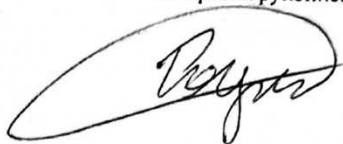


На правах рукописи



Родионов Алексей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ЛИГНИНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ОТХОДОВ В
АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

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 Тимербаев Наиль Фариллович
Официальные оппоненты:	Глушанкова Ирина Самуиловна , доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры охраны окружающей среды; Тимофеева Светлана Сергеевна , кандидат технических наук, федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник лаборатории энергетических систем и технологий Института энергетики и перспективных технологий.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «17» июня 2026 года в 12 часов 30 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, А-406.

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

В отзыве просим указывать фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации, структурное подразделение и должность лица, представившего 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=584597>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Ежегодно на предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) и агропромышленного комплекса (АПК) образуется несколько десятков миллионов тонн лигниноцеллюлозных отходов, являющихся ценным вторичным сырьем, которое может быть реализовано в различных областях промышленности: при производстве жидкого и газообразного топлива, композиционных материалов, биологически активных веществ и т.д. Одним из наиболее перспективных и универсальных способов утилизации таких отходов является их термическая переработка в активированный уголь. Объем производства и применения активированного угля во всем мире непрерывно растет. В частности, мировое потребление активированного угля составляет около 1,1 млн. тонн в год.

Термическая переработка лигниноцеллюлозных отходов имеет высокую эффективность по сравнению с другими методами переработки, но сопряжена со сложностями при организации непрерывного производства, связанными с герметизацией отдельных стадий, различием свойств исходного сырья. В связи с этим исследование термического процесса переработки лигниноцеллюлозного сырья и усовершенствование существующих установок является актуальным.

Работа выполнялась в рамках грантов и конкурсов:

1. 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.).

2. 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 от 26.12.2024.).

3. Грант ФСИ «Студенческий стартап» по теме «Разработка ресурсо-энергосберегающей установки переработки вторичного сырья в активированный уголь, биомасло и биотопливо» (договор № 2740ГССС15-L/92921 от 03.07.2024).

4. Конкурс научно-исследовательских проектов «ТехноСтарт» на тему «Разработка аппарата конвективной сушки для установки термолитной переработки вторичного сырья в активированный уголь» (договор № 3-24 от 18.01.2024 г.).

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

Вопросам термической переработки растительных отходов посвящены работы В.М. Мухина, В.Н. Пилякина, Д.А. Пономарева, А.Н. Грачева, Д.В. Тунцева, 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. Самонина, Л.Г. Пьяновой, 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.C. Park, Di Blasi.

Цель исследования заключается в разработке и научном обосновании технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь с определением рациональных режимов процессов сушки, пиролиза и физической активации.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1) Определение температурной зависимости коэффициента влагопроводности лигноцеллюлозного сырья.

2) Разработка математической модели процесса получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

3) Проведение теоретических и экспериментальных исследований по получению активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов в лабораторных условиях.

4) Разработка методики расчёта аппаратного оформления процесса термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь.

5) Разработка технологии и аппаратного оформления процесса термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь.

Объект исследований: лигниноцеллюлозные отходы – лужга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха и сосновая щепа; термический процесс переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь.

Предмет исследований: закономерности формирования пористой структуры и адсорбционных свойств активированного угля в зависимости от параметров пиролиза и режимов активации.

Научная новизна результатов работы. Работа содержит результаты исследований по переработке лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь:

1. Разработана методика определения коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозных отходов.

2. Разработана математическая модель тепло-массообменных процессов переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь с применением модели диффузионных реакций, позволяющая рассчитать изменение удельной поверхности и суммарного объема пор.

3. В результате моделирования выявлено, что:

- коэффициент влагопроводности для лигниноцеллюлозного сырья (лужга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха и сосновая щепа) в зависимости от температуры (40 – 110°C) находится в диапазоне $3,5 - 10,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$;

- сушку лигниноцеллюлозных отходов следует проводить в высокотемпературном режиме при температуре топочного газа 235 °С в течение 15 минут, затем необходимо снижать температуру топочного газа до 150 °С;

- рациональная температура процесса пиролиза лигниноцеллюлозных отходов составляет 500 °С;

- толщина насыпного слоя при пиролизе должна находиться в диапазоне 0,15 – 0,3 м;

- оптимальная температура паровой активации составляет 900 °С при продолжительности активации 25 – 40 минут и расходе перегретого пара 2,5 кг/кг;

- активированный уголь, полученный из скорлупы грецкого ореха, имеет удельную поверхность 1370 м²/г, суммарный объём пор 1,7 см³/г и высокую адсорбционную активность по йоду 625 мг/г. Активированный уголь из лужги подсолнечника имеет удельную поверхность 1300 м²/г, суммарный объём пор 1,62 см³/г и высокую

адсорбционную активность по метиленовому синему 474 мг/г.

4. Разработан способ переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь. Научная новизна принятых решений подтверждается патентами (RU 2789699 C1, RU 2844881 C1).

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории термической переработки лигниноцеллюлозных отходов: установлены количественные закономерности формирования пористой структуры активированного угля в зависимости от режимных параметров физической активации (температуры, времени, расхода пара) и природы исходного лигниноцеллюлозного сырья.

Практическая значимость работы заключается в решении задач, стоящих перед ЛПК и АПК, которые связаны с утилизацией лигниноцеллюлозных отходов:

1. Разработаны методы расчета аппаратурного оформления процесса переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь.

2. Разработано аппаратурное оформление процесса получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

3. Результаты исследований приняты к внедрению в ООО «Реализация альтернативных решений» (г. Казань), а также применяются в учебном процессе по дисциплине «Технология и оборудование деревообработки» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Методы и методология исследования. 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 и языка программирования Python.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением сертифицированного оборудования и сходимостью результатов с работами других исследователей. Расхождение экспериментальных и расчетных данных, полученных при математическом моделировании, не превышает 17 %. Обоснованность выводов подтверждена созданием специализированного лабораторного комплекса, включающего установки для исследования конвективной сушки, пиролиза и физической активации, оснащенные поверенными контрольно-измерительными приборами.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в разработке технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь; решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера; разработке математической модели; создании экспериментального комплекса; проведении математического моделирования и анализе полученных результатов. Соискателю принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса по п. 10 «Методы, технологии и технические средства обеспечения экологической безопасности, переработки и утилизации отходов сельскохозяйственного производства, эколого-реабилитационные процессы и технологии» (пункты 3, 4 научной новизны); паспорту специальности 4.3.4. Технологии, машины и

оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины по п. 4 «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункты 1, 2 научной новизны).

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика определения коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозных отходов.

2. Математическая модель процесса производства активированного угля.

3. Результаты физического и математического моделирования процесса переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь с эксплуатационными режимами.

4. Методика расчета технологии и аппаратурного оформления производства активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

5. Технология и аппаратурное оформление процесса получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных форумах и конференциях: Международной научно-практической конференции «Разработка и применение наукоемких технологий в эпоху глобальных трансформаций» (Уфа, 2022 г.), Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса» (Воронеж, 2023 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.), Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Интенсификация теплообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2024 г.), Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, входящем в реферативную базу Scopus, 2 патента на изобретение, 9 публикаций в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 164 страницах, включает 59 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 128 наименований цитируемых работ, из них 36 наименований работ на иностранных языках.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, дана общая характеристика работы.

В первой главе диссертации проведен анализ классификации, состава и объемов образования лигниноцеллюлозных отходов. Рассмотрены существующие методы

пиролизной переработки (быстрый, медленный, высокотемпературный) и технологии производства активированного угля (физическая и химическая активация). Выполнен обзор аппаратного оформления процессов.

Обоснована целесообразность медленного пиролиза с кондуктивным нагревом и физической активации для переработки скорлупы грецкого ореха, лузги подсолнечника и сосновой щепы. Отсутствие единой технологии для всего спектра таких отходов делает актуальным исследование их термической переработки.

Во второй главе описана физическая картина процесса получения активированного угля, включающая сушку, пиролиз, активацию и охлаждение активированного угля. Представлено математическое описание процесса получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

Математическое моделирование конвективной сушки сыпучего лигноцеллюлозного сырья сводится к нахождению нестационарного поля влагосодержания по сечению материала путём решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса для бесконечного цилиндра:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = K \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + K\delta \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\tau} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Начальные условия системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса задаются исходными значениями влажности U_{M0} и температуры высушиваемого материала T_{M0} :

$$U(r; 0) = U_{M0}; \quad (3)$$

$$T(r; 0) = T_{M0}. \quad (4)$$

Условия на границе высушиваемой частицы можно записать граничным условием 3-го рода и уравнением Фрейндлиха, соответственно:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = \alpha (T_{\tau, r} - T_{\pi}); \quad (5)$$

$$U(\tau; 0) = U_{\pi} = a\varphi_{\tau}^n. \quad (6)$$

Теплоперенос при термохимическом разложении выражается дифференциальным уравнением теплопереноса и отображает кинетику температуры по глубине слоя материала:

$$\rho_{\text{сл}} \cdot c_{\text{сл}} \cdot \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \cdot \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \right) + q_{\text{сл}}. \quad (7)$$

Сток (приток) тепла слоя материала определяется прогревом материала, испарением влаги при сушке и химическими реакциями при пиролизе:

$$q_{\text{сл}} = q_{\text{пр}} + q_{\text{исп}} + q_{\text{хр}}. \quad (8)$$

Начальное условие для решения дифференциального уравнения теплопереноса (7) задается исходным значением температуры обрабатываемого сырья $T_{\text{м.нач}}$ °С:

$$T_{\text{сл}}(l, 0) = T_{\text{м.нач}}. \quad (9)$$

Условия на границе обрабатываемого слоя материала можно выразить граничным условием 3-го рода:

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \right|_{l=0} = \alpha (T_{\tau r} - T_{\pi}). \quad (10)$$

Для выявления температуры материала в слое необходимо определить изменение

температуры и влагосодержания частицы материала, находящейся в слое. Для расчета кинетики температуры и влагосодержания частицы введена система дифференциальных уравнений теплопереноса:

$$\frac{\partial U_{\text{ч}}}{\partial \tau} = \frac{k_p}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{\text{ч}}}{\partial r} \right); \quad (11)$$

$$\rho_{\text{ч}} \cdot c_{\text{ч}} \cdot \frac{\partial T_{\text{М}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T_{\text{М}}}{\partial r} \right) + \rho_{\text{ч}} \cdot r \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial U_{\text{ч}}}{\partial \tau}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_{\text{ч}}}{\partial \tau} = \frac{RT_{\text{ч}}}{C_0 \mu_{\text{В}}} \left[k_p \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{\text{ч}}}{\partial r} \right) + \varepsilon \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot \frac{\partial U_{\text{ч}}}{\partial \tau} \right] + \frac{P_{\text{ч}}}{T_{\text{ч}}} \left(\frac{\partial T_{\text{ч}}}{\partial \tau} \right). \quad (13)$$

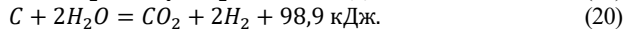
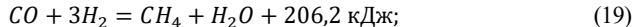
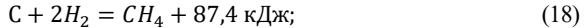
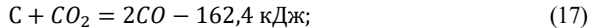
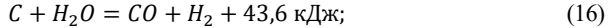
Начальные условия по температуре, влажности и давлению для уравнений (11-13) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{ч}}(r, 0) &= U_{\text{М.нач}}; \\ T_{\text{ч}}(r, 0) &= T_{\text{М.нач}}; \\ P_{\text{ч}}(r, 0) &= P_{\text{атм}}; \end{aligned} \quad (14)$$

а граничные условия:

$$\begin{aligned} U_{\text{ч}}(0, \tau) &= a \cdot \varphi^n = 0; \\ T_{\text{ч}}(0, \tau) &= T_{\text{сл}}; \\ P_{\text{ч}}(0, \tau) &= P_{\text{сл}}. \end{aligned} \quad (15)$$

В процессе паровой активации угля протекают следующие химические реакции:



Механизм химических реакций паровой активации углеродсодержащего сырья показан на рисунке 1.

В разрабатываемой модели частица описывается совокупностью цилиндрических пор с неоднородными начальными радиусами. Поры растут в длину (эндотермическая реакция, уравнение 17) и в радиальном направлении (экзотермические реакции парового обугливания, уравнения 16, 18–20):

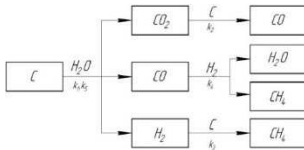


Рисунок 1 – Схема механизма химических реакций, протекающих при паровой активации углеродсодержащего сырья

$$\frac{\partial l}{\partial \tau} = \frac{k_2 \cdot C_{CO_2}}{\rho_{\text{М}}}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{(k_1 + k_3 + k_4 + k_5) \cdot C_{H_2O}}{\rho_{\text{М}}}. \quad (22)$$

Исходя из уравнений 21, 22 можно определить изменения удельной поверхности ($\text{м}^2/\text{г}$) и объема пор ($\text{см}^3/\text{г}$):

$$\partial F = 2\pi l dr + 2\pi r dl; \quad (23)$$

$$\partial V = 2\pi r l dr + \pi r^2 dl. \quad (24)$$

Балансы масс частиц с учетом массопереноса путем диффузии и химической реакции приведены следующим образом:

$$\varepsilon \frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(D_i R^2 \frac{\partial C_i}{\partial R} \right) - r_i. \quad (25)$$

Начальные условия для уравнения (25) имеют вид:

$$C_i(R, 0) = 0. \quad (26)$$

Граничные условия для уравнения (23) описываются соотношением:

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial \tau} \right|_{R=0} = \Delta j \cdot \frac{F}{V/10^6}. \quad (27)$$

Объемные скорости реакции r_i ($\frac{\text{моль}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}$) как для CO_2 , так и для пара H_2O зависят от их собственных скоростей реакций и их удельных поверхностей:

$$r_{\text{CO}_2} = v_c \rho_M \frac{\partial l}{\partial \tau} S_{\text{CO}_2}; \quad (28)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = v_c \rho_M \frac{\partial r}{\partial \tau} S_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (29)$$

В третьей главе описан созданный лабораторный комплекс и экспериментальные установки для исследования сушки, пиролиза и активации. Изложены методики проведения экспериментов и обработки данных (определение коэффициента влагопроводности, материальный баланс, анализ пористости). Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных.

Для проверки математической модели создан лабораторный комплекс (рис. 2), включающий: оборудование для подготовки сырья; три специализированные установки для исследования сушки, пиролиза и активации в контролируемых условиях; оборудование для проведения анализа.

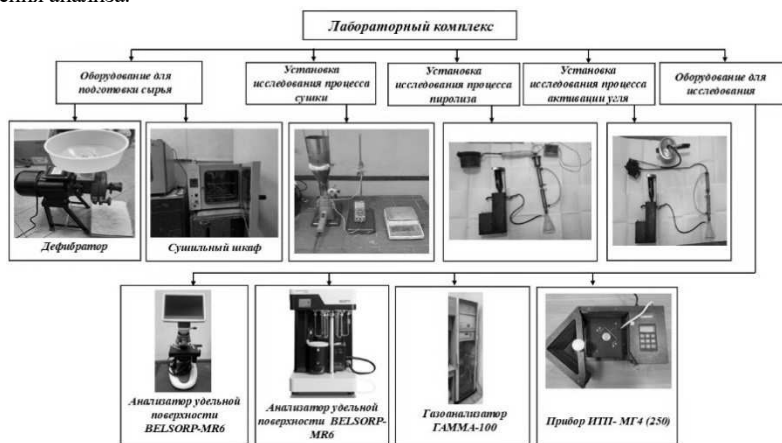


Рисунок 2 – Лабораторный комплекс по получению активированного угля

Коэффициент влагопроводности определяется решением обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности при помощи метода конечных разностей по уравнению:

$$a_m = \frac{(U_x^\tau - U_x^{\tau-1}) * \Delta x^2}{(U_{x=0}^{\tau-1} - 2 * U_x^{\tau-1} + U_{x=b}^{\tau-1}) * \Delta \tau}. \quad (30)$$

Для вычисления коэффициента влагопроводности a_m предлагаемым методом необходимо знать влагосодержание материала в трёх точках на поверхности материала

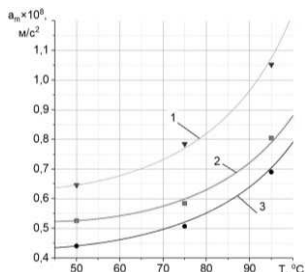


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента влагопроводности от температуры: 1 – лузга подсолнечника; 2 – сосна; 3 – скорлупа грецкого ореха

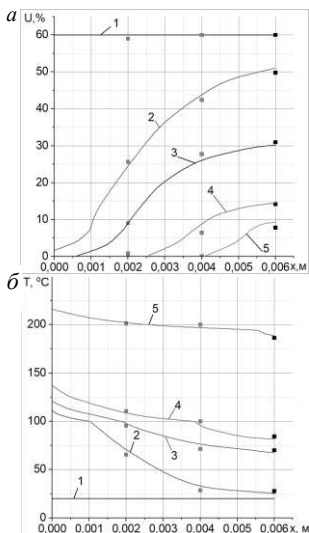


Рисунок 4 – Диаграмма влажосодержания (а) и температуры (б) шпона: сосны 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 5$ мин; 3 – $\tau = 10$ мин; 4 – $\tau = 15$ мин; 5 – $\tau = 20$ мин

увеличивается высота камеры пиролиза Н (см поз. 3 рис. 8), а при ширине более 0,3 м увеличивается необходимая продолжительность температурного воздействия, поэтому толщина насыщенного слоя должна находиться в диапазоне 0,15 – 0,3 м.

Анализ таблицы 1 показывает, что с повышением температуры пиролиза с 450 до 600 °С выход карбонизата снижается для всех видов сырья, тогда как содержание углерода возрастает, что свидетельствует о более глубокой карбонизации. Среди исследованных

$U_{x=0}^{\tau-1}$, в глубине $U_x^{\tau-1}$ и в центре материала $U_{x=b}^{\tau-1}$, где x – текущая координата, а τ – текущее время. Эти значения вычисляются при аналитической обработке кривых сушки, построенных по результатам экспериментальных исследований на опытной установке. На рисунке 3 линиями показаны полученные значения коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозных отходов, а точками – экспериментальные данные, полученные стационарным методом. Результаты расходятся не более чем на 15 %.

По графику (рис. 3) видно, что коэффициент влагопроводности существенно зависит от природы материала. При одинаковой температуре наибольшие значения характерны для лузги подсолнечника, средние – для сосны, наименьшие – для скорлупы грецкого ореха. Это различие обусловлено особенностями внутренней структуры материалов, таких как пористость, плотность, химический состав и морфологические характеристики.

На рис. 4 представлены расчетные и экспериментальные кривые температуры и влажности древесины сосны с начальным влажосодержанием 60 % при конвективной сушке теплоносителем с температурой 235 °С и влажностью 5,3 % при скорости обтекания 2 м/с.

Анализ температурных зависимостей (рис. 4 б) показывает, что через 15 минут температура поверхности приближается к 150 °С и начинается переход от процесса сушки к процессу термомодификации с выделением горючих газов. В связи с этим через 15 минут для сокращения выбросов продуктов разложения древесины следует понизить температуру теплоносителя до 150 °С.

Математическим моделированием процесса термохимической переработки лигниноцеллюлозного сырья с влажосодержанием 5,3 % при различной толщине насыщенного слоя получены зависимости, представленные на рисунке 5.

При ширине вертикальной реторты L, имеющей прямоугольное сечение менее 0,15 м значительно

видов сырья скорлупа грецкого ореха демонстрирует наилучшие показатели: максимальный выход продукта (37,5 % при 450 °С) и наивысшее содержание углерода (86,4 % при 600 °С).

На основании анализа представленных данных можно сделать вывод, что температура пиролиза 500 °С является наиболее рациональной, поскольку она обеспечивает баланс между выходом продукта и его качеством (содержанием углерода).

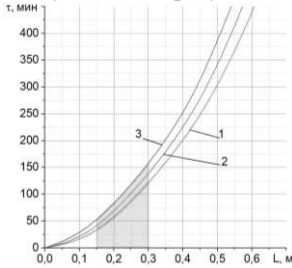


Рисунок 5 – Зависимость продолжительности процесса пиролиза от толщины насыпного слоя: 1 – скорлупа грецкого ореха; 2 – сосновая щепа; 3 – лузга подсолнечника

Таблица 1 – Выход угля и содержание углерода (в скобках) в зависимости от температуры и вида лигноцеллюлозного сырья

Температура	450 °С	500 °С	600 °С
Сырье	Выход, %		
Скорлупа грецкого ореха	37,5 (76,3)	36,5 (81,2)	32,7 (86,4)
Лузга подсолнечника	33,4 (72,6)	31,2 (76,4)	30,5 (82,4)
Сосновая щепа	31,1 (70,4)	27,4 (75,4)	26,3 (79,2)

На рисунке 6 представлены расчетные и экспериментальные данные суммарного объема и удельной поверхности пор угля, полученного из сосновой щепы в процессе его активации. На рисунке 7 показана кинетическая зависимость изменения удельной массы угля и газов активации по времени активации. На основании уравнений (16-20) и уравнений химической кинетики (21-22) была рассчитана зависимость расхода перегретого водяного пара от производительности по активированному углю (рис. 8).

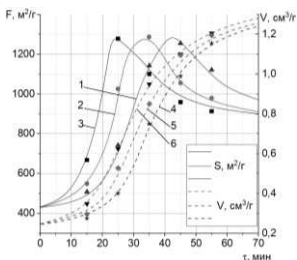


Рисунок 6 – Зависимость удельной поверхности и зависимости изменения суммарного объема пор угля в процессе активации при газовой активации при различных температурах: 1, 4 – температуре активации: 1 – 800 °С; 2, 5 – 900 °С; 3, 6 – 1000 °С

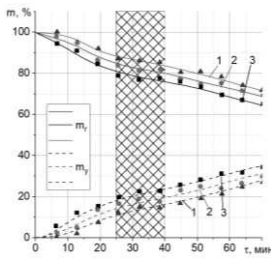


Рисунок 7 – Кинетическая зависимость изменения удельной массы карбонизата и газов активации при газовой активации при различных температурах: 1 – 800 °С; 2 – 900 °С; 3 – 1000 °С

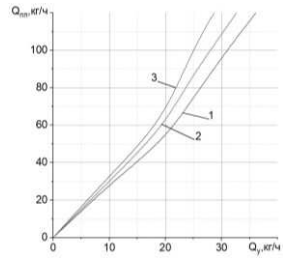


Рисунок 8 – Зависимость расхода перегретого водяного пара от производительности по активированному углю при газовой активации при различных температурах: 1 – 1000 °С; 2 – 900 °С; 3 – 800 °С

Анализ кинетических зависимостей показывает, что продолжительность процесса активации угля является важным показателем, поскольку при недостаточной продолжительности процесса пористая структура развивается не полностью, при избыточном увеличении времени обработки удельная поверхность начинает снижаться из-за перекрытия пор. Увеличение температуры процесса сокращает необходимое время

теплового воздействия для достижения максимальной удельной поверхности.

На основании проведенных исследований выявлены оптимальные параметры процесса активации: температура 900 °С, продолжительность 25 – 40 минут, расход перегретого пара 2,5 кг/кг, при которых достигается наилучшее развитие пористой структуры без чрезмерного выгорания углеродного материала.

В таблице 2 представлен сравнительный анализ полученных активированных углей с существующими (промышленными) аналогами.

Анализ показал, что все исследованные активированные угли соответствуют или превосходят промышленные аналоги БАУ-А и БАУ-Ац по большинству показателей. Все полученные угли перспективны для практического применения, а выбор сырья зависит от целевого назначения: скорлупа грецкого ореха и лузга подсолнечника, соответственно, оптимальны для сорбции низкомолекулярных и высокомолекулярных соединений.

Таблица 2 – Сравнительный анализ полученных активированных углей

Показатель	Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	Удельная площадь, м ² /г	Выход относительно сухого сырья, %	Адсорбционная активность по йоду, мг/г, не менее	Адсорбционная активность по метленовому синему, мг/г
Сырье					
Скорлупа грецкого ореха	1,7	1370	22,3	625	330
Лузга подсолнечника	1,62	1300	18,1	459	474
Сосновая щепка	1,5	1250	20,5	514	343
БАУ-А ГОСТ 6217-74	1,6	1100	–	600	290
БАУ-Ац ГОСТ 6217-74	1,7	1300	–	600	290

В четвертой главе на основе результатов аналитических и экспериментальных исследований разработана промышленная установка термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь. Схема установки приведена на рисунке 8.

Установка для производства активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов работает следующим образом: сырьё измельчают на стадии измельчения 1, сушат топочными газами при температуре 235 °С на стадии конвективной сушки 2, затем подвергают пиролизу при 500 °С в камере пиролиза 3 с получением угля и пиролизных газов. Уголь активируют перегретым водяным паром при 900 °С в камере активации 4 с образованием газов активации, после чего активированный уголь охлаждают до 90 – 100 °С на первой стадии охлаждения 5 путем орошения сепарированной водой с образованием водяных паров. На второй стадии 6 активированный уголь охлаждают понижением давления в камере до 3 – 6 кПа. Образующиеся пиролизные газы и газы активации разделяют в сепараторе 7 на сепарированную воду, горючую жидкость и горючие газы. Горючие газы и горючая жидкость, соответственно, аккумулируются в газгольдере 8 и буферной емкости 9. Часть горючей жидкости смешивается с горючими газами в конфузоре-диффузоре смесителе 10, образуя топливную смесь. Топливная смесь подается в горелку 16 для получения необходимого тепла для запуска каталитического процесса окисления. При достижении температуры 500 °С в топочном

пространстве 14 подача топливной смеси переключается в распределитель топлива 16, расположенный в зоне каталитического окисления 15. В зоне каталитического окисления 15 происходит беспламенное окисление топливной смеси с образованием в топочном пространстве 14 топочных газов с температурой 1000 – 1050 °С. В змеевиковом теплообменнике, расположенном в топочном пространстве, нагревают насыщенный водяной пар с первой стадии охлаждения активированного угля 5 до температуры 900 – 950 °С. Требуемый для проведения процесса активация угля расход пара обеспечивается дополнительным его вводом через регулятор подачи пара 23, получающий сигнал от датчика расхода перегретого водяного пара 22. Выходящий из топочного пространства газ разделяют на два потока. Шибберная задвижка 23 регулирует соотношение расходов двух потоков топочного газа. Первая часть поступает в рубашку пиролизной камеры 3 и используется в качестве теплового агента для кондуктивного пиролиза и конвективной сушки 2. Вторая часть топочных газов из топочного пространства 14 нагревает воздух в воздухонагревателе 13 до температуры 450 – 500 °С. Затем топочные газы нагревают топливную смесь в топливонагревателе 12 до температуры 150 – 200 °С.

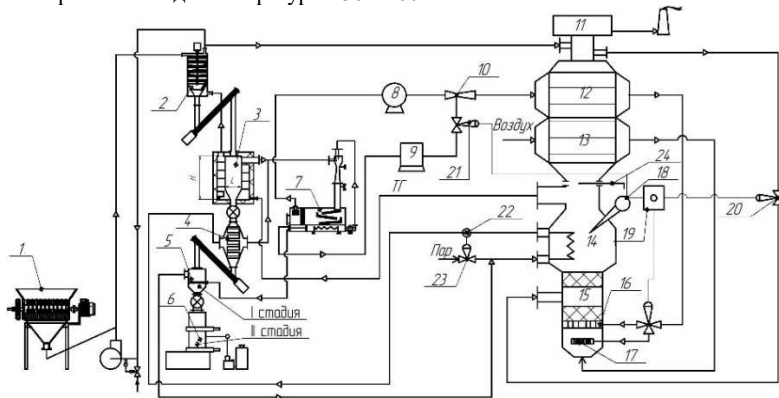


Рисунок 8 – Схема установки по получению активированного угля: 1 – стадия измельчения; 2 – стадия конвективной сушки; 3 – камера пиролиза; 4 – камера активации; 5 – первая стадия охлаждения активированного угля; 6 – вторая стадия охлаждения; 7 – сепаратор; 8 – газольдер; 9 – буферная ёмкость; 10 – конфузور-диффузорный смеситель; 11 – скруббер; 12 – топливонагреватель; 13 – воздухонагреватель; 14 – топочное пространство котла; 15 – зона каталитического окисления; 16 – распределитель топлива; 17 – горелка; 18 – датчик температуры; 19 – блок управления; 20, 21 – вентиль; 22 – датчик расхода перегретого водяного пара; 23 – регулятор подачи пара; 24 – шиберная задвижка

Для технологического расчёта разработаны методики, позволяющие определить рациональные параметры аппаратного оформления зон сушки сырья, пиролиза сырья и активации угля. Разработанные методики расчёта позволяют рассчитывать оборудование для термической переработки различной производительности и конфигурации.

Срок окупаемости установки получения активированного угля составит 4 года 2 месяца. Годовая прибыль от одной установки составит 6 млн. рублей.

В приложении представлены статистическая обработка расчетных и экспериментальных данных, оценка экономической эффективности внедрения технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для определения температурной зависимости коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозного сырья в диапазоне температур 40–110 °С разработан нестационарный метод, основанный на решении обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности (второй закон Фика). Апробация разработанного метода выполнена путём сопоставления с результатами, полученными стационарным способом; расхождение результатов не превышает 15 %. Выявлено, что помимо температуры, величина коэффициента влагопроводности в значительной степени определяется природой сырья, обусловленной различиями в его пористости, плотности, химическом составе и морфологических характеристиках.

2. Разработана математическая модель, описывающая совокупность взаимосвязанных процессов – конвективной сушки, кондуктивного пиролиза и парогазовой активации с применением модели диффузионных реакций. Модель учитывает нестационарный тепло- и массоперенос, кинетику термического разложения основных компонентов биомассы (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), а также гидродинамические особенности транспортирования сыпучих материалов. Адекватность модели подтверждена экспериментально: расхождение расчетных и опытных данных не превышает 17 %.

3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по получению активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов (лузга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха, сосновая щепа) в лабораторных условиях. На основе физико-математического моделирования определен коэффициент влагопроводности сырья ($3,5 - 10,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$) и обоснованы рациональные режимные параметры технологических пределов: сушка (235 °С, 15 мин с последующим снижением до 150 °С), пиролиз (температура 500 °С, толщина слоя 0,15–0,3 м), паровая активация (температура 900 °С, время 25–40 мин, расход пара 2,5 кг/кг). Экспериментально подтверждено высокое качество целевого продукта: активированный уголь из скорлупы грецкого ореха имеет удельную поверхность 1370 м²/г, суммарный объём пор 1,7 см³/г и адсорбционную активность по йоду 625 мг/г, из лузги подсолнечника – 1300 м²/г, объём пор 1,62 см³/г и адсорбцию по метиленовому синему 474 мг/г.

4. Создана инженерная методика расчёта аппаратного оформления технологической линии, включающая алгоритмы проектирования сушильного аппарата, камеры кондуктивного пиролиза, камеры активации и шнековых транспортеров. Методика позволяет определять геометрические, тепловые и гидравлические параметры оборудования на основе заданной производительности и свойств исходного сырья, обеспечивая энергоэффективность и надёжность работы установки.

5. Разработаны технология и конструкция промышленной установки для термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь. Технологическая схема обеспечивает полную газодинамическую изоляцию зон с различными средами, автономность за счёт утилизации пиролизных газов и газов активации, а также соответствие экологическим требованиям. Качество полученного угля соответствует требованиям ГОСТ, что подтверждено стандартными методами оценки.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с применением представленных результатов исследований для получения активированного угля из прочих растительных отходов, включая отходы зернопереработки (солома злаковых культур, шелуха риса, лузга гречихи), отходы лесопереработки (кора, сучья, опилки хвойных и лиственных пород) и другие лигниноцеллюлозные материалы, накопление

которых представляет существенную экологическую проблему для регионов с развитым агропромышленным и лесопромышленным комплексами.

Основные обозначения T , $T_{\text{п}}$, $T_{\text{тг}}$ – температура сырья, поверхности сырья, топочного газа, °C; U , $U_{\text{п}}$ – влагосодержание высушиваемого материала, влагосодержание на поверхности частицы, кг/кг; $a_{\text{т}}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; K – коэффициент влагопроводности, м²/с; δ – термоградиентный коэффициент, °C⁻¹; r – радиус цилиндрической частицы, м; λ – теплопроводность, Вт/(м·°C); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); a, n – экспериментальные коэффициенты уравнения Фрейндлиха; $\varphi_{\text{г}}$ – влагосодержание топочного газа; $\rho_{\text{сл}}$ – насыпная плотность материала, кг/м³; $c_{\text{сл}}$ – удельная теплоемкость насыпного слоя материала, Дж/кг·°C; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C; $q_{\text{сл}}$ – сток (приток) тепла слоя материала, Дж/(м³·с); $q_{\text{пп}}$ – сток тепла на прогрев материала, Дж/(м³·с); $q_{\text{исп}}$ – сток тепла на испарение влаги, Дж/(м³·с); $q_{\text{хр}}$ – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м³·с); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°C; k_p , λ_q , c_q , μ_v , C_0 – коэффициенты молярного переноса влаги, теплопроводности, теплоёмкости, динамической вязкости парогазовой смеси и пористости частицы материала; ρ_m – молярная плотность углеродсодержащего сырья, моль/м³; l – средняя длина пор, м; r – радиус пор, м; k_1 – k_5 – кинетические константы химических реакций, м/с; C_{CO_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрации углекислого газа и перегретого водяного пара, соответственно, моль/м³; ε – пористость материала, м³/м³; R – радиальная координата внутри частицы, м; C_i – концентрация, моль/м³; D_i – коэффициент диффузии, м²/с; r_i – объемная скорость реакции, моль/с·м³; Δj – разность потоков, моль/(м²·с); v_c – объемная доля углерода в частице, м³/м³; S_{CO_2} , $S_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельные объемные поверхности реакции обугливания CO_2 и обугливания паром, соответственно, м²/м³.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России по специальности 4.3.1:

1. Тимербаев Н.Ф. Методика расчета пиролизного реактора в установке производства активированного угля / Н.Ф. Тимербаев, А.С. Родионов, Т.О. Степанова, Р.Г. Сафин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 212. – С. 282-302.

2. Тимербаев Н.Ф. Переработка сельскохозяйственных отходов / Н.Ф. Тимербаев, А.С. Родионов, Т.О. Степанова, Р.Г. Сафин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 213. – С. 236-250.

3. Сафин Р. Г. Определение коэффициента влагопроводности вторичного растительного сырья решением обратной задачи массопроводности / Р.Г. Сафин, А.С. Родионов, Н.Ф. Тимербаев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4(72). – С. 221-228.

4. Тимербаев Н.Ф. Методика расчета лопастной сушилки для установки производства активированного угля / Н.Ф. Тимербаев, А.С. Родионов, Р.Г. Сафин // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 1. – С. 127-137.

Статья, опубликованная в рецензируемом научном журнале, входящем в перечень ВАК Минобрнауки России по специальности 4.3.4:

5. Сафин Р.Г. 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.

Статья в научном издании, индексируемом базой данных Scopus WoS:

6. Safin R.G. Modeling of the Process of Thermochemical Decomposition of Plant Waste in the Activated Carbon Production Line / R.G. Safin, A.S. Rodionov, D.F. Ziatdinova // Theoretical

Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – P. 811-817.

Патент:

7. 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 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет".

8. Патент № 2844881 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/318. Способ получения активированного угля, преимущественно из высоковлажного органического сырья : заявл. 21.04.2025 : опубл. 08.08.2025 / Р. Г. Сафин, **А. С. Родионов**, В. Г. Сотников, А. Н. Загиров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет".

Труды в прочих изданиях:

9. Сафин Р.Г. Математическое моделирование гидравлического сопротивления слоя измельченных отходов при их шнековом транспортировании в установке производства активированного угля / Р.Г. Сафин, **А.С. Родионов**, В.Г. Сотников [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2024. – № 1(118). – С. 59-74.

10. Сафин Р.Г. Моделирование процесса паровой активации углеродсодержащего сырья в технологической линии производства активированного угля / Р.Г. Сафин, **А.С. Родионов**, В.Г. Сотников, Н.Ф. Тимербаев // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 26, № 12. – С. 114-119.

11. Сафин Р.Г. 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. – Т. 26, № 6. – С. 50-56.

12. Сафин Р.Г. Экспериментальная установка для исследования пирогенетической переработки органических отходов / Р.Г. Сафин, **А.С. Родионов**, Д.Ф. Зиятдинова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 1(53). – С. 180-186.

13. Родионов А.С. Установка для производства активированного угля / А.С. Родионов // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса : Материалы XIV международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08–09 февраля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. – С. 519-523.

14. Родионов А.С. Тарельчато-лопастная сушилка сыпучих материалов / **А.С. Родионов**, Е.Д. Карасев, 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. 120-122.

15. Родионов А.С. Моделирование изменения удельной поверхности и удельного объема пор в процессе активации угля / **А.С. Родионов**, Д.И. Фазлиев, 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. 449-453.

16. Родионов, А.С. Вакуумное охлаждение активированного угля / **А.С. Родионов**, Р.Г. Сафин // Вакуумная техника и технология : Материалы Одиннадцатой Российской студенческой научно-технической конференции, Казань, 18–20 апреля 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 158.

17. Родионов А.С. Разработка технологии термической переработки растительного сырья в активированный уголь [Монография] : монография / **А.С. Родионов**, Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников ; Казанский нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : РИЦ "Школа", 2023. – 96 с.