

На правах рукописи



Сотников Виктор Георгиевич

**ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА РАСТИТЕЛЬНЫХ
ОТХОДОВ В АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного
комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

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: **Юрьев Юрий Леонидович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов;
Клушин Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», профессор кафедры промышленной экологии.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова», г. Улан-Удэ.

Защита диссертации состоится «20» июня 2024 года в 12 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=501364>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дилира Фариловна
Зиятдинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблемами агропромышленного комплекса в настоящее время являются низкая эффективность использования вторичного растительного сырья, высокие затраты на его переработку, связанные с отсутствием высокоэффективного оборудования и методик его расчёта. В настоящее время в России перерабатывается не более 40 % отходов агропромышленного комплекса (АПК). Это приводит к снижению эффективности АПК. Существует большое количество направлений переработки растительного сырья, одним из них является термохимическая переработка растительных отходов в активированный уголь.

В связи с большим объемом вредных выбросов, образующихся на предприятиях, задача по созданию новых ресурсо- и энергосберегающих технологий получения активированного угля является крайне актуальной.

Работа выполнялась в рамках следующих конкурсов:

- 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 от 27.01.2023 г.);
- грант ФСИ «Студенческий стартап» по теме «Разработка технологии термической переработки твердых бытовых отходов в сорбенты»;
- конкурс научно-исследовательских проектов «ТехноСтарт» на тему «Разработка энергосберегающего способа пирогенетической переработки твердых органических отходов в активированный уголь»;
- научно-исследовательская работа по теме «Разработка технологии термической переработки твердых бытовых отходов в сорбенты».

Степень разработанности темы. Методам проектирования технологий пиролитической переработки сельскохозяйственных отходов посвящены работы В. М. Зайченко, Р.Г. Сафина. Вопросами переработки отходов агропромышленного комплекса занимались А.Ю. Брюханов, Н.Л. Воропаева, В.Н. Клушин.

Вопросам термической переработки растительных отходов посвящены работы В.М. Мухина, В.Н. Пилякина, F. Berruti, С. Briens, M.J. Antal, M. Gronli. Изучению характеристик адсорбентов, полученных из лигниноцеллюлозных материалов, посвящены работы Н.И. Богдановича, Ю.Л. Юрьева, В.В. Самоноина, Л.Г. Пяновой, В.Ю. Морозовой.

Вопросы изучения механизмов термического разложения растительных материалов изложены в работах А. Broido, С.А. Koufopoulos. Физическим и математическим моделированием тепло- и массообменных процессов разложения растительного сырья занимались W. С. Park, Di Blasi.

Однако все вышеописанные исследования направлены, в основном, на термохимическую переработку древесных материалов, и не позволяют в полной мере оценить переработку отходов растительного сырья в активированный уголь. Поэтому разработка технологии и аппаратного

оформления термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь может стать решением проблемы накопления растительных отходов на предприятиях агропромышленного комплекса.

Цель работы: разработка технологии и аппаратурного оформления термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь и обоснование ее режимных и конструкционных параметров.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния вопроса термохимической переработки растительных отходов.

2. Разработка технологической схемы и изготовление экспериментальной установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

3. Разработка математической модели процесса получения активированного угля из растительных отходов.

4. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по получению активированного угля из растительных отходов в лабораторных условиях.

5. Разработка методики расчёта аппаратурного оформления технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

6. Оценка экономической эффективности технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

Объект исследований: термохимическая переработка растительных отходов.

Предметом исследований является поиск рациональных режимных и конструкционных параметров процесса термохимической переработки растительных отходов, влияющих на технико-экономические показатели активированного угля.

Научная новизна.

Работа содержит технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности получения активированного угля из растительных отходов.

1. Разработана математическая модель термохимического процесса получения активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса, отличающаяся тем, что:

- описывает непрерывный процесс получения активированного угля термохимическим методом, что позволит проектировать энергосберегающие установки непрерывного действия;

- в стадии моделирования водопаровой активации учитывается изменение плотности пара и плотности образующихся газов активации, что позволит контролировать процесс выгорания активированного угля;

2. Получены новые данные по:

- адсорбционной активности по йоду, в зависимости от продолжительности активации, формы дисперсности частиц, температуры активирующего агента;

- удельному выходу активированного угля, в зависимости от температуры активирующего агента, формы дисперсности частиц, температуры пиролиза, скорости прогрева сырья, типа сырья;
- динамике изменения равновесной активности по толуолу гранул активированного угля различной плотности, в зависимости от степени выгорания;
- плотности дробленого угля, по высоте камеры активации для многосекционного шахтного аппарата;
- плотностям пара и газов активации в камере активации в зависимости от толщины слоя угля,

позволяющие установить рациональные технологические параметры полученного активированного угля отходов агропромышленного комплекса методом термохимической переработки.

3. Доказана возможность эффективной термохимической переработки растительных отходов агропромышленного комплекса – лузги семян подсолнечника, костры масличного льна, скорлупы грецкого ореха в активированный уголь различного назначения, соответствующего маркам ОУ-А ГОСТ 4453-74, АР-А ГОСТ 8703-74, БАУ-А ГОСТ 6217-74.

4. Разработан эффективный энергосберегающий способ получения активированного угля (патент на изобретение № 2789699).

Теоретическая значимость.

1. Раскрыто влияние свойств растительного сырья на технологические режимы ведения термохимических процессов.
2. Изложены теоретические и экспериментальные закономерности, позволяющие разработать энергосберегающую технологию термохимической переработки растительного сырья в активированный уголь.
3. Доказана возможность эффективной термохимической переработки растительных отходов агропромышленного комплекса в активированный уголь.

Практическая значимость.

1. Разработана методика расчёта аппаратного оформления процесса термохимической переработки растительных отходов.
2. Разработана энергосберегающая установка получения активированного угля из растительных отходов агропромышленного комплекса.
3. Полученные результаты исследований приняты к внедрению в АО «ИВКАЗ» (г. Казань) и внедрены в учебный процесс по дисциплине «Современные технологии переработки растительного сырья» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Методология и методы исследований.

В теоретических исследованиях использованы методы математического моделирования с применением ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на основе ГОСТов и регрессионного анализа полученных данных с применением программ EXCEL, Mathcad и языка программирования Pascal.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением адекватной математической модели, экспериментальными исследованиями на сертифицированном оборудовании. Отклонение расчётных данных от экспериментальных значений не превышает 18 %.

Личный вклад автора состоит в разработке технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, разработке математической модели, создании экспериментальной установки, проведении математического моделирования и анализе полученных результатов. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве. Все исследования выполнены автором лично.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследований, выносимые на защиту, относятся к пункту 10 «Методы, технологии и технические средства обеспечения экологической безопасности, переработки и утилизации отходов сельскохозяйственного производства, эколого-реабилитационные процессы и технологии» паспорта специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса переработки растительных отходов в активированный уголь.
2. Результаты моделирования по обоснованию эффективности технологии термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
3. Технологическая схема установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.
4. Режимные параметры и методика расчёта установки термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, в том числе на Всероссийской научно-технической конференции «Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике» (Воронеж 2021), XVI Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск 2022), Восьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии» (сушка, тепловые и массообменные процессы) (Москва 2023).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 20 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и 8 статей индексируемых RSCI, Scopus, WOS, 1 монография, 1 патент на изобретение № 2789699, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619183, 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621311.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и

приложений. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, включающих 75 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список включает 170 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлено современное состояние переработки растительных отходов в активированный уголь, а также свойства и технология получения активированного угля.

Во **второй главе** представлена физическая картина термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, формализация процесса, математическая модель процесса получения активированного угля из растительного сырья.

Все процессы, рассматриваемые в физической картине связаны друг с другом и поэтому необходимо их совместное решение. Математическое моделирование процесса производства активированного угля возможно при совокупном рассмотрении взаимосвязанных стадий.

Математическое описание процесса конвективной сушки дано для аппарата шахтного типа. Такое аппаратное оформление зоны сушки позволяет применить модель идеального смешения и представить процесс сушки слоя сушкой одной частицы, применив систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса Лыкова А.В., записанных для бесконечной пластины:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (1) \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\varepsilon}{c_m} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Начальные условия для решения уравнений 1 – 2 соответствуют начальной температуре частицы и ее исходному влагосодержанию. Для оценки температуры и влажности на поверхности частиц используются граничное условие третьего рода и уравнение Фрейндлиха.

Математическое описание процесса медленного пиролиза представлено для подвижного сыпучего слоя растительного сырья. Перенос тепла описывается частным случаем уравнения Фурье 2-го порядка:

$$W_M \cdot \rho_{cs} \cdot c_m \frac{\partial T_{cs}}{\partial h} = \frac{\partial T_{cs}}{\partial l} \cdot \left(\lambda_{cs} \cdot \frac{\partial T_{cs}}{\partial l} \right) + q_{sp}. \quad (3)$$

Начальное условие для температуры соответствует температуре слоя сырья после конвективной сушки. Температура слоя материала, соприкасающаяся с теплоподводящей поверхностью, определяется граничным условием третьего рода.

Скорость термического разложения частицы можно записать отдельно

для сырья, угля и парогазовой смеси:

$$\text{- для сырья:} \quad \frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = -k_c \rho_c; \quad (4)$$

$$\text{- для угля:} \quad \frac{\partial \rho_y}{\partial \tau} = \varphi k_c \rho_y; \quad (5)$$

$$\text{- для пиролизных газов:} \quad \frac{\partial \rho_{\text{ПГ}}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_c \rho_{\text{ПГ}}. \quad (6)$$

Начальные условия соответствуют начальным концентрациям сырья, угля и пиролизных газов.

Время активации τ_A определяется решением системы дифференциальных уравнений теплопереноса в угле и перегретом паре. Для одномерного слоя уравнение тепломассопереноса можно записать соотношениями:

$$w_y \rho_y c_y \frac{\partial T_y}{\partial h} = \frac{\partial T_y}{\partial h} \left(\lambda_y \frac{\partial T_y}{\partial h} \right) + q_{xp} + \alpha (T_{\text{П}} - T_y), \quad (7)$$

$$w_{\text{П}} \rho_{\text{П}} c_{\text{П}} \frac{dT_{\text{П}}}{dh} = -\alpha (T_{\text{П}} - T_y). \quad (8)$$

Изменение плотности угля, пара и газов активации можно записать соотношениями:

$$\text{- для угля:} \quad w_y \frac{\partial \rho_y}{\partial h} = -k_a \rho_y; \quad (9)$$

$$\text{- для пара:} \quad w_{\text{П}} \frac{\partial \rho_{\text{П}}}{\partial h} = -k_a \rho_{\text{П}}; \quad (10)$$

$$\text{- для газов активации:} \quad w_{\text{ГА}} \frac{\partial \rho_{\text{ГА}}}{\partial h} = k_a \rho_{\text{ГА}}. \quad (11)$$

Температура и плотность угля на входе в зону активации соответствует параметрам ранее протекающего пиролиза.

Стадия испарительного охлаждения активированного угля описывается уравнением теплового баланса:

$$m_{\text{П}} \cdot c_{\text{П}} \cdot \Delta T_{\text{П}} = m_y \cdot c_y \cdot \Delta T_y. \quad (12)$$

Теплоперенос в перегретом паре и угле определяется соотношениями:

$$w_y \frac{\partial T_y}{\partial h} = a_{\text{ТВ}} \frac{\partial^2 T_y}{\partial x^2}, \quad (13) \quad w_{\text{П}} \frac{dT_{\text{П}}}{dh} = \frac{\alpha}{c_{\text{П}} \cdot \rho_{\text{П}}} (T_y - T_{\text{П}}). \quad (14)$$

Описание процесса сушки активированного угля понижением давления сводится к решению системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса с граничными условиями, состоящими из уравнений Антуана и Фрейндлиха. Начальные условия температуры и влажности активированного угля определяются влажностью и температурой после зоны испарительного охлаждения.

Был разработан алгоритм расчета для проведения математического моделирования процесса получения активированного угля.

В **третьей главе** представлены описания экспериментальных установок (рис. 1), методика проведения и анализ результатов исследований по

определению режимов процессов получения активированного угля из растительных отходов.

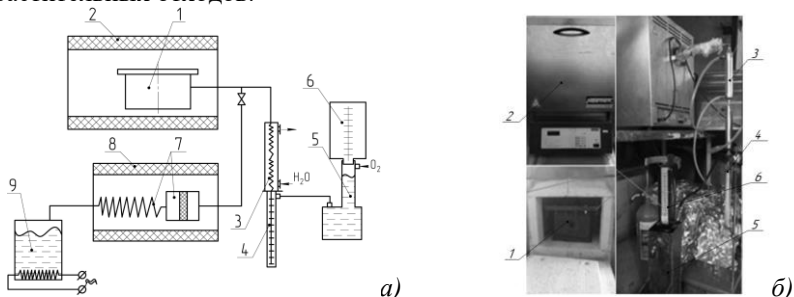


Рисунок 1 – Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки для получения активированного угля из растительных отходов: 1 – камера пиролиза; 2 – муфельная печь; 3 – сепаратор; 4 – мерник дистиллята; 5 – гидрозатвор; 6 – сборник газа; 7 – сборный узел активации; 8 – муфельная печь; 9 – генератор пара.

Были проведены исследования по термическому разложению растительных отходов агропромышленного комплекса – льняной костры, скорлупы грецкого ореха. На рис. 2 представлены кинетические зависимости термического разложения растительных отходов при их различной влажности.

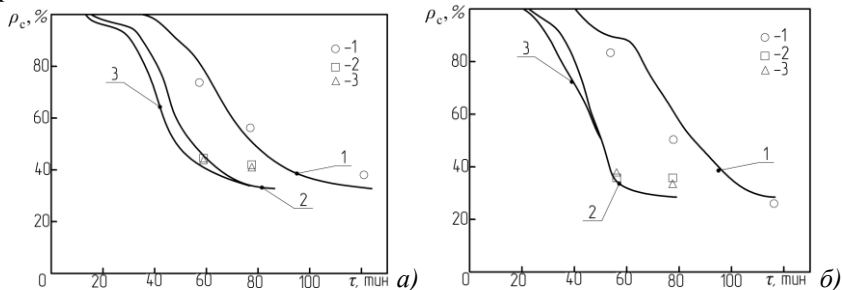


Рисунок 2 – Кинетическая зависимость термического разложения сырья: а – из скорлупы грецкого ореха; б – из костры масличного льна (при различной влажности исходного сырья: 1 – 40 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %)

Анализ кривых показал, что на удельный выход твердого остатка высокая влажность влияния не оказывает, однако влажность значительно влияет на продолжительность термического разложения. Исходя из данных исследований и известной априорной информации можно сделать вывод, что наиболее рационально перед пиролизом отходы высушивать до влажности 7 – 10 %, дальнейшее уменьшение влажности не приводит к какому-либо существенному влиянию на процесс термического разложения.

Были определены факторы влияния температуры пиролиза и скорости прогрева сырья. По полученным экспериментальным данным выявлено, что кинетика процесса пиролиза различается для исследуемых видов растительного сырья. Скорость прогрева сырья в значительной степени влияет на удельный выход твердого остатка для всех исследуемых растительных предшественников.

В ходе исследований было определено, что костру масличного льна наиболее целесообразно пиролизировать при температуре 450 °С, лузгу семян подсолнечника при 500 °С, скорлупу грецкого ореха при 550 °С. Анализ данных показал, что для максимального выхода твердого остатка, прогревать сырье следует в режиме 5 °С/мин.

Были проведены исследования по водопаровой активации карбонизатов из растительных предшественников. Режимы активации были следующими: температура камеры 800-900 °С, активирующий агент – водяной пар, соотношение карбонизата и активирующего агента 1:1. Выход активированного угля рассчитывался от массы сырья. Углеродистый остаток из каждого растительного предшественника был получен при рациональных режимах, обоснованных в предыдущих разделах.

На рис. 3, 4 представлены результаты исследований по получению активированного угля из костры льна, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха.

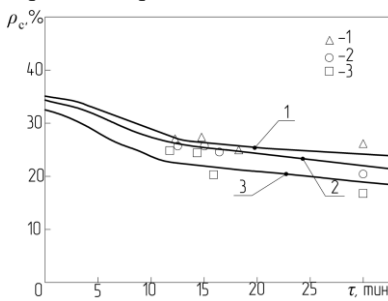


Рисунок 3 – Кинетическая зависимость удельного выхода активированного угля: 1 – из лузги семян подсолнечника; 2 – из скорлупы грецкого ореха; 3 – из костры льна

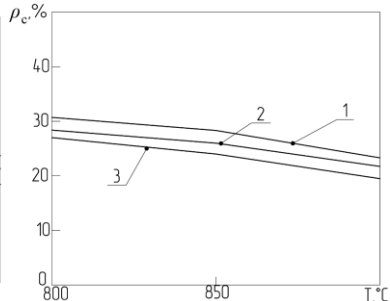


Рисунок 4 – Зависимость удельного выхода активированного угля от температуры активирующего агента: 1 – лузга семян подсолнечника; 2 – скорлупа грецкого ореха; 3 – костра льна ($\tau_A=15$ мин)

Отклонение расчётных данных от экспериментальных по рис. 3 составило не более 11 %. Из рисунка видно, что несмотря на преобладание углеродистой структуры, у всех исследуемых образцов выход активированного угля различен. Очевидно, что исходное сырье оказывает существенное влияние на удельный выход активированного угля.

В таблице 1 представлены адсорбционные возможности полученных активированных углей при различной температуре активирующего агента. *Таблица 1 – Адсорбционные характеристики активированного угля, полученного из растительных отходов*

Т, °С	Адсорбционная активность по йоду, %, ГОСТ 6217-74 БАУ-А, не менее 60 %		
	костра	лузга	скорлупа без дробления
800	68.00	75.00	65.00
850	69.00	76.00	79.00
900	66.00	74.00	77.00

Как видно из таблицы 1 все исследуемые образцы соответствуют по своим адсорбционным характеристикам ГОСТ 6217-74, соответственно, наиболее рациональна температура активирующего агента в 800 °С для костры и лузги ввиду того, что при схожих значениях адсорбционной активности при повышении температуры активирующего агента снижается удельный выход активированного угля. Температура активирующего агента в 900 °С избыточна для активации исследуемых карбонизатов. Для скорлупы грецкого ореха режим в 850 °С наиболее предпочтителен, поскольку позволяет усилить адсорбционные способности.

Для скорлупы грецкого ореха были проведены исследования по активации частиц различной дисперсности с эквивалентным диаметром частицы 1 мм, 5 мм, 10 мм при температуре активирующего агента 850 °С. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Адсорбционные характеристики активированного угля из скорлупы грецкого ореха

Продолжительность активации, мин	Размер частицы, мм	Адсорбционная активность по йоду, %, ГОСТ 6217-74 БАУ-А, не менее 60 %		
		10	5	1
15		79.00	84.00	87.00
30		86.00	87.00	92.00

Более высокие значения адсорбционной активности по йоду у мелкодисперсных углей получены благодаря лучшему взаимодействию частицы с паром.

Полученные образцы активированного угля из костры льна имеют хрупкие мелкодисперсные частицы неопределенной формы, соответственно по физико-механическим характеристикам могут быть сертифицированы по ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный». Характеристики полученных образцов представлены в таблице 3.

Были проведены исследования по получению образцов

цилиндрических гранул активированного угля из лузги семян подсолнечника. Гранулы были сформированы из карбонизатов лузги подсолнечника плотностью 600, 900 и 1200 кг/м³. Были проведены три контрольных эксперимента для каждого образца со степенью выгорания 28 – 31 %, 45 – 48 %, 69 – 71 %. Результаты исследований показали, что сырье высокой плотности имеет большую поглотительную способность при равной степени выгорания образцов. Эффективная степень выгорания для достижения значений ГОСТ 8703-74 составляет 32 – 38 % при плотности гранул 900 кг/м³. В таблице 4 представлены характеристики полученных образцов.

Таблица 3 – Характеристики активированного угля, полученного из костры масличного льна

Параметр по ГОСТу 4453-74, марка ОУ-А	Полученный образец
Внешний вид: тонкодисперсный порошок черного цвета, не содержащий посторонних включений	
Адсорбционная активность по метиленовому голубому или метиленовому синему, не менее 225 мг/г	243
Адсорбционная активность по метиленовому оранжевому, не менее 210 мг/г	221
Адсорбционная активность по мелассе, %, не менее 100 %	112
Массовая доля золы, не более 10 %	8
Массовая доля влаги, не более 10 %	6
Степень измельчения, остаток на сетке 0,1 К, не более 5 %	2

Таблица 4 – Характеристики активированного угля, полученного из лузги семян подсолнечника

Параметр по ГОСТ 8703-74 Марка АР-А	Полученный образец
Внешний вид: гранулы цилиндрической формы темно-серого или черного цвета без механических примесей	Гранулы цилиндрической формы D=2,8 мм L=4-7 мм, черного цвета
Прочность гранул на истирание, не менее 68 %	73
Насыпная плотность, не более 550 г/дм ³	515
Равновесная активность по толуолу, не менее 145 г/дм ³	157
Массовая доля влаги, не более 10 %	8
Степень измельчения, остаток на сетке 0,1 К, не более 5 %	2

В **четвертой главе** на основе результатов аналитических и экспериментальных исследований разработан способ термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь и технологическая схема установки получения активированного угля из

растительных отходов (рис. 5). Для технологического расчёта разработаны методики, позволяющие определить рациональные параметры аппаратного оформления зон подготовки отходов, сушки сырья, пиролиза сырья, активации угля, охлаждения активированного угля, сепарации пиролизных газов, газоочистки. Разработанные методики расчёта позволяют рассчитывать оборудование для термической переработки различной производительности и конфигурации.

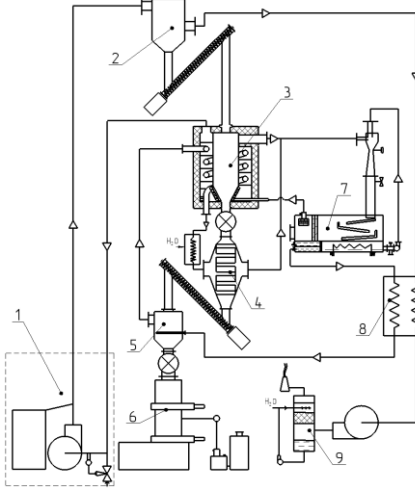


Рисунок 5 – Схема установки получения активированного угля: 1 – зона измельчения; 2 – камера сушки; 3 – модуль пиролиза; 4 – камера активации угля; 5 – камера конвективного охлаждения; 6 – узел вакуумной сушки; 7 – конденсатор пиролизных газов; 8 – рекуперативный теплообменник; 9 – абсорбер

Представлены результаты расчёта установки получения активированного угля. Приведено технико-экономическое обоснование термической переработки растительных отходов в активированный уголь. Срок окупаемости установки получения активированного угля составит 2 года 7 месяцев. Годовая прибыль от одной установки составит 11,2 млн. рублей.

В **приложении** представлены программный расчёт процессов термического разложения растительного сырья, акт о возможности внедрении результатов диссертационного исследования, дипломы, патенты и свидетельства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель процесса получения активированного угля из различных растительных отходов агропромышленного комплекса, таких как лузга семян подсолнечника, костра масляного льна, скорлупа грецкого ореха в непрерывно действующем аппарате.

2. В ходе проведения аналитических и экспериментальных исследовательских работ установлены рациональные технологические режимы (влажность сырья, температура пиролиза, скорость прогрева сырья,

температура активации, степень выгорания угля, степень уплотнения активированного угля, форма частицы активированного угля) получения активированного угля термохимическим методом для таких растительных отходов, как лузга семян подсолнечника, костра масличного льна, скорлупа грецкого ореха. Установлены рациональные режимы получения осветляющего порошкового активированного угля по ГОСТ 4453-74 из костры масличного льна. Установлены рациональные режимы получения активированного угля по ГОСТ 6217-74 из скорлупы грецкого ореха. Так, из лузги семян подсолнечника при температуре активации 850 °С с плотностью гранул 900 кг/м³ степень выгорания для достижения равновесной активности по толуолу по ГОСТ 8703-74 составляет 37 %.

3. Разработан способ термохимической переработки растительных отходов в активированный уголь, новизна технического решения защищена патентом на изобретение № 2789699.

4. Разработаны аппаратурное оформление и инженерная методика расчёта промышленной установки с узлами подготовки отходов, сушки, пиролиза, активации, охлаждения активированного угля, рекуперации тепловой энергии, сепарации пиролизных газов, позволяющей использовать неконденсируемые пиролизные газы и горючую фракцию дистиллята в качестве топлива.

5. На основе теоретических расчётов обоснованы основные конструктивно-технологические параметры непрерывно действующей установки производства активированного угля производительностью 100 кг/час по влажному сырью.

6. Технико-экономический анализ показал, что получение активированного угля термохимическим методом экономически оправдано и позволяет получить прибыль даже при небольшой производительности. Срок окупаемости установки составит 2 года 7 месяца. Годовая прибыль от одной установки составит 11,2 млн. рублей.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются:

- в создании комплексной энергосберегающей технологии переработки смесей органического сырья с получением гранулированных адсорбентов, высокоэффективного биотоплива, а также пиролитической смолы, используемой в качестве связующего вещества для получения гранул;
- во внедрении опытно-промышленной установки получения активированного угля непрерывного действия.

Основные обозначения: T – температура, С°; U – влажность, %; X – влагосодержание сушильного агента, %; h – текущая координата высоты насыпного слоя отходов в камере пиролиза, м; ρ – насыпная плотность частиц, кг/м³; c_m – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); l – текущая координата расстояния от прилегающей стенки камеры пиролиза, м; λ – эффективный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); $q_{х.р}$ – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м²·с); B – заданная производительность установки по сухому продукту, м³/ч; k – константа скорости химических реакций; φ – доля угля; H – рабочая высота шахтного аппарата, м; τ – время, с; m – масса, кг;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; w – скорость, м/с; g – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ε – критерий парообразования.

Индексы: сл – слой сырья; с – сырье; у – уголь; ПГ – пиролизные газы; П – пар; ГА – газы активации; А – активация.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, входящие в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиятдинов, **В.Г. Сотников** [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 26-35.

2. Методика расчета зоны активации в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиятдинов, **В.Г. Сотников**, Д.Г. Рябушкин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 4(212). – С. 43-50.

3. Пароперегреватель для установки производства активированного угля / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**, И.Р. Ильясов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 394-400.

4. 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.

5. Моделирование процесса термохимического разложения растительных отходов в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин, А.С. Родионов, **В. Г. Сотников** [и др.] // Вестник технологического университета. – 2023. – № 6. – С. 50-56.

Статьи в научных изданиях, сборниках научных трудов и материалах конференций, индексируемых в базах данных RSCI, Scopus, WOS:

6. Пирогенетическая переработка органических отходов текстильной промышленности в адсорбенты / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**, Д.Ф. Зиятдинова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 5(395). – С. 229-235.

7. Оптимизация конструкции каркаса установки для производства активированного угля / Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиятдинов, **В.Г. Сотников**, Д.Г. Рябушкин // Вестник машиностроения. – 2022. – № 6. – С. 10-13.

8. Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**, Л.Ю. Грунин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 5(389). – С. 173-185.

9. Installation for the Processing of Plant Waste into Activated Carbon Safin, R.G., **Sotnikov, V.G.**, Ziatdinova, D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. – 2023. – P. 809-818.

10. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, **В.Г. Сотников** [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27. – № 4. – С. 117-127.

11. Исследование кинетики термического разложения отходов текстильной промышленности растительного происхождения / Р. Г. Сафин, **В.Г. Сотников** //

Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 3(405). – С. 209-216.

12. Сафин, Р. Г. Энергосберегающая установка переработки органических отходов в топливо и адсорбенты / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников** // Российский химический журнал. – 2023. – Т. 67. – № 3. – С. 17-24.

13. Сафин Р.Г., **Сотников В.Г.**, Зиятдинова Д.Ф. Термическая переработка твердых растительных отходов методом медленного кондуктивного пиролиза. Экология и промышленность России. 2023 – № 11. – С. 9-14.

Монография:

14. Пирогенетическая переработка растительных отходов в активированный уголь: монография / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. – 108 с.

Патент и свидетельства:

15. Патент № 2789699 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/324, С10В 53/00. Способ получения активированного угля: № 2021135547: заявл. 03.12.2021: опубл. 07.02.2023 / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**, А. С. Родионов [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – 9 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2023621311 Российская Федерация. База данных термической переработки отходов растительного происхождения и продукты их термической переработки: № 2023621311: заявл.07.04.2023: опубл. 24.04.2023 / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – 32 с.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680933 Российская Федерация. Программа расчета процесса сушки измельченных коллоидных капиллярно-пористых тел в условии конвективного подвода теплоносителя: № 2023680933 заявл. 22.09.2023; опубл. 06.10.2023 / Р.Г. Сафин, **В.Г. Сотников**; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – 10 с.

Труды в прочих изданиях:

18. Производство активированного угля из органических отходов / Р.Г. Сафин, В. Г. Сотников, Р. Р. Зиятдинов [и др.] // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2021: Сборник материалов, Казань, 21-24 сентября 2021 года. Часть 1. – Казань: ГБУ «НЦБЖД». – 2021. – С. 686-691.

19. Исследование тепломассопереноса при термохимическом разложении растительных отходов. Сафин Р.Г., **Сотников В.Г.**, Рябушкин Д. Г. Тезисы докладов и сообщений дополнительный выпуск XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену XVI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum 16-19 мая 2022 г. Научное электронное издание. – С. 230-233.

20. Установка термической переработки отходов агропромышленного комплекса в адсорбенты/ **В.Г. Сотников** // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции (17-19 октября 2023 года). – М.: ООО «Мегаполис», 2023. – С. 209-212.