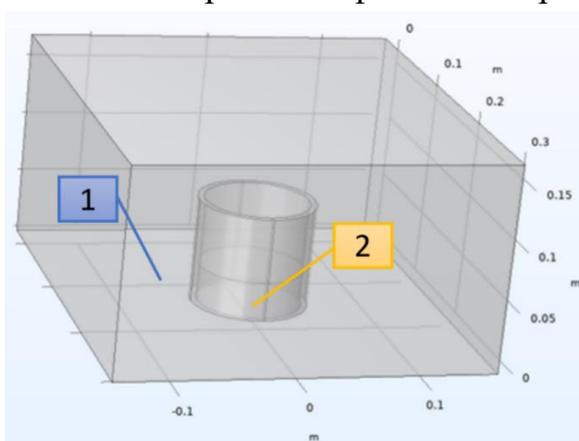


Рисунок 7 – Схема области решения задачи термического разложения биомассы в микроволновом реакторе: 1 – зона смещения компонентов генераторного газа; 2 – образец биомассы.

Использована схема реактора непрерывного действия (рисунок 7). В таблице 2 приведены размеры основных элементов, использованных при проведении экспериментов и создании модели. Применялась система уравнений энергии, диффузионно-конвективного переноса, баланса компонентов парогазовоздушной смеси. Граничные условия учитывали подвод энергии к образцу за счет микроволн и смешанного теплообмена с внешней газовой средой. В слое биомассы учитывалась передача энергии за счет кондуктивного нагрева, фильтрация компонентов генераторного газа и водяного пара через поры.

Таблица 2 – Размеры элементов в модели.

Ширина реактора, мм	Глубина реактора, мм	Высота реактора, мм	Высота тигля, мм	Радиус тигля, мм	Радиус образца биомассы, мм	Высота образца биомассы, мм
330	305	171	85	80	80	30

Математическая модель включает уравнения энергии, движения, диффузии компонентов парогазовой смеси, уравнение энергии для образца биомассы, выражения для расчета эффективных значений свойств композиционной биомассы, выражения для расчета теплового потока от магнетрона, основные химические реакции (7 шт) в микроволновом реакторе, балансные соотношения для расчета мощности микроволнового нагрева. В граничных условиях учитывались эффекты неравномерного нагрева образца. Для решения системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями использован метод конечных элементов. В рамках диссертационных исследований выполнено двумерное и пространственное моделирование физико-химических процессов.

Временной интервал с момента запуска магнетрона до инициирования условий микроволнового термического разложения, а именно достижения температуры начала пиролиза биомассы 543,15 К, представлял время задержки τ_p . При моделировании в качестве источника нагрева принято электромагнитное излучение с варьируемой мощностью. Для верификации модели выполнены эксперименты при идентичных начальных условиях. Расхождения полученных теоретических значений с экспериментальными данными (рисунок 8) составили около 2.5%. Установленные отличия результатов экспериментов и моделирования обусловлены определенной неравномерностью засыпки материала в экспериментах и необходимостью учета изменения свойств композиционной биомассы в процессе нагрева, сушки и термического разложения.

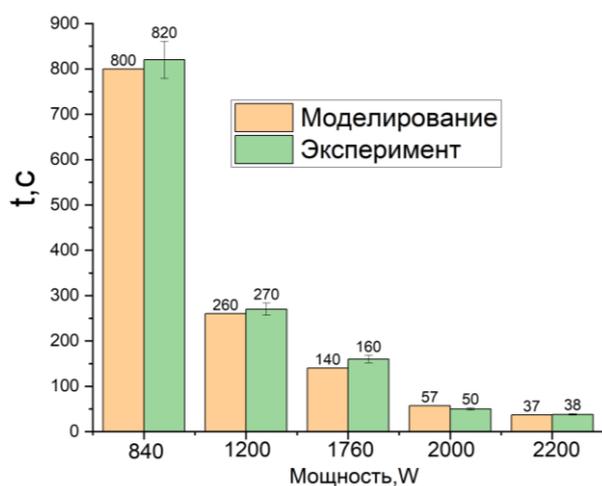


Рисунок 8 – Времена задержки выхода генераторного газа при варьировании мощности микроволнового излучения.

компонентов генераторного газа. При анализе рисунка 8 сформулирован вывод о том,

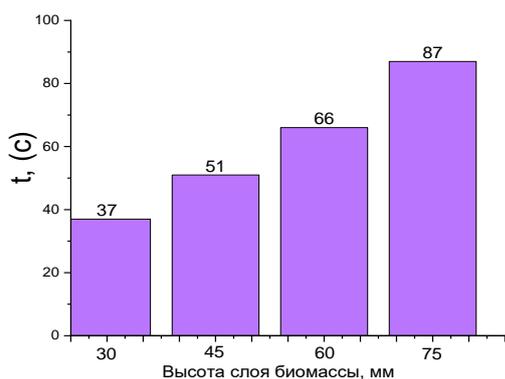


Рисунок 9 – Времена задержки выхода генераторного газа при варьировании высоты слоя биомассы.

На рисунке 8 показано, что повышенная мощность способствует более быстрому нагреву биомассы. Скорость прогрева нелинейно возрастает. С ростом температуры увеличивается тепловой поток, подводимый к образцу биомассы. При температуре биомассы менее 250 °С происходит стадия сушки. При превышении 250 °С инициируется термическое разложение. Скорость прогрева нелинейно возрастает. С ростом температуры увеличивается тепловой поток, подводимый к образцу биомассы. При росте температуры увеличивается пористость материала, усиливается выход

компонентов генераторного газа. При анализе рисунка 8 сформулирован вывод о том, что в диапазоне мощности от 840 Вт до 2200 Вт экспериментальные и теоретические значения времени задержки термического разложения отличаются незначительно. Это обуславливает правомерность применения разработанной модели при прогностических исследованиях.

С помощью построенной пространственной модели проведены расчеты времени задержки термического разложения с учетом варьирования параметров микроволнового нагрева (рисунки 9-11). Анализ результатов

математического моделирования показал, что при увеличении массы образца биомассы нелинейно растет время задержки термического разложения. Повышается энергетический барьер, который необходимо преодолеть для интенсификации

термического разложения. Так как в исследуемой системе протекают процессы испарения и химического реагирования, то повышение подводимой энергии приводит к существенно нелинейному снижению времени задержки выхода генераторного газа. Подведенная энергия расходуется на испарение воды и прогрев биомассы, представляющей смесь из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, воды.

Выполненное параметрическое исследование показало, что механизм инициирования процесса сохраняется в более широком диапазоне варьирования размеров загрузочного слоя. Выходная мощность микроволнового излучения может варьироваться в широком диапазоне. Разработанная модель позволяет воспроизвести условия интенсивного смешанного теплообмена. Это является ключевым преимуществом при анализе потенциальных схем процесса микроволнового нагрева.

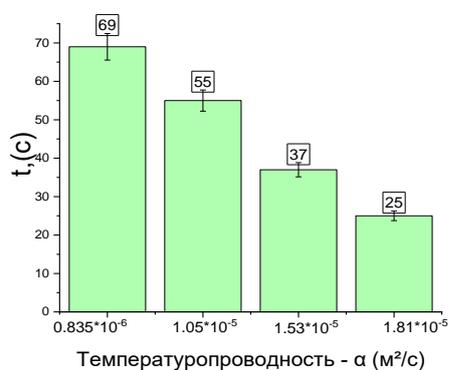


Рисунок 10 – Времена задержки выхода генераторного газа при различной температуропроводности биомассы.

Температуропроводность характеризует скорость изменения температуры в образце под действием теплового потока. Композиционная биомасса при варьировании состава и свойств характеризуется изменением температуропроводности в широком диапазоне. На рисунке 10 продемонстрирован вклад этого фактора. Мощность микроволнового излучения составляла 2200 Вт. Показано, что при увеличении температуропроводности нелинейно снижается время задержки

разложения. Это обусловлено нелинейными зависимостями характеристик процессов испарения и газификации от температуры образца биомассы.

Увеличение размеров реактора способствует практически линейному росту

времени задержки термического разложения (рисунок 11). При проектировании реакторов моделирование позволяет выбрать оптимальную мощность микроволнового излучения. Выполненные оценки показали, что необходимая энергия для рекуперации композиционной биомассы при микроволновом нагреве составляет 1.32 МДж. Обосновано, что микроволновый нагрев композиционной биомассы может проходить в автономном режиме. Оставшуюся энергию можно аккумулировать для последующего использования.

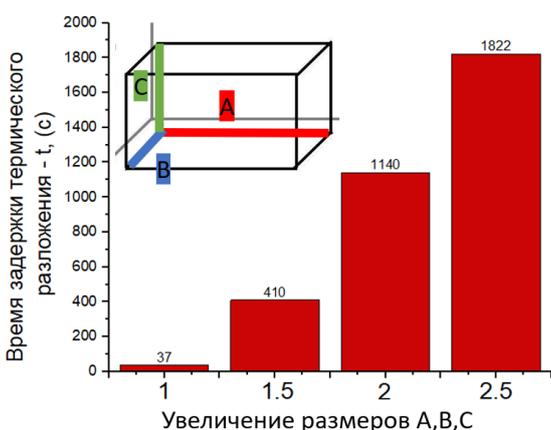


Рисунок 11 – Времена задержки выхода генераторного газа при варьировании размеров реактора.

На основе проведенных экспериментов и расчетов предложена схема технологического решения для термического разложения биомассы при микроволновом нагреве (рисунок 12). Работа основана на эффекте возбуждения микроволнового излучения в узле активации,

представляющем волновод, и поглощения возбуждаемого электромагнитного излучения биомассой в резонансной камере. Отличительные особенности СВЧ реактора: непрерывное микроволновое облучение биомассы; непрерывный и автоматизированный циклический процесс; регулирование мощности до 100 кВт; управление процессом, сбор информации с последующей обработкой; гибкая модификация. Основные части реактора: узел СВЧ (магнетрон, волновод, резонансная камера); высоковольтный блок питания; система сбора данных и оперативного управления. Подача композиционной биомассы с заданным размером частиц в реактор осуществляется через дробильную систему. После попадания в камеру реактора с помощью вибрационного воздействия и формовочной крышки биомасса равномерно распределяется по объему. При помощи микроволнового нагрева в камере реактора происходит термическое разложение биомассы. Выделившийся генераторный газ из реактора поступает в фильтр грубой очистки. Пройдя через фильтр грубой очистки, генераторный газ очищается от мелких твердых примесей.



Рисунок 12 – Концепция схемы микроволнового нагрева композиционной биомассы.

Генераторный газ можно разделить на составляющие компоненты посредством одного или комбинации методов разделения смесей газов. После очистки генераторный газ поступает на турбину. Электрогенератор вырабатывает энергию. Она используется на нужды предприятия, а также в процессе термического разложения новой порции биомассы. После процесса термического разложения твердый остаток попадает в резервуар сбора. В процессе перемещения генераторного газа образующаяся влага через фильтр попадает в коллектор. В дальнейшем побочные продукты могут использоваться в производстве. Например, существующие способы утилизации жидких продуктов разложения в основном сводятся к получению фракций, используемых при гидрировании, или к выделению

некоторых индивидуальных соединений (бензол, толуол, ксилол, дициклопентадиен, нафталин и др.). Кроме того, развивается направление переработки жидких продуктов пиролиза, связанное с получением продуктов с невысокой молекулярной массой (например, нефтеполимерных смол).

В четвертой главе представлены разработанные рекомендации по использованию полученных результатов в энергетике. Обосновано, что термическое разложение биомассы за счет микроволнового нагрева эффективно в ряде приложений: переработка отходов, включая пластик, резину, полимерные материалы и др. в топливо, газ или удобрения; генерация газа (метан или водород); получение угля из биомассы или углеродосодержащих материалов; производство воска, смолы, красителей и др.

Для увеличения выхода генераторного газа целесообразно:

- (1) Использовать смеси биомассы на основе опилок. Синергия компонентов биомассы позволят увеличить выход компонентов генераторного газа;
- (2) Формировать искусственные поры и каналы в приповерхностных слоях навески биомассы. Увеличивается выход CO на 18 и 32 % по сравнению с монослоем. Создание большего количества искусственных пор на поверхности биомассы интенсифицирует диффузию пиролизующего агента;
- (3) Измельчать биомассу. Микроволновый нагрев мелких по размеру частиц (140 и 250 мкм) характеризуется повышенными концентрациями CH₄ и H₂ по сравнению с 2000 мкм. Аналогичное сравнение проведено для других газов: выход CO₂ уменьшился на 15 и 1.5 %, выход CH₄ увеличился на 30 и 60 %, выход H₂ увеличился на 1.5 и 43 %. Для увеличения выхода генераторного газа рекомендуется размеры частиц менее 140 мкм;
- (4) Выдерживать оптимальную влажность биомассы. При влажности 25 % достигнуты максимальные концентрации CO, CO₂, CH₄ и H₂. При повышении влажности биомассы до 75 % концентрации перечисленных газов снизились на 63 %, 62 %, 47.5 %, 52 %. Рекомендуется поддерживать условие $\varphi \leq 25\%$;
- (5) Использовать водяной пар и углекислый газ в качестве компонентов несущей среды в реакторе. При росте объема водяного пара с 200 мл до 400 мл концентрации H₂ увеличиваются на 59%, CO на 49%, CO₂ на 32%. Рекомендуемый объем пара 2.5–5 % от объема камеры реактора, при подаче 600 мл CO₂ в камеру реактора концентрации CO увеличились на 79%, CO₂ на 70%, H₂ на 77%, CH₄ на 88%. Рекомендуемый объем CO₂ – 10 -15% от объема камеры реактора;
- (6) Повышать мощность магнетрона с учетом мультикритериального анализа. При увеличении мощности СВЧ с 840 Вт до 2200 Вт выход CO увеличился в 4 раза, H₂ – в 8 раз, CH₄ – в 3 раза, CO₂ – в 2 раза. Рекомендуемая удельная мощность микроволнового излучения не менее 25 Вт на 1 грамм биомассы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная методика и создан программно-аппаратный комплекс для определения характеристик термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве.
2. На основе обобщения результатов экспериментов установлены зависимости интегральных характеристик термического разложения композиционной биомассы (время задержки выхода газов, продолжительность этого процесса, концентрации газов и др.) от совокупности входных параметров, в частности, темпа нагрева, подведенной тепловой энергии, состава, влажности и пористости биомассы, схемы размещения в тигле, свойств материала и др. В результате математической обработки экспериментальных данных получены выражения для прогнозирования характеристик термического разложения композиционной биомассы с различным составом.
3. При сравнении состава биомассы выделены компоненты, которым соответствовали повышенные концентрации генераторного газа. В частности, в идентичных условиях микроволнового нагрева концентрации основных компонентов генераторного газа (CO , CH_4 , H_2) для соломы выше на 25–85%, чем у других видов биомассы (листья березы, сосновые опилки, кедровые опилки, березовые опилки). Определяющую роль играет наименьшее значение CO_2 , зафиксированное для опилок (меньше на 44–48 % по сравнению с другими видами сырья). Также в случае опилок концентрации H_2S меньше в 1.4–2 раза, чем выделяется при термическом разложении листьев и соломы.
4. Определены эффективные схемы размещения навески композиционной биомассы в реакторе для получения генераторного газа с повышенными концентрациями CO , CH_4 и H_2 . Концентрации H_2 при распределении образца на половине поверхности тигля увеличились с 29% до 50%, CO – с 38% до 50%. Концентрации диоксида углерода меньше в 2.7 раза по сравнению со схемой, при которой биомасса размещена на 1/2 тигля. Обосновано, что выход H_2 и CO можно увеличить более чем в 3 раза при создании на поверхности биомассы искусственных каналов пористости.
5. Определяющее влияние на концентрации компонентов генераторного газа оказывает мощность СВЧ-излучения. Показано, что при повышении мощности микроволнового излучения с 840 Вт до 2200 Вт выход CO увеличился в 4 раза, H_2 – в 8 раз, CH_4 – в 3 раза. При выборе мощности СВЧ-излучения в промышленных реакторах целесообразно учитывать значения относительных показателей эффективности микроволнового термического разложения с учетом энергетических, экологических, экономических и технологических индикаторов.
6. Влажность композиционной биомассы и газовой смеси в реакторе оказывает определяющее влияние на характеристики термического разложения композиционной биомассы. Показано, что увеличение доли влаги в образце с 25 % до 75 % приводит к снижению концентраций компонентов генераторного газа. Концентрации CO , CO_2 , CH_4 и H_2 уменьшились на 62–65%, 60–64%, 46–50% и 51–55%, соответственно. Установлены оптимальные соотношения влаги в образце и газифицирующей среде для получения генераторного газа с повышенными концентрациями CO , CH_4 и H_2 . Увеличение объема CO_2 с 200 мл до 600 мл в

газифицирующей среде привело к возрастанию концентраций CO на 78%, CH₄ на 67% и H₂ на 75%. Повышение объема водяного пара с 200 мл до 400 мл способствовало росту концентраций H₂ – на 80%, CH₄ – в 9 раз.

7. Разработаны физическая и математическая модели термического разложения композиционной биомассы при микроволновом нагреве, отличающиеся от известных учетом совместного влияния процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования в реакторе. Выполнены параметрические исследования, позволившие установить интегральные характеристики микроволнового разложения биомассы в диапазонах варьирования входных параметров (мощность СВЧ, время нагрева, тип тигля, влажность биомассы, расположение на поверхности тигля), перспективных для промышленных термических реакторов.

8. Анализ полученных результатов выполненных мультикритериальных исследований позволил разработать схему микроволнового реактора непрерывного действия с варьируемой мощностью для термического разложения композиционной биомассы. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов при развитии микроволновых реакторов, обеспечивающих термическое разложение композиционной биомассы. Выполненное обобщение результатов исследований позволило обосновать рентабельность применения микроволновых реакторов для получения генераторного газа с повышенными концентрациями CO, CH₄ и H₂ при разном компонентном составе биомассы и применении добавок из промышленных и коммунальных отходов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы, входящие в перечень ВАК:

1. Няшина Г.С. Особенности пиролиза и газификации биомассы при микроволновом нагреве в среде CO₂ / Г.С. Няшина, М.А. Курганкина, **А.С. Швец** // Инженерно–физический журнал. – 2024. – № 97. – С. 127-135.
2. Высокоморная О.В. Техничко-экономическая оценка использования альтернативных топлив из отходов на тепловых электрических станциях взамен традиционных топлив / О.В. Высокоморная, М.А. Курганкина, **А.С. Швец** // Инженерно–физический журнал. – 2024. – № 96. – С. 1782–1794.
3. Курганкина М.А. Микроволновый пиролиз биомассы в атмосфере пара / М.А. Курганкина, Г.С. Няшина, **А.С. Швец** // Кокс и химия. – 2022. – № 65. – С. 480-486.

Журналы, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science:

4. Vysokomornaya O.V. Technical and Economic Assessment of the Use of Alternative Fuels from Waste at Thermal Electric Power Plants in Exchange for Traditional Fuels / O.V. Vysokomornaya, M.A. Kurgankina, **A.S. Shvets** // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2024. – Vol. 96 – P.1782–1794.
5. Shvets A.S. Microwave Pyrolysis of Woody Biomass: Influence of Radiation Power on the Composition of Conversion Products / **A.S. Shvets**, K.Y. Vershinina, K.V. Vinogradskiy, G.V. Kuznetsov // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 13. – Article no. 7926.
6. Fricler V.Y. Microwave pyrolysis of agricultural waste: Influence of catalysts, absorbers, particle size and blending component / V.Y. Fricler, G.S. Nyashina, K.Y. Vershinina, **A.S. Shvets**, P.A. Strizhak // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – Vol.171. – Article no. 105962.
7. Glushkov, D.O. Microwave Pyrolysis of Composite Fuels with Biomass / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, **A.S. Shvets**, K.Y. Vershinina // Waste to Profit: Environmental Concerns and Sustainable Development. – 2023. – P. 349–362.
8. Kurgankina M.A. Microwave Pyrolysis of Biomass: The Influence of Surface Area and Structure of a Layer / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, **A.S. Shvets**, K.Y. Vershinina, A.O. Pereira Junior // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 23. –Article no. 12442.
9. Glushkov D.O. Current status of the pyrolysis and gasification mechanism of biomass / D.O. Glushkov, G.S. Nyashina, **A.S. Shvets**, A.O. Pereira, A.A. Ramanathan // Energies. – 2021. – Vol. 14. № 22. – Article no. 7541.