

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, д.т.н., профессора  
Глушанковой Ирины Самуиловны на диссертационную работу  
Родионова Алексея Сергеевича на тему: «Разработка технологии термической  
переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальностям 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса,  
4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки  
древесины

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время в России ежегодно образуется более 200 млн. м<sup>3</sup> кородревесных отходов и растительных отходов сельского хозяйства. Утилизация растительных отходов лесного и агропромышленного комплексов является актуальной экологической и технологической проблемой.

Основными способами их утилизации остается складирование на короотвалах, технологических площадках захоронения или сжигание, что оказывает негативное воздействие на объекты окружающей среды.

Одним из перспективных направлений рециклинга растительных отходов является их переработка с получением активированных углей (АУ) – сорбционных материалов с развитой пористой структурой, которые находят широкое применение для решения технологических задач, защиты окружающей среды, получения катализаторов и энтеросорбентов.

В настоящее время в промышленной практике широко используются марки АУ из растительного сырья: БАУ, ОУ-А, изготавливаемые методом карбонизации и парогазовой активации щепы березы, КАУ – косточковые активные угли, получаемые из скорлупы кокоса.

В работе Родионова А.С. представлено научное обоснование процессов конверсии лигниноцеллюлозных отходов (щепы сосны, лозги подсолнечника, скорлупы грецкого ореха) с получением активированного угля, включающих этапы сушки, пиролиза и парогазовой активации, и их аппаратного оформления. Работа актуальна и имеет выраженную практическую направленность.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа Родионова Алексея Сергеевича состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертационная работа изложена на 164 страницах, включает 59 рисунков и 24 таблицы. Библиографический список включает 128 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

Работа выполнялась в рамках грантов:

- грант РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»

на тему «Научные основы технологии термической переработки растительных отходов»;

- грант РФ «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.).

Цель исследования: разработка и научное обоснование технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь с определением рациональных режимов процессов сушки, пиролиза и физической активации.

В качестве объектов исследования соискателем выбраны следующие виды растительных отходов: щепа сосны, лузга подсолнечника, скорлупа грецкого ореха.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) Определены температурные зависимости коэффициента теплопроводности лигноцеллюлозного сырья.

2) Разработана математическая модель процесса получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов.

3) Проведены теоретические и экспериментальные исследования по получению АУ из лигниноцеллюлозных отходов в лабораторных условиях.

4) Разработаны методики расчёта аппаратного оформления процесса термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в АУ.

5) Разработана технология процесса термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в АУ.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, анализируется степень ее изученности, формулируются цель и задачи исследования, раскрывается методология, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** диссертации соискателем представлен систематизированный обзор научно-технической литературы по проблеме утилизации лигниноцеллюлозной биомассы. Представлены химический состав и морфологические особенности различных видов растительных отходов. Автором проанализированы технологии и аппаратное оформление процессов получения АУ, методики оценки сорбционных свойств и пористой структуры АУ. Особое внимание уделено критическому анализу существующих аппаратных решений процессов пиролиза сырья и активации карбонизатов, что позволило автору обосновать целесообразность применения методов медленного пиролиза с кондуктивным нагревом и парогазовой активацией для переработки скорлупы грецкого ореха, лузги подсолнечника и сосновой щепы с получением АУ.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию процессов получения АУ, включающих стадии сушки исходного сырья, пиролиза и парогазовой активации карбонизата.

При математическом моделировании процессов сушки исходного сырья

представлены зависимости коэффициента температуропроводности древесины сосны от влагосодержания и получено уравнение регрессии.

При моделировании процессов термохимической деструкции отходов в процессе пиролиза учитывался механизм химических реакции термического разложения компонентов лигниноцеллюлозных отходов – гемицеллюлозы, лигнина, целлюлозы и получены кинетические уравнения изменения массы компонентов при пиролизе, а также математические зависимости тепловыделения при пиролизе отходов.

При моделировании процессов паровой активации карбонизатов установлены кинетические закономерности процессов взаимодействия угля (карбонизата) с парами воды. В разрабатываемой модели частица описывалась совокупностью цилиндрических пор с неоднородными начальными радиусами, которые изменяются в результате взаимодействия с парами воды. Определены математические зависимости изменения радиуса пор от содержания паров воды и образующегося диоксида углерода, и, соответственно, удельной поверхности и объема пор.

На основе разработанного математического аппарата сформулирован алгоритм расчета удельной поверхности пор и суммарного объема пор АУ.

**В третьей главе** автором представлены результаты лабораторных исследований по конверсии отходов (щепы сосны, лузги подсолнечника и скорлупы грецкого ореха) с получением АУ на сконструированном экспериментальном комплексе, включающем узлы сушки, пиролиза и активации. Автором подробно описаны установки конвективной сушки сырья, пиролиза и активации карбонизатов.

Проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных, который показал адекватность предложенных математических моделей и возможность их использования для определения основных технологических параметров процессов получения АУ.

Установлено, что при сушке исследуемых отходов размером менее 0,5 мм целесообразно использовать высокотемпературный режим удаления влаги с температурой сушильного агента более 250 °С. При размерах вторичного сырья более 1,5 мм температура сушильного агента может быть менее 250 °С.

Установлено, что процесс пиролиза отходов необходимо проводить при температуре 500 °С, определены зависимости продолжительности процесса пиролиза от размера частиц и толщины насыпного слоя.

Исследовано влияние температуры (800 °С, 900 °С и 1000 °С) и продолжительности процесса активации на формирование пористой структуры – удельной поверхности и суммарного объема пор, установлены кинетические зависимости изменения удельной массы карбонизата и газов активации.

В ходе экспериментов определены оптимальные технологические параметры процессов получения АУ, при которых были получены опытные образцы сорбентов и определены их основные сорбционные характеристики (активность по йоду и метиленовому голубому (МГ)) и пористой структуры (удельная поверхность и суммарный объем пор.)

Проведенный сравнительный анализ характеристик опытных образцов АУ и промышленной марки АУ – БАУ-А показал, что полученные образцы

по свойствам сопоставимы с аналогом.

**В четвертой главе** представлены инженерные решения по получению АУ из лигноцеллюлозного сырья. Представлена принципиальная схема опытно-промышленной установки, новизна которой защищена патентами Российской Федерации.

Приведены расчетные зависимости для определения геометрических размеров сушильной камеры с радиальным перемещением материала, параметров пиролизной реторты и мощности шнековых питателей, выполняющих роль газовых затворов. Выполненный технико-экономический расчет демонстрирует, что при производительности 212 тонн в год и оптовой цене 136 руб/кг проект окупается за 4,2 года, а рентабельность превышает 20 %.

В приложениях представлены методика статистической обработки результатов исследований, результаты статистической обработки кинетики процессов сушки и пиролиза сосновой щепы, зависимости удельной поверхности активированного угля и суммарного объема пор от времени активации при 900°C, расчеты экономической эффективности внедрения технологий получения АУ, патенты РФ, акт внедрения.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

Диссертационное исследование содержит совокупность новых научных результатов в области термической переработки лигноцеллюлозных отходов в активированный уголь.

Соискателем предложен способ экспериментального определения коэффициента влагопроводности лигноцеллюлозных отходов, базирующийся на решении обратной задачи массопроводности.

Построена математическая модель, описывающая совокупность взаимосвязанных теплофизических и массообменных явлений при термической конверсии растительных отходов в активированный уголь, в которой учтены кинетические закономерности деструкции основных биополимерных составляющих и эволюция внутренней пористости на стадии обработки перегретым паром.

Расчетным путем с последующей экспериментальной проверкой установлены рациональные параметры ведения технологических операций: для этапа сушки рекомендован ступенчатый температурный режим с начальным прогревом при 235 °С и последующим снижением до 150 °С, для пиролитического разложения оптимальной признана температура 500 °С при толщине насыпного слоя 0,15 – 0,3 м, для активации паром - 900 °С с удельным расходом перегретого пара 2,5 кг/кг и выдержкой 25 – 40 минут. Показано, что синтезированные образцы активированного угля из скорлупы ореха характеризуются удельной поверхностью 1370 м<sup>2</sup>/г и йодным числом 625 мг/г, из подсолнечной лузги - 1300 м<sup>2</sup>/г и сорбционной емкостью по метиленовому синему - 474 мг/г.

Предложено техническое решение по переработке лигноцеллюлозных отходов в активированный уголь, защищенное патентами Российской Федерации.

## **Степень обоснованности, достоверности и апробации результатов**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректным применением фундаментальных положений теории тепло- и массопереноса, химической кинетики и методов математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием сертифицированного измерительного оборудования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования с опытными данными (расхождение не превышает 17 %). Обоснованность выводов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на созданном лабораторном комплексе, включающем установки конвективной сушки, пиролиза и физической активации, оснащенные поверенными контрольно-измерительными приборами.

По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, из них 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 других изданиях.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

В результате проведенных исследований соискателем разработана технология термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь, базирующаяся на последовательном проведении высокотемпературной сушки, пиролиза при 500 °С и паровой активации при 900 °С. Для научного обоснования предложенной технологии создана математическая модель сквозного процесса, которая позволяет оценивать влияние режимных параметров на распределение температурных и влажностных полей в обрабатываемом материале, кинетику пиролитического разложения и формирование пористой структуры угля на завершающей стадии активации. Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты, основанные на применении современных методов математического моделирования в сочетании с прямым физическим экспериментом, обладают несомненной научной ценностью, поскольку расширяют существующие представления о механизмах тепломассопереноса при термической конверсии растительного сырья. Сформулированные соискателем практические рекомендации по оптимизации технологических режимов обеспечивают повышение экономической эффективности производства за счет заметного сокращения общей продолжительности процесса.

## **Соответствие паспорту специальности**

Основные научные положения и выводы диссертационного исследования, а также автореферата отвечают требованиям паспорта специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для

агропромышленного комплекса, а именно п. 10 «Методы, технологии и технические средства обеспечения экологической безопасности, переработки и утилизации отходов сельскохозяйственного производства, эколого-реабилитационные процессы и технологии» (пункты 3 и 4 научной новизны); паспорту специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины, а именно п. 4 «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункты 1 и 2 научной новизны).

**Автореферат полностью отражает полученные результаты.**

### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В диссертационной работе предложена методика определения коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозных отходов, основанная на решении обратной задачи дифференциального уравнения массопроводности. Хотелось бы уточнить, проводилось ли сопоставление полученных значений с данными для аналогичных материалов, имеющимися в литературных источниках?

2. Автором разработана математическая модель пиролиза лигниноцеллюлозных отходов с учетом механизма и кинетики процессов термохимической деструкции их компонентов – гемицеллюлозы, лигнина, целлюлозы. Недостаточно понятно, как определялись константы скорости реакций и их энергии активации (уравнения 2.24-2.27).

3. В разделе 2.3.3. представлено математическое описание парогазовой активации карбонизатов. Есть неточности в определении тепловых эффектов процессов взаимодействия углерода с парами воды. Все основные реакции, протекающие при паровой активации, относятся к эндотермическим, протекающим с поглощением тепла ( $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ,  $\Delta H = 130,8$  кДж/моль,  $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ ,  $\Delta H = 91,8$  кДж/моль,  $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$ ,  $\Delta H = 171,5$  кДж/моль), поэтому взаимодействие углерода с парами воды возможно только при температуре  $800^\circ C$  и выше.

Учитывал ли соискатель при моделировании степень обгара при активации карбонизатов.

В модели представлены кинетические зависимости изменения радиуса пор в зависимости от содержания паров воды, образующегося диоксида углерода (уравнения 2.49-2.50). Недостаточно понятно, как определялись константы скорости реакций, протекающих при паровой активации карбонизатов.

4. В таблице 3.3 приведен сравнительный анализ полученных образцов активированных углей с промышленными марками БАУ-А и БАУ-Ац. Желательно было бы дополнить сравнение данными по насыпной плотности и прочности на истирание, поскольку эти показатели важны для практического применения сорбентов.

5. Не полностью описана конструкция экспериментальной установки активации. На рис. 3.4 (стр. 78) представлена схема установки активации, но не указаны материалы, из которых изготовлена камера активации, и не обоснован выбор жаропрочных материалов для работы при 1000 °С.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационного исследования, а также на значимость его основных положений и выводов.

### Заключение

Диссертационная работа Родионова Алексея Сергеевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития технологий переработки лигниноцеллюлозных отходов с получением активированных углей.

Работа выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической ценностью. Представленные в ней результаты базируются на достаточном объеме теоретических и экспериментальных исследований, прошли необходимую апробацию и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации.

Диссертационная работа Родионова Алексея Сергеевича на тему «Разработка технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь» по своему содержанию, объему, научной новизне, теоретической и практической значимости соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса и 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Официальный оппонент:

доктор технических наук

(05.23.04 Водоснабжение, канализация,

строительные системы охраны водных ресурсов),

профессор, профессор кафедры «Охрана

окружающей среды» федерального

государственного автономного

образовательного учреждения высшего

образования «Пермский национальный

исследовательский политехнический

университет»

Ирина Самуиловна  
Глушанкова

« 25 » 05 2026 г.

Вход. № 05-2980  
« 01 » 06 2026 г.  
подпись



подпись

ЗАВЕРЯЮ

секретарь

ученого совета ПНИПУ

В.И. Макаревич

20 г.

Подпись д.т.н., профессора  
И. С. Глушанковой заверяю



Ученый секретарь Ученого Совета ПНИПУ  
к. ист. н., доцент

Владимир Иванович Макаревич

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ФГАОУ ВО  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет».  
Тел.: +7(342)219-80-67.  
E-mail: rector@pstu.ru.

Вход. № 05-8980  
01 » 06 2026 г.  
ПОДПИСЬ