На правах рукописи



Загиров Айдар Ниязович

ПЕРЕРАБОТКА ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В КОТЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, **Сафин Рушан Гареевич**

Официальные оппоненты: **Марьяндышев Павел Андреевич,** доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», первый проректор по стратегическому развитию и науке;

Гиндулин Ильдар Касимович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», доцент кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Защита диссертации состоится «21» декабря 2026 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве просим указывать фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации, структурное подразделение и должность лица, предоставившего отзыв (п.28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность, по которой автор отзыва защищал свою диссертацию, дату визирования отзыва, печать организации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=600075.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 года

Ученый секретарь диссертационного совета  Екатерина Игоревна Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в энергетической отрасли востребованы технологии, связанные с получением и использованием «зеленой» энергии. В 2025 году применение возобновляемой энергии составило 26,8 % от общего числа, и данный показатель продолжает расти.

В настоящее время активно развиваются технологии получения и расширение спектра применения различных видов биотоплива в биоэнергетике. Согласно прогнозу международного энергетического агентства (МЭА), количество применяемого биотоплива увеличится с 4 % в 2027 году до 8,7 % в 2035 году и до 14,3 % к 2050 году.

Перспективным направлением развития биоэнергетики является получение жидкого биотоплива и связующих из биосырья. Одним из основных способов получения данных продуктов является термическая переработка растительного сырья методом пиролиза с получением дистиллята и смол и их последующей обработкой. В России ежегодно образуется около 8 млн тонн древесных отходов (из которых 25 % составляет щепа сосны), 2 млн тонн лузги подсолнечника и 28 тыс. тонн скорлупы грецкого ореха. Данные отходы имеют низкую плотность, высокую зольность и склонность к слеживанию, что делает их непригодными для прямого сжигания в стандартном оборудовании и экономически невыгодными для транспортировки на полигоны.

В связи с этим термическая переработка щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха представляет собой интерес, так как позволяет не только утилизировать данные отходы, но и получать биоуголь и пиролизную жидкость. Известны исследования, связанные с получением из данных отходов активированного угля. При этом вопрос утилизации или переработки пиролизной жидкости в жидкое в топливо изучен мало. В связи с этим в данной диссертационной работе рассматривался процесс переработки пиролизной жидкости в котельное топливо.

Работа выполнялась в рамках следующих грантов:
– грант РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» на тему «Научные основы технологии термической переработки растительных отходов» (соглашение № 23-26-00036, 2023–2024 г.);
– грант ФСИ «Студенческий стартап» по теме «Разработка комплексной установки по переработке твердых бытовых отходов в биотопливо» (договор № 2733ГССС15-L/93019 от 20.06.2024 г.);
– грант РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» на тему «Научное обоснование процесса получения гранулированного активированного угля из отходов растительного происхождения с применением модифицированной пиролизной смолы в качестве связующего» (соглашение № 25-26-00043, 2025–2026 г.).

Степень разработанности темы. Изучению способов переработки и применения жидких продуктов пиролиза посвящены работы А.Н. Грачева, В.Н. Башкирова, С.А. Забелкина, L. Gaojin, A.V. Bridgwater, S. Morales, M.N. Uddin и др.

Методам проектирования технологий пиролитической переработки сельскохозяйственных отходов посвящены работы В.М. Зайченко, Р.Г. Сафина, Al Arni, A. Basch, S. Wang, Zhen Fang и др.

Исследованиями по термической переработке лузги подсолнечника занимались В.Г. Сотников, С.К. Мустафаев, В.В. Бутяйкин, П.В. Аркушевски, С.С. Тимофеева, А.Х. Шаяхметов.

Вопросам термической переработки скорлупы грецкого ореха посвящены работы А.Д. Севастьянова, Г.Б. Камбарова, Г.Б. Токторбаева, Е. А. Фарберова, К.В. Ладыгина.

Результаты исследований термической переработки биомассы представлены в работах И.К. Гиндулина, Н.И. Богдановича, Ю.Л. Юрьева, В.Н. Клушина, В.М. Мухина, В.Н. Пиялкина, Д. В. Тунцева, А.В. Akwasi, F. Borges, A.V. Bridgwater, H. Goyal, S. Morales, X. Hu, Shurong Wang.

Множество исследований посвящено получению угля из древесных отходов. В связи с этим требуются дальнейшие исследования по получению жидких продуктов пиролиза из растительного сырья для последующего их использования в производстве биотоплива.

Цель работы заключается в создании способа переработки жидких продуктов, полученных при медленном пиролизе растительных отходов, в жидкое котельное топливо.

Задачи исследования:

1. Аналитическое исследование вопроса возможности получения котельного топлива из щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха.
2. Определение рационального температурного режима для получения котельного топлива с оптимальными теплотехническими характеристиками.
3. Проведение исследований по фракционированию жидких продуктов медленного пиролиза из щепы сосны, лузги подсолнечника, скорлупы грецкого ореха и определение их компонентного состава с долей горючей фракции.
4. Установление влияния присадок на свойства полученного топлива и сроки его хранения.
5. Разработка методики расчёта аппаратурного оформления технологии термической переработки растительных отходов с получением жидкого котельного топлива.

Объект исследований: щепа сосны, лузга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха, жидкие продукты их термической переработки и фракционирования.

Предметом исследований являются рациональные режимы и конструкционные параметры процесса переработки жидких продуктов медленного пиролиза, влияющие на технико-экономические показатели разработанного способа.

Научная новизна.

1. Выявлена зависимость выхода котельного топлива с теплотой сгорания 26970 ± 2 кДж/кг от температурных режимов процесса медленного пиролиза щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха.
2. Выявлено влияние присадок с депрессорными и стабилизирующими свойствами на снижение кислотного числа, увеличение температуры вспышки, снижение вязкости и увеличение сроков хранения котельного топлива.
3. Разработан энергоэффективный способ получения котельного топлива из щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха, отличающийся тем, что сепарация жидких продуктов пиролиза ведется фракционной перегонкой с последующим введением присадок.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в выявлении новых закономерностей для получения котельного топлива из растительного сырья путем сепарации и введением добавок, улучшающих характеристики котельного топлива. Практическая значимость исследования заключается в разработке технологического и аппаратурного оформления процесса получения котельного топлива из жидких продуктов пиролиза. Разработана инженерная методика расчёта аппаратурного оформления процесса медленного пиролиза щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха с получением котельного топлива.

Методология и методы исследований. Использован анализ научных материалов российских и зарубежных исследователей. Эксперименты проводились с использованием стандартных методик исследования. Жидкие продукты медленного пиролиза и сепарации проверялись на хроматографе с масс-спектрометрическим детектором Хроматэк-Кристалл 9000. Качественные показатели топлива оценивались по нормативным документам. Анализ полученных результатов проводился с применением программы Microsoft Excel.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов сбора и анализа информации. Достоверность экспериментальных исследований основана на применении стандартных методик проведения исследований на сертифицированном оборудовании. Расхождение экспериментальных и расчетных данных, полученных при математическом моделировании, не превышает 6 %.

Личный вклад автора заключается в разработке способа комплексной переработки жидких продуктов пиролиза, проведении исследований по сепарированию пиролизной жидкости, изучении свойств пиролизного дистиллята на горючесть, выявлении возможности применения горючей

фракции пиролизного дистиллята в производстве пиролизного топлива для котельных установок, разработке пилотной установки и методики расчёта отдельных узлов опытно-промышленной установки, изложении результатов исследований в научных публикациях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты исследований, выносимые на защиту, относятся к п. 4 «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» паспорта специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований по термической переработке растительного сырья (щепы сосны, лузги подсолнечника, скорлупы грецкого ореха) в пиролизную жидкость с последующим выделением из неё горючей фракции.
2. Результаты исследования возможности применения горючей фракции дистиллята из щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха в качестве котельного топлива после смешения с присадками.
3. Результаты исследования влияния присадок на эксплуатационные характеристики полученного котельного топлива.
4. Способ переработки жидких продуктов пиролиза щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха в котельное топливо.
5. Аппаратурное оформление термической переработки щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха для получения котельного пиролизного топлива.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике» (Воронеж, 2021 г.), Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса» (Воронеж, 2022 г.), XIV международной научно-технической конференции «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2023 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023 г.), VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2024 г.), Двенадцатой Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2025 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором

опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России, из них 2 статьи по специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины, 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus, 1 монография, 1 патент Российской Федерации на изобретение № 2783823, 8 работ в прочих изданиях.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 169 страницах машинописного текста, включает 43 рисунка и 26 таблиц. Список литературы включает 131 наименование цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрены существующие методы термической переработки растительного сырья (щепы сосны, лузги подсолнечника, скорлупы грецкого ореха), химический состав и свойства жидких продуктов пиролиза, способы сепарации пиролизных жидкостей и технологии получения жидкого биотоплива.

Во **второй главе** представлено описание экспериментального стенда, включающего установку по пиролизу растительного сырья, установку сепарации пиролизной жидкости и её дистиллятов, хроматограф Хроматэк-Кристалл 9000, вспомогательное оборудование: сушильный шкаф, центробежный сепаратор, муфельная печи и др. Данное оборудование предназначено для изучения процессов получения котельного топлива, приведены методики выполнения экспериментальных исследований.

Определение выхода жидких продуктов медленного пиролиза выполнено на экспериментальной установке. Разделение пиролизной жидкости на дистиллят и смолу, равно как и последующее фракционирование дистиллята по температурам кипения с выделением четырёх фракций, осуществлялось на соответствующих экспериментальных установках. После проведения сепарации проводились исследования по изучению состава и свойств пиролизной жидкости и дистиллята в комплексной лаборатории. После анализа пиролизного дистиллята проводились исследования на горение, смешение первой фракции с присадками OFI 1010 и BioStable DCI-11 для улучшения характеристик топлива, а также определение сроков его хранения и качества полученного котельного топлива по соответствующему ГОСТу.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований по выходу жидких продуктов пиролиза из растительного сырья. Для количественного описания получены зависимости выхода пиролизной жидкости от температуры пиролиза; расхождение с экспериментом 6 % (рис. 2):

- щепа сосны:

$$\mathrm{M}_{\text{пж}} = -0{,}17 + 0{,}00195\mathrm{T} - 1{,}5 * 10^{-6}T^2; \quad (1)$$

- лузга подсолнечника:

$$\mathrm{M_{пж}} = -0{,}3083 + 0{,}00253\mathrm{T} - 2{,}12 * 10^{-6}T^2; \quad (2)$$

- скорлупа грецкого ореха:

$$\mathrm{M_{пж}} = -0{,}1354 + 0{,}00178\mathrm{T} - 1{,}315 * 10^{-6}T^2. \quad (3)$$

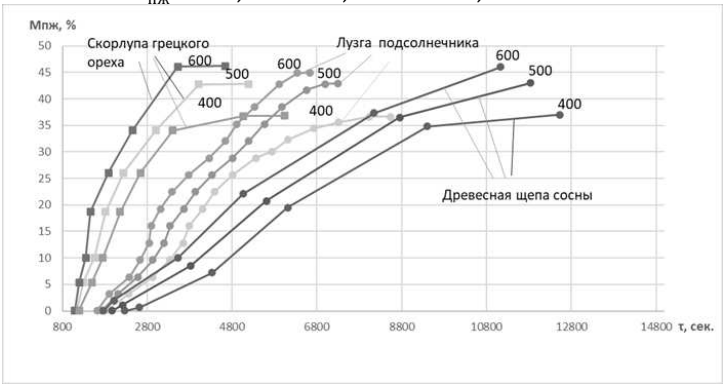


Рисунок 2 – Кинетические зависимости удельного выхода пиролизной жидкости исследуемых видов растительного сырья при температуре пиролиза 400, 500, 600 °С

В результате исследований выхода жидких продуктов медленного пиролиза щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха при температурах 400, 500 и 600 ºС выяснено, что общий выход жидких продуктов пиролиза колеблется в диапазоне 42 – 44 % при температуре в 500 ºС. При увеличении температуры пиролиза до 600 ºС выход жидких продуктов увеличивается на 2 – 4 %, а при пиролизе с температурой 400 ºС уменьшается на 6 % из-за неполного пиролиза исходного сырья. Хромато-масс-спектрометрический анализ пиролизной жидкости выявил, что основным компонентом пиролизной жидкости является водный раствор уксусной кислоты в количестве 60 – 70 % в зависимости от вида сырья, а в случае щепы сосны – муравьиной 19,5 %. Несмотря на присутствие в оставшейся части горючих низкокипящих соединений, их суммарная доля 19 – 34 % не компенсирует преобладание негорючей водно-кислотной основы. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости предварительной переработки.

После пиролиза лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха полученную жидкость подвергали сепарации на жидкую и смоляную фракции. Количество дистиллята зависит от сырья: 67 – 73 % для щепы сосны, 69 – 72 % для лузги подсолнечника и 84 – 90 % для скорлупы грецкого ореха. Повышение температуры пиролиза с 500 до 600 °С снижает выход дистиллята и увеличивает долю смолы на 3 – 5 %. Вид сырья определяет выход и состав жидких продуктов пиролиза. Эти данные важны для оптимизации пиролиза и выбора сырья для максимизации выхода целевых продуктов.

После отделения смолы проводились эксперименты по повторной сепарации с

целью разделения пиролизного дистиллята по температурам кипения. Результаты данных экспериментов представлены на рисунке 3.

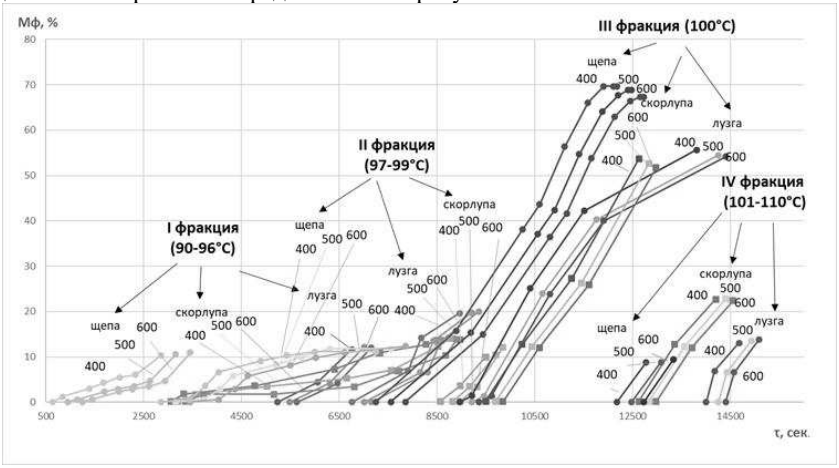


Рисунок 3 – Кинетические зависимости удельного выхода фракций дистиллята после разделения по температурам кипения: при пиролизе с температурой 400, 500 и 600°С для щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха

Сопоставительный анализ кинетических зависимостей удельного выхода фракций дистиллята для щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха при 400, 500 и 600 °С выявляет общие закономерности и различия. Все кривые нелинейны с выраженными участками изменения скорости. Первая фракция (90 – 96 °С) имеет пологий начальный участок; выход 10 – 15 % для лузги и скорлупы, 10 – 12 % для щепы. Вторая фракция (97 – 99 °С) с выходом 10 – 20 %, кинетика близка к линейной. Основная масса продукта содержится в третьей фракции (100 °С), выход продуктов составляет 66 – 70 % для щепы, 52 – 56 % для скорлупы и 54 – 56 % для лузги; кривые отличаются наиболее интенсивным и устойчивым ростом. Четвёртая фракция (101 – 110 °С) занимает второе место по объёму: 13 – 23 % для скорлупы и лузги, 8 – 9 % для щепы; выделение начинается позже и сопровождается быстрым ростом. Для всех трёх видов сырья форма кривых соответствующих фракций практически не изменяется при варьировании температуры 400 – 600 °С, а различия в конечных выходах незначительны. Это указывает на слабую зависимость фракционного состава дистиллята от температуры первичного пиролиза. Основная часть жидких продуктов концентрируется в третьей фракции.

Все фракции проанализированы методом хромато-масс-спектрометрии. В результате выявлено, что первая фракция обогащена легколетучими кислородсодержащими соединениями и обеспечивает воспламеняемость. Её можно применять как низкокалорийное котельное топливо в адаптированных

теплогенераторах или как добавку (5 – 10 %) к традиционному топливу после стабилизирующих и антикоррозионных присадок. Фракции 2 – 4 всех видов сырья содержат водные растворы уксусной и муравьиной кислот (40 – 88 %), что даёт низкую энергоёмкость, коррозию металлов и невозможность устойчивого горения. Сернистые соединения в отдельных фракциях (например, диметилдисульфид в скорлупе ореха) повышают экологическую опасность из-за оксидов серы. Фракции 2 – 4 рационально использовать как сырьё для химической переработки с выделением уксусной и муравьиной кислот, винилацетата и др. Таким образом, топливным потенциалом обладает первая фракция и реализуется после подготовки с присадками. Остальные фракции можно рассматривать только в качестве сырья для извлечения химических соединений.

Первую фракцию дистиллята смешивали с присадками OFI 1010 (депрессорная присадка) и BioStable DCI-11 (стабилизирующая с антикоррозионными свойствами) в разных концентрациях, после чего провели исследование их влияния на улучшение качества полученного топлива. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства топлива с наличием присадок

Наименования показателя	**Проверяемые образцы**		
	Топливо без присадок	**Топливо с присадкой рекомендованной производителями концентрации (OFI 1010 0,5 % мас; BioStable DCI-11 0,03 % к объёму)**	**Топливо с присадкой оптимальной концентрации (OFI 1010 0,9 % мас; BioStable DCI-11 0,07 % к объёму)**
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,403 – 0,404	0,323 – 0,324	0,301 – 0,302
Температура вспышки, °С, не менее	44 – 45	48 – 51	54 – 55
Вязкость при 20 – 40 °С, мм^2/с	5,1 – 6,5	4,4 – 5,8	3,9 – 5,3
Цетановое число, не менее	40 – 41	40 – 41	40 – 41

Анализ данных таблицы 1 показывает, что использование присадок снижает кислотное число с 0,403 – 0,404 до 0,301 – 0,302 мг КОН/г, повышая антикоррозионную стабильность. Возрастает температура вспышки с 44 – 45 до 54 – 55 °С, улучшая безопасность топлива. Снижается вязкость с 5,1 – 6,5 до 3,9 – 5,3 мм²/с, что улучшает распыление топлива. Цетановое число (40 – 41) остаётся неизменным, подтверждая, что присадки практически не влияют и энергетическую ценность. Оптимальная концентрация присадок повышает стабильность и безопасность топлива и позволяет применять его в качестве

низкокалорийного котельного топлива или как добавку (не более 5 – 10 %) к основному топливу.

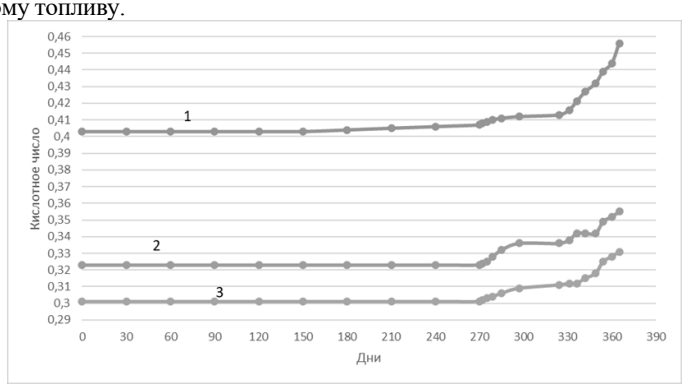


Рисунок 4 – Кинетическая зависимость кислотного числа полученного топлива: 1 – без присадок; 2 – с присадкой рекомендованной концентрации; 3 – с присадкой оптимальной концентрации

На рисунке 4 представлена кинетическая зависимость изменения кислотного числа трёх образцов топлива: без присадок, с рекомендованной и оптимальной концентрацией. В результате математической обработки получены зависимости изменения кислотного числа, для которых различие между расчетными и экспериментальными данными составило 5 %:

- топливо без присадок:

$$K = 0{,}4 - 2{,}7 * 10^{-4}d + 4{,}303 * 10^{-6}d^2 - 2{,}16 * 10^{-8}d^3 + 3{,}5 * 10^{-11}d^4; \quad (4)$$

- топливо с присадкой рекомендованной концентрации:

$$K = 0{,}32 - 8{,}78 * 10^{-6}d + 3{,}22 * 10^{-7}d^2 - 2{,}97 * 10^{-9}d^3 + 7{,}62 * 10^{-12}d^4; \quad (5)$$

- топливо с присадкой оптимальной концентрации:

$$K = 0{,}3 - 9{,}25 * 10^{-5}d + 1{,}6 * 10^{-6}d^2 - 8{,}98 * 10^{-9}d^3 + 1{,}6 * 10^{-11}d^4. \quad (6)$$

Анализ показывает, что в первые 180 дней кислотное число всех образцов практически не менялось. После 180-го дня начался медленный рост с ускорением у образца без присадок; у образцов с присадками рост начался только после 270-го дня. Максимальный прирост – у топлива без присадок: 0,053 мг КОН/г к 365 дню. Для образца с рекомендованной концентрацией прирост составил 0,032 мг КОН/г. При этом у топлива с оптимальной концентрацией прирост составил всего 0,03 мг КОН/г. Таким образом присадки замедляют накопление кислых продуктов. При оптимальной концентрации повышается антикоррозионная стабильность и срок хранения топлива.

На рисунке 5 представлена кинетическая зависимость изменения содержания осадка. В результате математической обработки получены зависимости изменения содержания осадка и воды, для которых различие между расчетными и экспериментальными данными не превышает 6 %:

- топливо без присадок:

$$C = \begin{cases} 0{,}8 & 0 \le d \le 324 \\ 0{,}8 + 0{,}22\left(e^{0{,}0077(d-324)} - 1\right), & d > 324 \end{cases}; \quad (7)$$

- топливо с присадкой рекомендованной концентрации:

$$C = \begin{cases} 0{,}8 & 0 \le d \le 365 \\ 0{,}8 + 0{,}01(d - 365)^{0{,}75}, & d > 365 \end{cases}; \quad (8)$$

- топливо с присадкой оптимальной концентрации:

$$C = \begin{cases} 0{,}8 & 0 \le d \le 365 \\ 0{,}8 + 0{,}0029(d - 365), & d > 365 \end{cases}. \quad (9)$$

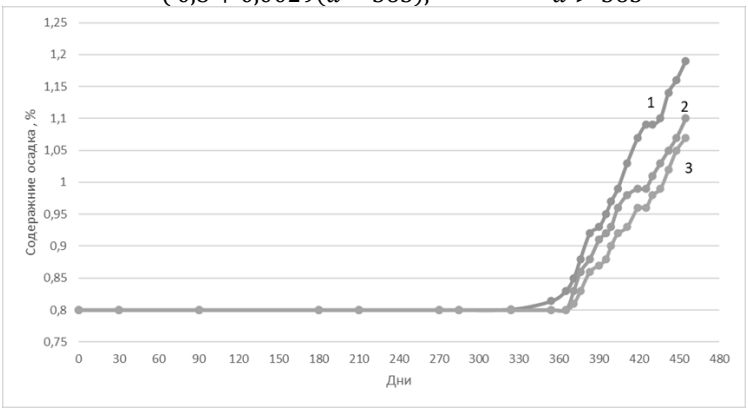


Рисунок 5 – Кинетическая зависимость изменения содержания осадка и воды в топливе: 1 – без присадок; 2 – с присадкой рекомендованной концентрации; 3 – с присадкой оптимальной концентрации

Анализ данных по изменению содержания осадка показывает, что в первые 324 дня у всех образцов содержание осадка сохраняется на уровне 0,80 %. После 324-го дня содержание осадка увеличивается у топлива без присадок; у образцов с присадками увеличение происходит только после 365-го дня. Максимальное осадкообразование отмечено для топлива без присадок: с 0,8 % (324-й день) до 1,20 % (455-й день). Образцы с присадками показали лучший результат: к 455-у дню 1,1 % для рекомендованной и 1,08 % для оптимальной концентрации, что ниже, чем у топлива без присадок. Оптимальная концентрация обеспечивала результаты на уровне или несколько лучше рекомендованной (например, 0,98 % на 404-й день для рекомендованной против 0,98 % на 430-й день для оптимальной). Таким образом, введение присадок замедляет процессы осадкообразования. Применение оптимальной концентрации повышает стабильность топлива при длительном хранении, улучшая эксплуатационные свойства и увеличивая сроки хранения.

На основании данных, представленных на рисунках 4 и 5, установлено, установлено, оптимальная концентрация присадок позволяет замедлить рост кислотного числа до 0,03 мг КОН/г к 365-дню, а так же позволила снизить содержание осадка и воды до 1,08 % к 455-у дню, помимо этого происходит увеличение срока хранения полученного котельного топлива: со 180 до 270 дней.

Сравнение полученного топлива из образцов первой фракции дистиллята с оптимальной концентрацией присадок (OFI 1010 – 0,9 % мас.; BioStable

DCI-11 – 0,07 % к объёму) с промышленными аналогами на соответствие ГОСТу показало, что данное топливо может использоваться в качестве низкокалорийного котельного с теплотой сгорания 26970 ± 2 кДж/кг.

В **четвертой главе** представлена разработанная пилотная установка для производства котельного топлива, изображенная на рисунке 6.

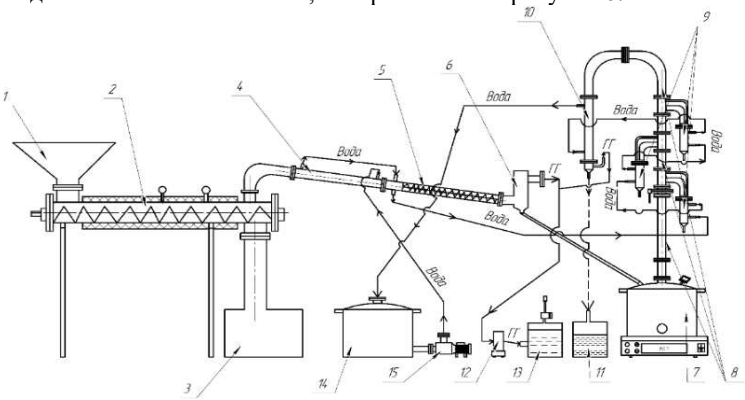


Рисунок 6 – Схема пилотной установки по получению пиролизного топлива: 1 – бункер загрузки сырья; 2 – пиролизная камера с рубашкой для теплоносителя; 3 – ёмкость для сбора угля; 4 – первый конденсатор; 5 – второй конденсатор; 6 – бункер для разделения пиролизной жидкости и несконденсировавшихся газов; 7 – ёмкость для сбора пиролизной жидкости; 8 – ректификационная колонна; 9 – узлы пробоотбора; 10 – конденсатор ректификационной колонны; 11 – емкость для сбора горючего биотоплива; 12 – газодувка; 13 – гидрозатвор с газовой горелкой; 14 – ёмкость для охлаждающей жидкости; 15 – насос для перекачки охлаждающей жидкости

Разработан способ и инженерная методика расчета узлов опытно-промышленной установки для производства котельного топлива. Приведено технико-экономическое обоснование термохимической переработки растительного сырья (щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха) в котельное топливо с годовой прибылью по топливу 210 тыс. руб., по углю 5,808 млн руб. Общая годовая прибыль составляет около 6 млн руб. Также указан материальный баланс опытно-промышленной установки с производительность 100 кг за 1 час работы.

В **приложении** представлены протоколы испытаний ГХ-МС образцов пиролизной жидкости и пиролизного дистиллята; статистическая обработка результатов; основные данные и методика расчета технико-экономических показателей опытно-промышленной установки по производству котельного топлива; патент на изобретение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании аналитического исследования установлена возможность получения пиролизного топлива и химических компонентов – кислот,

ароматических углеводородов, метанола и фенолов, применяемых в промышленности – из отходов растительного сырья, в том числе щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха.

2. В результате экспериментальных исследований выявлено:

- рациональная температура медленного пиролиза 500 ºС, обеспечивающая максимальный выход жидких продуктов при приемлемых энергозатратах;
- компонентный состав жидких продуктов медленного пиролиза: для щепы сосны – 17 компонентов, для лузги подсолнечника – 19 компонентов, для скорлупы грецкого ореха – 28 компонентов.

3. В результате исследований по фракционированию жидких продуктов медленного пиролиза щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха получены четыре фракции дистиллята, из которых горючими свойствами обладает первая (горючая) фракция дистиллята каждого исследуемого сырья. В ней присутствуют горючие компоненты, кетоны, эфиры и спирты в суммарном количестве 84 – 88 %. Горючие фракции обладают теплотой сгорания 26970 ± 2 кДж/кг и их объёмы составляют: для щепы сосны 10 %, для лузги подсолнечника 13 %, для скорлупы грецкого ореха 15 %. Наибольшую долю во фракциях со второй по четвёртую занимает водный раствор уксусной кислоты в суммарном количестве: для щепы сосны 60 %, лузги подсолнечника 70 %, для скорлупы грецкого ореха 67 %.

4. Установлено, что использование оптимальных концентраций присадок OFI 1010 и BioStable DCI-11 оказывает влияние на характеристики полученного котельного топлива:

- происходит снижение кислотного числа с 0,403 – 0,404 до 0,301 – 0,302 мг КОН/г;
- возрастает температура вспышки с 44 – 45 °С до 54 – 55 °С, улучшая безопасность топлива;
- снижается вязкость с 5,1 – 6,5 до 3,9 – 5,3 мм²/с, что улучшает распыление топлива;
- увеличивается срок хранения полученного котельного топлива с 6 месяцев до 9 месяцев.

5. Разработаны инженерные методики расчёта отдельных узлов опытно-промышленной установки для производства котельного топлива из растительного сырья: зоны двухступенчатой сепарации газов, зоны очистки топлива, зоны стабилизации готового котельного топлива.

На основании теоретических расчётов определены ключевые конструктивные и технологические параметры опытно-промышленной установки для получения котельного топлива производительностью 100 кг/ч по сырью.

Проведённый технико-экономический анализ показал, что котельное топливо, полученное методом медленного пиролиза, остаётся рентабельным при расчётной производительности 100 кг/ч по сырью. Срок окупаемости установки составляет 5 лет 1 месяц, а годовая прибыль от работы достигает 6,018 млн рублей.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с переработкой второй, третьей и четвертой фракций, получаемых в процессе производства котельного пиролизного топлива из вторичного растительного сырья (щепа сосны, лузга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха), и внедрением опытно-промышленной установки непрерывного действия для получения котельного топлива.

Основные обозначения: ЛПК – лесопромышленный комплекс; АПК – агропромышленный комплекс; ПЖ – пиролизная жидкость; ГГ – горючий газ; ТГ – топочный газ; ПТ – пиролизное топливо; ГХ-МС – газовая хроматография, совмещённая с масс-спектрометрией.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Сафин Р.Г, Переработка органических отходов в пиролизное топливо / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, **А. Н. Загиров**, Р. А. Мифтахов // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 4(56). – С. 116-125.
2. Сотников В.Г. Обзор существующих установок для производства пиролизного топлива / В.Г. Сотников, **А.Н. Загиров**, Д.А. Гурьянов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3(59). – С. 117-122.

Монография:

3. **Загиров, А. Н**. Современное состояние комплексной переработки жидких продуктов пиролиза / А. Н. Загиров, В. Г. Сотников, Р. Г. Сафин. – Казань : ООО «Редакционно-издательский центр «Школа», 2024. – 129 с.

Патент:

4. Патент № 2783823 C1 Российская Федерация, МПК C10B 49/10, C10G 9/00, B01J 8/00. Установка для производства пиролизного топлива: № 2021138320: заявл. 22.12.2021: опубл. 18.11.2022 / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, **А. Н. Загиров** [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – 8 с.

Статья в научном издании, сборнике научных трудов и материалов конференций, индексируемом базой данных Scopus:

5. Safin, R. G. Study of the Separation of Pyrolysis Gases at Different Moisture Content of Vegetable Raw Materials / R. G. Safin, V. G. Sotnikov, **A. N. Zagirov** // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 818-822.

Труды в прочих изданиях:

6. **Загиров, А. Н**. Сепарация пиролизных газов / А. Н. Загиров // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 19–20 октября 2021 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2021. – С. 78-81.
7. **Загиров, А. Н**. Исследование пиролизного топлива / А. Н. Загиров, Р. А. Мифтахов // Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 25 мая 2022 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2022. – С. 40-44.

8. **Загиров, А. Н**. Исследование по сепарации пиролизного топлива / А. Н. Загиров // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022 (МНТК "ИМТОМ – 2022") : Материалы XI-й Международной научно-технической конференции, Казань, 08 декабря 2022 года. Том 1, Часть 2. – Казань : Акционерное общество "Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий", 2022. – С. 48-52.

9. **Загиров, А. Н**. Технологический процесс быстрого пиролиза с получением пиролизного топлива / А. Н. Загиров, Р. Г. Сафин // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – С. 110-113.

10. **Загиров, А. Н**. Получение жидкого биотоплива методом сепарации пиролизных газов / А. Н. Загиров // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24–28 апреля 2023 года / под редакцией Ю. М. Казакова [и др.]. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 337-339.

11. Сафин, Р. Г. Исследование сепарирования пиролизных газов при различном влагосодержании растительного сырья / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, **А. Н. Загиров** // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3 (101). – С. 155-160.

12. Сафин Р.Г. Термохимическая переработка растительного сырья / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, А. С. Родионов, **А. Н. Загиров** // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки : Материалы Всероссийской научно-практической конференции (24 – 28 апреля 2023 г.) / под ред. Ю. М. Казакова [и др.] ; Минобрнауки России ; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2023. – С. 304-308.

13. **Загиров, А. Н**. Сепарация жидкого пиролизного топлива методом дистилляции / А. Н. Загиров, В. И. Григорьев, Р. Г. Сафин // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28–30 мая 2024 года. – Казань : ООО «Конверс», 2024. – С. 311-315.

14. **Загиров А.Н.** Получение жидкого биотоплива методом двухступенчатой сепарации пиролизных газов / А. Н. Загиров, В. В. Хандрычев, К. Э. Самойлова [и др.] // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28–30 мая 2024 года. – Казань : ООО «Конверс», 2024. – С. 63-66.

15. Сотников В.Г. Повышение эффективности выхода горючей фракции пиролизной жидкости из растительного сырья / В. Г. Сотников, Р. Г. Сафин, **А. Н. Загиров**, Д. А. Ахметова // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – Т. 92, № 4. – С. 326-335.

Заказ Тираж 100 экз.
Офсетная лаборатория КНИТУ 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68