

## ОТЗЫВ

**официального оппонента 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 рассматриваемого **диссертационного исследования** продиктована складывающейся в последние годы ситуацией в сфере обращения с вторичными ресурсами растительного происхождения. Предприятия лесного и аграрного секторов сталкиваются с необходимостью утилизации возрастающих объемов лигнино-целлюлозных остатков, складирование или захоронение которых сопряжено с отчуждением значительных площадей и потенциальным ущербом для окружающей среды. В то же время рыночная конъюнктура демонстрирует устойчивый спрос на активные угли, применяемые в качестве сорбентов, носителей катализаторов и фильтрующих материалов. В этой связи диссертационная работа А.С. Родионова, нацеленная на создание научно-методической базы и технологических основ переработки указанных отходов в конкурентоспособный углеродный адсорбент, отвечает современным вызовам и имеет несомненную практическую востребованность.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа Родионова Алексея Сергеевича на тему «Разработка технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь» оформлена в соответствии с установленными требованиями, имеет классическую структуру, включает все обязательные для кандидатской диссертации разделы.

Структурно работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал размещен на 164 страницах машинописного текста. Для наглядного представления результатов автором использовано 59 рисунков и 24 таблицы. Список цитируемой литературы насчитывает 128 наименований, среди которых 92 работы отечественных

ученых и 36 публикаций зарубежных исследователей.

Во введении обоснован выбор темы, сформулированы цель и задачи работы, охарактеризованы объект и предмет изучения, отражены научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, а также изложены положения, выносимые на публичную защиту.

Содержательная часть работы открывается главой, посвященной анализу современного состояния исследований в области переработки лигниноцеллюлозных отходов. Здесь систематизированы сведения о классификации, химическом составе и объемах их образования, рассмотрены известные технологические подходы к их утилизации, включая различные варианты термической конверсии и методы получения активированных углей.

Вторая глава содержит описание физической модели процесса и ее математическую формализацию. Автором построена система дифференциальных уравнений, описывающая сопряженные явления тепло- и массопереноса на последовательных технологических переделах: от обезвоживания сырья до высокотемпературной обработки карбонизата водяным паром. Определены начальные и граничные условия, замыкающие расчетную схему.

Третья глава посвящена экспериментальной части исследования. В ней приведены сведения о разработанном лабораторном оборудовании, описаны применявшиеся методики измерений, представлены и проанализированы полученные опытные данные. Значительное место уделено сопоставлению результатов численного моделирования с экспериментом, по итогам которого установлена приемлемая для инженерной практики степень согласования.

Заключительная четвертая глава посвящена вопросам промышленного масштабирования разработок. Здесь представлена технологическая схема установки, конструктивные особенности ее основных узлов, а также разработанные соискателем инженерные методики расчета оборудования. Глава завершается технико-экономической оценкой предлагаемого решения.

В заключении сформулированы основные выводы, вытекающие из выполненного исследования. Приложения к диссертации содержат материалы, подтверждающие достоверность и практическую реализацию полученных результатов: статистическую обработку экспериментальных данных, расчет экономических показателей, копии патентов на изобретения и акт о внедрении.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблематика термической конверсии лигниноцеллюлозного сырья и получения углеродных сорбентов из вторичных ресурсов рассматривалась в трудах многих отечественных и зарубежных ученых.

Вместе с тем, несмотря на значительный объем накопленных знаний, ряд вопросов остается проработанным не в полной мере. В частности, требуют уточнения закономерности формирования пористой структуры угля на стадии паровой активации в зависимости от природы исходного сырья и режимных параметров процесса. Недостаточно внимания уделено вопросам математического моделирования сквозного процесса, объединяющего стадии сушки, пиролиза и активации в единую технологическую цепочку.

Кроме того, в известных публикациях ограничено представлены инженерные решения, направленные на обеспечение газодинамической изоляции технологических зон и рекуперацию тепловых потоков. На восполнение указанных пробелов и направлена настоящая диссертационная работа.

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

В диссертационной работе представлены новые научные данные о процессах термического превращения лигниноцеллюлозных отходов в активный уголь. Автором разработан и апробирован нестационарный способ нахождения коэффициента влагопроводности лигниноцеллюлозных отходов, использующий анализ кинетических кривых обезвоживания. Создана математическая модель, описывающая сопряженный тепломассообмен на последовательных технологических переделах – от удаления влаги до высокотемпературной обработки карбонизата водяным паром; применительно к стадии активации в модели заложен механизм роста и смыкания пор, что позволяет рассчитывать изменение внутренней поверхности и пористости материала. Расчетно-экспериментальным путем определены оптимальные условия проведения ключевых операций: сушку рационально вести в двухтемпературном режиме (235 °С с последующим охлаждением теплоносителя до 150 °С), пиролиз осуществлять при 500 °С с толщиной загрузки 0,15 – 0,3 м, активацию – при 900 °С с удельным расходом пара 2,5 кг/кг и продолжительностью 25 – 40 минут. Экспериментально подтверждено, что сорбент на основе скорлупы грецкого ореха достигает удельной поверхности 1370 м<sup>2</sup>/г и йодного числа 625 мг/г, а

продукт из подсолнечной лузги – 1300 м<sup>2</sup>/г и показателя адсорбции по метиленовому синему 474 мг/г. Предложен способ получения активированного угля из лигниноцеллюлозных отходов, техническая новизна которого подтверждается патентами Российской Федерации.

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

Научные положения, выводы и практические рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, базируются на фундаментальных законах теплофизики, механики сплошных сред и химической кинетики. Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием сертифицированного измерительного оборудования, проведением опытов в многократной повторности и применением методов статистической обработки результатов. Адекватность разработанной математической модели подтверждена сопоставлением расчетных и опытных величин, при этом максимальное расхождение не выходит за пределы 17 %, что для описания столь сложных взаимосвязанных физико-химических превращений может быть признано вполне приемлемым.

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.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В ходе выполнения диссертационного исследования соискателем предложена технология термического передела лигниноцеллюлозных остатков в активированный уголь. Построена математическая модель указанного процесса, дающая возможность оценивать воздействие режимных факторов на распределение температурных и влажностных полей в обрабатываемом материале, динамику пиролитического распада и формирование пористой структуры углеродного продукта на этапе обработки перегретым паром. Совокупность теоретических выкладок и опытных данных, полученных с привлечением современных расчетных методов и прямого физического эксперимента, обладает несомненной научной ценностью, поскольку расширяет существующие представления о механизмах тепломассообмена при термической конверсии лигниноцеллюлозного сырья.

Сформулированные диссертантом рекомендации по оптимизации технологических режимов получения активированного угля способствуют повышению экономической эффективности производства за счет заметного сокращения длительности обработки. Указанный эффект достигается применением высокотемпературной сушки, проведением пиролиза при 500 °С и паровой активации при 900 °С. Функционирование установки обеспечивается за счет утилизации теплоты отходящих газовых потоков и рекуперации тепла, выделяющегося при охлаждении целевого продукта. Материалы исследования прошли производственную апробацию и приняты к использованию в ООО «Реализация альтернативных решений» (г. Казань), а также задействованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в рамках преподавания дисциплины «Технология и оборудование деревообработки».

### **Соответствие паспорту специальности**

Основные научные положения и практические результаты диссертации отвечают формуле и областям исследований, предусмотренным паспортом 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).

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

1. Из текста диссертационной работы не ясно, как осуществлялась подготовка исходного сырья? Какой был размер частиц? В таблице 1.3 диссертации также не указана исходная влажность образцов.

2. В диссертационной работе предложен способ интенсификации процесса сушки за счет применения высокотемпературного теплоносителя (235 °С) на начальном этапе. Из текста не вполне ясно, проводилась ли оценка вероятности термодеструкции поверхностных слоев материала при

таком температурном режиме и не наблюдалось ли в ходе опытов локального потемнения или обугливания образцов?

3. В разделе 3.2.2 при описании подготовки образцов для исследования процесса сушки указано, что торцевые поверхности герметизировались окрашиванием. Не вполне ясно, что использовалось в качестве материала для окрашивания и контролировалась ли толщина наносимого лакокрасочного слоя и могла ли она повлиять на геометрические размеры образцов?

4. В таблице 3.2 приведены данные по выходу угля и содержанию углерода для различных температур пиролиза. Хотелось бы уточнить, при каком времени выдержки пиролиза получены указанные значения?

5. В таблице 3.3 диссертации представлен сравнительный анализ полученных активированных углей с промышленными марками. Для более полной картины можно было бы дополнить сравнение данными по массовой доле влаги.

6. В диссертационной работе при описании лабораторной установки сушки указано, что зазор между держателем и перфорированным дном составлял 10 мм. Хотелось бы уточнить, изменялась ли эта величина в ходе экспериментов и могла ли она оказать влияние на равномерность обтекания образцов?

7. В тексте диссертационной работы имеются мелкие недочеты по оформлению. Например, на стр. 49, 52, 53, 83, 100, 111, 112, 113, 115 и т.д.

### **Заключение**

Высказанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают существа защищаемых положений и не снижают общей высокой оценки выполненной работы. Диссертационная работа Родионова Алексея Сергеевича представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, посвященное решению актуальной научно-технической задачи по разработке научно обоснованной технологии термической переработки лигниноцеллюлозных отходов в активированный уголь с установлением рациональных режимов процессов сушки, пиролиза и физической активации.

Полученные автором результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Их достоверность подтверждена достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с применением аттестованного оборудования и прошедших необходимую статистическую обработку. Автореферат по структуре и по изложению

полученных результатов соответствует 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 текущей 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: кандидат технических наук (05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика), старший научный сотрудник лаборатории энергетических систем и технологий Института энергетики и перспективных технологий федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»



Тимофеева Светлана Сергеевна

«20» май 2026 г.

Адрес: 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261, федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Тел.: +7(843) 231-90-00, внутр. 2000.

E-mail: presidium@knc.ru

Вход. № 05-8981  
01 » 06 2026 г.  
подпись 

