

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический
университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи

СО ВИН МЬИНТ

**ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЦИКЛИНГА
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ МЬЯНМЫ В УГЛЕРОДНЫЕ
АДСОРБЕНТЫ**

2.6.12 - Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:

д.т.н., профессор

Клушин Виталий Николаевич

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Клушин Виталий Николаевич,
профессор-консультант кафедры
промышленной экологии РХТУ имени
Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Дударев Владимир Иванович,
профессор кафедры химии и биотехнологии
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

доктор химических наук, профессор,
Самонин Вячеслав Викторович,
заведующий кафедры химической
технологии материалов и изделий
сорбционной техники Санкт-Петербургского
государственного технологического
института (технического университета)

доктор химических наук, профессор,
Ефремов Сергей Анатольевич,
академик КазНАЕН, заместитель директора
Центра физико-химических методов исследования
и анализа КазНУ имени аль-Фараби МОН
Республики Казахстан

Ведущая организация:

Инжиниринговый центр АО «Эльконский ГМК» -
предприятия Государственного дивизиона
госкорпорации «Росатом».

Защита состоится «20» ноября 2025 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета РХТУ .2.6.02 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Москва, Миусская пл., дом 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», а также на официальном сайте:

https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcement/

Автореферат диссертации разослан _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета РХТУ.2.6.02.

д.х.н., профессор



Р.А. Козловский

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Основным мотивом к выполнению исследований явились государственные нужды Мьянмы, отражённые в ряде документов:

- Национальная политика Мьянмы в области охраны окружающей среды (1994 г)
- Закон о развитии науки и техники (1994 г)
- Национальная стратегия устойчивого развития Мьянмы (НСУР) (2009 г)
- Закон об охране окружающей среды (ECL) (2012 г)
- Национальное руководство по качеству окружающей среды (выбросам) (NEQE) (2015 г)
- Национальная стратегия и генеральный план управления отходами Мьянмы (2018-2030 годы)

в научном обосновании возможности и целесообразности реализации собственных производств углеродных адсорбентов на базе отечественного возобновляемого сырья в виде крупнотоннажных растительных отходов.

Постоянно растущие во всех странах производство и потребление сопровождается, несмотря на реализуемые в разной степени меры экологического плана, увеличение масштабов антропогенного поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, вызывая ряд известных негативных последствий. Их совокупность обуславливает, по мнению ведущих специалистов в области производства и использования активных углей В.М. Мухина, Кельцева Н.В., уже в настоящее время ущерб человечеству, сопоставимый с последствиями использования средств массового уничтожения. Среди загрязняющих веществ, содержащихся в названном поступлении, наиболее опасными полагают таковые органической природы, что связывают с большей лёгкостью их проникновения в живые организмы с риском не только возникновения типичных временных расстройств последних, но и развития многих болезней и патологий вплоть до летальных исходов.

С целью минимизации названного негативного воздействия практикуют обработку вредных выбросов и сбросов различными приёмами. Среди них наиболее глубокое извлечение токсичных компонентов обеспечивает углеадсорбционная обработка, обычно являющаяся завершающей стадией очистки. На мировых рынках активные угли – основные агенты этой технологии представлены сравнительно дорогостоящими материалами. Это обстоятельство представляет весьма существенное препятствие для широкого использования этих адсорбентов особенно в таких развивающихся странах, как Мьянма, не

располагающих собственными производствами подобной продукции, побуждая интерес к возможной их организации на базе имеющихся собственных ресурсов.

Многие современные источники информации указывают на интенсивные поиски решений такой направленности, основанных на выявлении возможности и эффективности получения углеродных адсорбентов с применением крупнотоннажных мало или нецелесообразно используемых (и потому весьма доступных и дешёвых) местных сырьевых ресурсов в виде, в частности, растительных отходов агропромышленных, деревоперерабатывающих и пищевых производств. Стоимость подобных отходов, по существу, определяемая затратами на их доставку внутри страны, весьма низка.

Наряду с этим эксплуатационные свойства углеродных адсорбентов, полученных на базе ряда представителей названных отходов, и в разной степени обоснованные достаточно высокие. Эти обстоятельства являются (с учётом известного факта влияния вида и состава сырья на качество получаемых адсорбентов) серьёзными аргументами и побудительным мотивом целесообразности выполнения исследований данной ориентации применительно к наиболее крупнотоннажным отходам предприятий и производств Мьянмы в виде рисовой шелухи (РШ), скорлупы кокосовых орехов (СКО), полевых остатков выращивания хлопчатника - стеблей и корневищ растений - гуза-пай (ГП), кожуры плодов тамаринда (КПТ), древесины бирманского железного дерева (ЖД), вышедших из употребления букетов роз (БР), оболочек семян манго (ОСМ) и скорлупы косточек сливы (СКС).

Степень разработанности темы. Анализом доступных источников научно-технической информации выявлены лишь некоторые данные о получении активных углей из отходов, схожих по природе с отходами, использованными в настоящей работе. Аналогичная информация относительно этих отходов предприятий и производств Мьянмы за единичными исключениями практически отсутствует. Вместе с тем достаточно широко и подробно освещены вопросы переработки на углеродные адсорбенты широкого круга отходов лесосечных и перерабатывающих древесину производств, возделывания ряда сельскохозяйственных технических, кормовых и пищевых культур наряду с таковыми переработки и использования их урожая, что также указывает на актуальность решения имеющихся в Мьянме проблем их рационального использования.

Цель работы. научное обоснование целесообразности и эффективности использования названных крупнотоннажных растительных отходов предприятий и производств Мьянмы для получения углеродных адсорбентов, включая активные угли, путём систематического изучения поставленных образцов с установлением: их принципиальной сырьевой пригодности; рациональных условий реализации ключевых операций термической переработки названных отходов (пиролиза сырья и активации его карбонизированных

продуктов водяным паром) в рамках технологии парогазового активирования - наиболее доступной к реализации в условиях этого государства; выхода, технических, структурно-адсорбционных и прикладных поглотительных свойств целевых продуктов.

Задачи исследования:

- Аналитический обзор доступных источников информации с исследованием актуального состояния проблем термической переработки крупнотоннажных растительных отходов предприятий и производств Мьянмы с целью получения углеродных адсорбентов и их применения для решения задач защиты окружающей среды от антропогенного загрязнения.
- Оценка целесообразности применения использованных отходов для названной цели путём проведения термографических, физико-химических, термических и химических исследований.
- Определение рациональных условий пиролиза сырья и активации его целевых продуктов водяным паром, как ключевых термических процессов реализации доступной в условиях Мьянмы технологии, с оценкой выходов и структурно-адсорбционных характеристик получаемых продуктов (карбонизатов и активатов), составлением материальных балансов для обоих термических процессов, установлением состава побочных продуктов и возможных направлений их использования.
- Выявление сопоставительной эффективности использования полученных углеродных адсорбентов в решении природоохранных и смежных задач.
- Определение целесообразности переработки в активные угли отдельных видов использованного сырья иными приёмами.
- Обоснование принципиальных технологических схем производства углеродных адсорбентов согласно разработанным технологиям и их аппаратурного оформления.
- Ориентировочная технико-экономическая оценка производства в условиях Мьянмы углеродных адсорбентов с использованием исследованных растительных отходов в качестве сырьевой базы.

Объекты исследований – представительные партии отходов растительного сырья Мьянмы, пиролизованные и активированные целевые адсорбенты и побочные продукты, образцы производственных сточных вод, модели, имитирующие реальные загрязнённые экосистемы, а также ряд специализированных сред для углеадсорбционной очистки.

Предмет исследований – обоснование оптимальных режимных параметров процессов пиролиза растительных отходов и активации карбонизированных продуктов водяным паром, приводящих к достижению сбалансированного сочетания выхода и структурно-адсорбционных характеристик целевых продуктов. Исследование включает также оценку эффективности использования полученных продуктов в решении задач охраны

окружающей среды и смежных областях, а также разработку основ технологий производства активированных углей.

Методология и методы исследований. Данные выполненных исследований получены с использованием как кафедрального оборудования (специализированных экспериментальных установок, дериватографа, хроматографа, катетометра и т.п.), так и парка приборов центра коллективного пользования университета и в ряде случаев такового сторонних организаций. Экспериментальные исследования в основном базированы на использовании аналитических методик, соответствующих государственным стандартам РФ.

Научная новизна. В работе впервые:

- систематическими исследованиями сырья и продуктов его деструкции научно обоснована принципиальная возможность термической переработки большинства использованных в работе крупнотоннажных растительных отходов Мьянмы на активные угли, конкурентоспособные в решении задач охраны окружающей среды и здоровья человека, что потенциально обеспечивает существенный вклад в экономику государства и номенклатуру этих адсорбентов на мировом рынке;
- совокупностью термографических, физико-химических и химических исследований расширен круг научных знаний об использованных отходах путём выявления ансамбля свойств, свидетельствующих о принципиальной возможности и перспективности изучения рациональных условий термической переработки этих материалов на углеродные адсорбенты;
- ансамблем полученных результатов научно обоснованы принципы получения активных углей достаточно высокого качества из отходов растительного сырья Мьянмы, не находящих квалифицированного применения;
- обоснованы условия получения из рисовой шелухи товарных продуктов высокой чистоты (жидкого стекла и диоксида кремния) и активных углей повышенного качества путём активации с $ZnCl_2$ углеродной части карбонизированного продукта пиролиза этих отходов, а также возможность изменения ионообменных свойств активного угля на базе древесины железного дерева путём его пропитки тиомочевинной и пиролиза результирующего её импрегната;
- установлены кинетические закономерности интенсивного контакта мелких фракций полученных целевых продуктов с образцами многокомпонентных стоков с территории коксохимического производства АО «Москокс» и их взаимодействия с плавающими плёнками дизельного топлива, свидетельствующие о высокой эффективности использования их большинства для удаления органических примесей и принципиальной

пригодности для фиксации разливов нефтепродуктов;

- оценены кинетические и равновесные закономерности извлечения зёрнами полученных активных углей паров летучих органических растворителей (на примере н-бутанола) из потоков их смесей с воздухом (ПВС), указывающие на целесообразность использования ряда из них для предварительной обработки ПВС повышенных концентраций;

Теоретическая и практическая значимость. В работе впервые:

- выявлена важность и значимость использованных при исследованиях крупнотоннажных растительных отходов Мьянмы как сырьевых резервов для производства углеродных адсорбентов (п. 8 и 9 области исследований);
- определён характер влияния названных отходов на режимные параметры операций их пиролиза и активации водяным паром его науглероженных продуктов (п. 9 и 10 области исследований);
- обоснованы целесообразные условия реализации обоих термических переделов, обеспечивающие рациональные сочетания выхода и структурно-адсорбционных свойств получаемых углеродных адсорбентов (п. 8 и 9 области исследований);
- охарактеризованы тестированные показатели технических характеристик, пористой структуры и поглотительных свойств полученных углеродных адсорбентов, совокупность которых наряду с результатами прикладного использования указывает на их очевидную конкурентоспособность, универсальность и даже уникальность использования в решении ряда практически важных задач охраны окружающей среды и здоровья населения (п. 12 области исследований);
- сопоставлением значений интенсивности нагревания сырья и полученных из него карбонизированных материалов, как одного из значимых факторов, определяющих выход, показатели и свойства целевых продуктов операций пиролиза и активации его карбонизатов водяным паром, общих чётких количественных закономерностей не фиксировано.
- полученные адсорбенты испытаны на образцах промышленных стоков АО «Москокс», продемонстрировав высокую эффективность их очистки от органических загрязняющих веществ. Фармацевтическое предприятие (МРЕ) министерства промышленности департамента здравоохранения правительства Республики Союз Мьянма планирует использовать эти и другие результаты диссертационной работы, касающиеся, прежде всего профиля его основной деятельности, в виде интегрирования в собственные проекты путём апробации в соответствующих исследовательских процессах, о чем свидетельствует письмо-обращение в адрес РХТУ им. Д.И. Менделеева.
- для полученных на базе использованного сырья активных углей паровой активации осуществлена ориентировочная технико-экономическая оценка себестоимости их

производства, результаты которой свидетельствуют о принципиальной возможности и целесообразности реализации в условиях Мьянмы разработанных технологий, способных обеспечить своей продукцией национальные потребности (прежде всего в области очистки и обезвреживания жидкофазных сред и потоков) и расширить номенклатуру активных углей на мировых рынках;

- оригинальность и техническая новизна ряда предложенных в работе технологических решений защищена патентами РФ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- основной повод к проведению работы - идея трансформации практически не утилизируемых крупнотоннажных растительных отходов предприятий и производств Мьянмы в продукты с высокой добавленной стоимостью в виде углеродных адсорбентов различной физической формы;
- результаты физико-химических, термографических и химических исследований сырья, ориентированные на обоснование целесообразности и условий его использования с целью получения углеродных адсорбентов;
- способы, последовательность и условия термического воздействия на перерабатываемые материалы при пиролизе сырья и активации его науглероженных продуктов водяным паром;
- экспериментально обоснованные условия и закономерности реализации процессов пиролиза сырья, и активации водяным паром его карбонизированных остатков, обеспечивающие рациональное сочетание выхода и структурно-адсорбционных свойств целевых продуктов;
- технические, структурные и поглотительные свойства полученных целевых продуктов, характеризующие, в частности, отдельные из них в качестве уникальных адсорбентов;
- сравнительные оценки эффективности использования полученных адсорбентов в процессах очистки производственных стоков от органических примесей, фиксации плёночных разливов на водной поверхности дизельного топлива, извлечения паров летучих органических растворителей из их смесей с воздухом;
- итоги примерной оценки себестоимости производства полученных активных углей в условиях Мьянмы

Достоверность полученных результатов. Среднее квадратичное (среднеквадратическое) отклонение σ экспериментальных результатов текущих параллельных лабораторных определений, связанных с установлением технических показателей и структурно-адсорбционных свойств перерабатываемых материалов, а также выхода получаемых продуктов, характеризуют следующие данные: $\sigma = 0,1936-0,2063$ при определении объёмов

сорбирующих пор по парам воды, $\sigma = 0,3464-0,4817$ для паров CCl_4 , $\sigma = 0,3279-0,3960$ для паров C_6H_6 и $\sigma = 0,1-0,4359$ см³/г для показателя суммарной пористости; для величин поглощения йода и красителя метиленового голубого $\sigma = 0,6325-1,9494$ % и 2,7432-5,1502 мг/г, соответственно; при установлении значений выхода продуктов величина σ составляла 0,7583-2,5544 %; при определении прочности при истирании, влажности и зольности твёрдых материалов показатель σ находился в пределах 0,4743-1,1292, 0,3873-0,7071 и 0,2236-0,5916 %, соответственно. Существенные различия в определённых величинах сопряжены с небольшими массами навесок, использованных для определений, формой и размерами их зёрен, не исключаемым внедрением в последние продуктов коррозии металлических реакторов пиролиза и активации, потерями рабочих жидкостей вследствие адгезии к стенкам ёмкостей и тому подобными обстоятельствами. Сторонние определения выполнены с использованием сертифицированного оборудования.

Личный вклад автора. Идея ориентации исследования принадлежит лично автору, а его основные направления и способы их обеспечения обсуждены с научным консультантом. Автором лично смонтированы необходимые лабораторные установки, самостоятельно и при непосредственном участии выполнен большой объем разноплановых экспериментальных исследований, систематизированы, обсуждены и обработаны полученные результаты, ансамбль которых доведён до сведения научной общественности путём участия в конференциях различного уровня и самостоятельной подготовки научных статей, опубликованных в соавторстве в специализированных изданиях.

Апробация работы. Наиболее значимые результаты и основные положения выполненного исследования доложены и обсуждены на всероссийских и международных форумах и конференциях: III и IV Всероссийских научных конференциях «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (2018 и 2019 гг., г. Иваново); Международных конференциях молодых учёных по химии и химической технологии (2017, 2021, 2023 гг., г. Москва); Международных конференциях «Химическая технология функциональных наноматериалов» (2017 и 2022 гг., г. Москва); IX Всероссийской конференции, посвящённой 55-летию Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова (2022 г., г. Чебоксары); IV Международной научно-практической конференции «Научные исследования: теория, методика и практика», ФГБОУ ВО «ТГТУ» (г. Тамбов, 2021 г.); VI Международной научной конференции «Теория и практика процессов химической технологии» (УГНТУ, 2021 г., г. Уфа); V Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (2021 г., г. Иваново – Серебряный Плёс); Всероссийской студенческой конференции с международным участием

«Геоэкология: теория и практика» (РУДН, 2021 г., г. Москва); Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и Инновационные Решения в Химической Технологии ПИРХТ-2022» (2022 г., г. Воронеж); IV Всероссийской научно-практической конференции «Технологии переработки отходов с получением новой продукции» (2022 г., г. Киров); Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология» (2022 г., г. Новомосковск); International Russian Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon) (2022 и 2023 гг., г. Сочи); XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» Вятского государственного университета (2023 г., г. Киров); VII Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (2023 г., г. Иваново – Суздаль); II Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Современные достижения молодых учёных в биологии, медицине и ветеринарии» (г. Астрахань, 2023 г.); Международных научно-практических конференциях «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (2019 - 2023 гг., г. Севастополь).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 55 печатных работ, в том числе 1 статья в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК, 10 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus, Georeff, Chemical Abstracts и WoS, 1 монография, переизданная в Мьянме на английском языке, и 5 патентов РФ на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы и 12 приложений. Основной текст работы изложен на 372 машинописных страницах, включающих 67 таблиц и 46 рисунков. Библиографический список представлен 530 наименованиями цитированных работ российских и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В охарактеризованы актуальность выбранной темы и степень её разработанности. Сформулированы цель работы и задачи исследования. Освещены объекты исследований, их предмет, методология и методы. Представлены позиции научной новизны, теоретической и практической значимости. Отражены достоверность полученных результатов, личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту, наряду с информацией об апробации работы, выполненных по её теме публикациях, объёме и

структуре диссертации.

Раздел 1 работы – аналитический обзор доступной литературы по теме растительных отходов Мьянмы как потенциального сырья для получения углеродных адсорбентов, включающий 4 подраздела, выводы и формулировку задач исследования.

Раздел 2 диссертации содержит общие сведения об использованных в работе отходах и данные их термографических исследований. Здесь охарактеризованы (таблица 1) значимые для освещения темы технические показатели и свойства отходов и обсуждены результаты их термографии (таблица 2), на основании которых сформулированы рекомендации относительно рационального уровня термического воздействия на них при пиролизе.

Таблица 1 - Физические параметры воздушно-сухих отходов, подготовленных к пиролизу

Сырье	Размеры (мм) и форма фрагментов	d, кг/дм ³	A, %	W, %	П, %
БР	≤5, форма сохранена, значительная усадка	0,15	2,40	5,88	2,40
ГП	(7-12)х(3-5) цилиндры	0,19	5,60	1,90	86,23
ЖД	толщина 2,5-5,0, длина до 20, разные формы	0,21	1,62	5,91	98,00
КПТ	толщина ~1,0, длина до 15-20, близкие квадрату	0,14	10,40	3,02	98,50
ОСМ	5–10, сохранена форма частиц сырья	0,12	8,52	3,47	97,07
РШ	длина 7-9, ширина 2-4	0,11	48,50	6,06	44,75
СКО	(30-85)х(1,5-10), разные формы	0,54	4,71	8,00	98,00
СКС	3–5, разные формы	0,30	2,67	1,90	97,85

* величина прочности при истирании (П) определена по МИС-60-8

Таблица 2 - Сравнительные данные термогравиметрии образцов отходов в атмосферах баллонного азота и воздуха (в) при кратных 100 °С температурах (интенсивность нагревания 9 °С/мин)

Сырье		Степень деструкции при температуре, °С								
вид	навеска, мг	100	200	300	400	500	600	700	800	~900
СКО	345,5	~0	10,91	48,31	61,74	69,22	75,20	78,93	82,67	86,24
СКО в	367,3	2,7	8,2	51,7	69,5	76,3	81,7	88,6	94,0	99,5
РШ	536,4	~0	8,20	20,79	53,88	63,20	70,19	74,38	78,58	82,20
РШ в	481,2	5,2	9,4	47,8	56,1	61,3	65,5	70,7	72,8	82,1
ЖД	354,4	7,90	14,50	25,11	58,69	64,33	72,23	77,31	81,83	83,52
ЖД в	388,0	9,66	13,92	31,96	61,60	71,13	80,93	86,08	94,84	+2,45
ОСМ	458,8	4,14	7,95	34,10	68,98	77,05	85,10	87,51	91,87	98,20
ОСМ в		4,24	7,82	33,4	68,27	77,5	83,51	88,0	93,72	+1,4
СКС	574,1	4,88	5,40	36,59	48,78	70,56	74,91	76,65	78,40	80,14
СКС в	621,6	4,8	11,2	51,4	81,99	86,8	91,6	96,5	98,1	99,5
ГП	188,6	7,44	8,51	51,06	72,34	75,00	76,60	82,98	87,23	96,81
ГП в	250,5	7,45	10,00	62,00	73,11	79,4	88,8	95,2	97,6	97,8
КПТ	998,7	7,89	9,20	22,45	41,52	67,16	70,92	72,30	73,59	74,75
КПТ в	999,9	-	6,90	-	82,93	93,70	96,00	96,50	97,00	97,56
БР*	1000,0	-	7,80	-	84,35	92,00	92,30	94,07	95,00	96,00

Раздел завершён сопоставительным анализом исследованных отходов как сырья для получения углеродных адсорбентов. В нем подчёркнуто, что использование показателей проведенного термического анализа (как качественных, так и количественных) применительно к процессам пиролиза более крупных, чем лабораторные навески, масс отходов вследствие известных эффектов масштабирования в определённой степени является лимитированным их ориентировочным характером, свидетельствующим в основном лишь о тенденциях поведения испытываемых материалов при термическом воздействии на них в защитной и окислительной атмосферах.

Раздел 3 работы отражает наиболее значимое существо выполненных исследований и имеет 6 подразделов.

В первом из них (3.1) отражены и сопоставлены результаты установления рациональных условий пиролиза отходов (таблица 3), выхода, структурно-адсорбционных свойств и технических показателей его науглероженных продуктов (таблицы 4 и 5), включая оценку состава их поверхности методом рентгенофлуоресцентного анализа (рисунок 1).

Таблица 3 - Условия пиролиза отходов

Тип отхода	Область варьирования			Рациональные величины		
	i, °C/мин	t, °C	τ, мин	i, °C/мин	t, °C	τ, мин
БР	5 - 10	450 - 500	60 - 240	10	450 - 500	240
ГП	5 - 20	500 - 750	0 - 120	10	750	60
ЖД	10 - 20	525 - 700	30 - 180	15	550	60
КПТ	5 - 20	300 - 500	0 - 180	10	350	60
ОСМ	10 - 20	550 - 700	0 - 180	10	600	30
РШ	5 - 20	500 - 900	0 - 180	15	650	30
СКО	5 - 15	650 - 750	30 - 300	15	700	180
СКС	10 - 20	500 - 700	0 - 120	15	600	10

Примечание: i – интенсивность нагревания, t – предельная температура, τ – длительность изотермической выдержки

Таблица 4 - Структурно-адсорбционные характеристики и выход целевых продуктов пиролиза отходов

Показатель и его размерность	V _Σ , см ³ /г	V _{SH₂O} , см ³ /г	V _{SCC₁₄} , см ³ /г	V _{S C₆H₆} , см ³ /г	I, мг/г	МГ, мг/г	Выход, %
Значения показателей для продуктов пиролиза							
БР*	1,30	0,13	0,01	0,02	355	45,0	41,0
ГП	1,38	0,13	0,03	0,13	70	8,4	26,1
ЖД	0,72	0,14	0,04	0,16	416	1,8	29,0
КПТ	0,70	0,23	0,08	0,04	445	320	46,0
ОСМ	0,87	0,13	0,05	0,17	294	3,6	24,8
РШ	1,37	0,12	0,08	0,11	71	307,0	42,4
СКО	0,16	0,15	0,03	0,16	403	5,3	25,3
СКС	0,62	0,10	0,10	0,14	88,7	4,6	31,8

* для продукта пиролиза при 450 °C без изотермической выдержки

Таблица 5 - Физические показатели целевых продуктов пиролиза отходов

Сырье	Размеры (мм) и форма фрагментов	d, кг/дм ³	A, %	W, %	П, %
БР	≤5, форма сохранена, значительная усадка	0,15	2,40	5,88	2,40
ГП	(7-12)х(3-5) цилиндры	0,19	5,60	1,90	86,23
ЖД	толщина 2,5-5,0, длина до 20, разные формы	0,21	1,62	5,91	98,00
КПТ	толщина ~1,0, длина до 15–20, близкие квадрату	0,14	10,40	3,02	98,50
ОСМ	5-10, сохранена форма частиц сырья	0,12	8,52	3,47	97,07
РШ	длина 7-9, ширина 2-4	0,11	48,50	6,06	44,75
СКО	(30-85)х(1,5-10), разные формы	0,54	4,71	8,00	98,00
СКС	3-5, разные формы	0,30	2,67	1,90	97,85

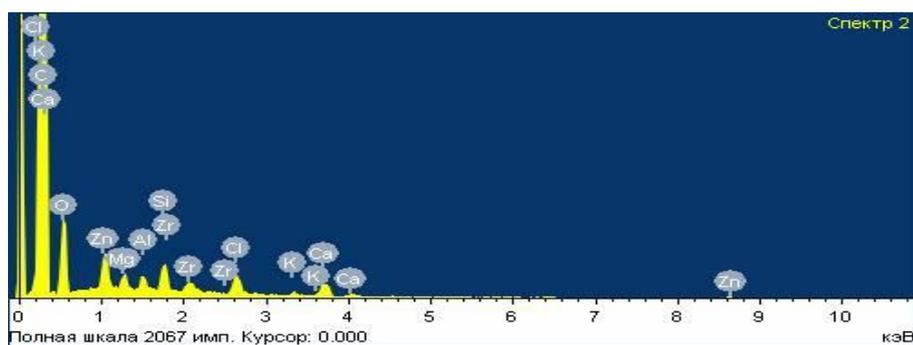


Рисунок 1- Спектр отдельной точки поверхности фрагмента карбонизированного продукта пиролиза ОСМ

В подразделе сопоставлены и обсуждены приведённые в приложении к работе изотермы низкотемпературной адсорбции азота полученными карбонизированными продуктами пиролиза отходов, результаты выполненных по которым расчетов сопоставлены в таблицах 6 и 7, и данные распределения объёмов их пор по размерам.

Таблица 6 - Некоторые результаты оценки изотерм низкотемпературной адсорбции-десорбции азота образцами полученных продуктов пиролиза отходов

Образец	Объем пор, см ³ /г			E _о , кДж/моль	W ^s , см ³ /г (по C ₆ H ₆)
	V _{ми}	V _{ме}	V _{ми+ме}		
К СКО	0,16	0,02	0,18	23,92	0,16
К РШ	0,10	0,02	0,12	19,78	0,08
К ЖД	0,16	0,15	0,31	18,04	0,15
К ОСМ	0,09	0,09	0,18	21,03	0,17
К СКС	0,14	0,11	0,25	19,43	0,18
К ГП	0,07	0,02	0,09	25,90	0,12
К КПТ	0,13	0,04	0,17	11,75	0,12
К БР	0,05	0,02	0,07	10,44	0,02

Таблица 7 - Структурные показатели образцов полученных продуктов пиролиза отходов

Продукт пиролиза	S _{уд} , м ² /г		По Д/Р		По Д/А	
	Ленгмюр	БЭТ	S _{уд.ми} , м ² /г	Ёмкость монослоя, см ³ /г	S _{уд.ми} , м ² /г	Предельный V _{ми} , см ³ /г
СКО	-	404,55	450,68	103,53	411,66	0,160
РШ	-	216,09	3,93	0,903	3,65	0,107
РШ	339,56	-	322,99	74,20	339,22	0,207
ЖД	345,80	-	338,91	77,85	264,35	0,11
ОСМ	450,16	-	428,45	987,42	454,51	0,16
СКС	-	411,50	472,40	108,52	381,83	0,16
ГП	-	433,55	463,50	196,47	463,57	0,17
ГП	-	433,55	475,68	109,27	472,93	0,177
КПТ	-	1,18	1,33	0,31	1,16	0,0006
БР	-	2,55	2,60	11,96	2,50	0,0015

По совокупности этих данных с информацией, охарактеризованной выше, сделано заключение о сравнительно низком качестве большинства целевых продуктов пиролиза использованных отходов как адсорбентов.

Сведения по материальным балансам пиролиза отходов характеризуют данные таблицы 8.

Таблица 8 - К материальным балансам операций пиролиза отходов

Продукты	Показатели выхода, % масс.							
	СКО	РШ	ЖД	ОСМ	СКС	ГП	КПТ	БР
Карбонизат	25,27	42,40	29,60	24,80	37,17	26,67	48,63	46,83
Конденсат	52,39	38,00	51,30	54,40	45,33	36,67	36,20	30,10
Неконденсирующиеся парогазы*	22,34	19,60	19,10	20,80	17,50	36,66	15,17	23,07
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100

* принято по разности

Здесь же приведены практически значимые сведения о побочных продуктах пиролиза отходов. Путём обычной перегонки установлен фракционный состава полученных конденсатов пиролиза. С применением хроматографии оценен состав его неконденсирующихся газов (рисунок 2). Обсуждены возможные направления использования этих продуктов.

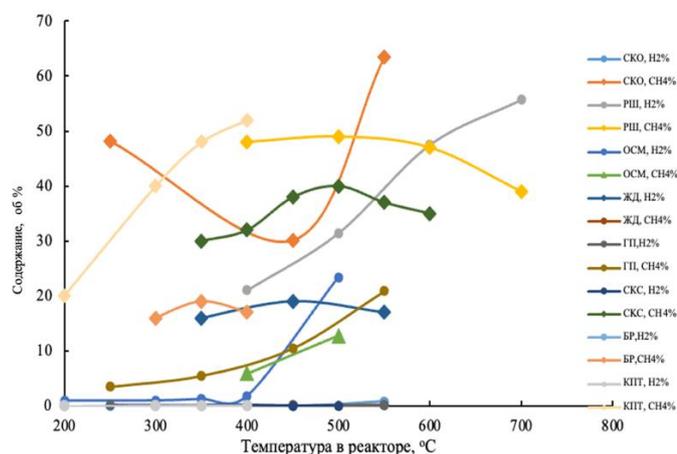


Рисунок 2 - Характер изменения доли горючих компонентов в составе неконденсируемых газов в зависимости от температуры пиролиза с интенсивностью нагрева ~ 10 °C/мин.

Подраздел 3.2 характеризует решение специфичной задачи обеззоливания карбонизированного продукта пиролиза воздушно сухой смеси измельчённых до частиц размером $<0,25$ см и <5 мм фрагментов довольно низкой механической прочности букетов роз, исчерпавших их прямое назначение, выполненного с минимальными тепловыми затратами в температурном интервале 450–500 °C.

Обработка этого материала, содержащего в процентах по массе 79,65 углерода и 2,40 золы, осуществлена разбавленными минеральными кислотами (9 %-ными растворами HF и HCl) с последующими многократными отмытками горячей (50-55 °C) водой. Качество отмытки оценено не только анализами твёрдой фазы, но и показателями pH промывной воды (pH-метр «pH-Tester PH-009 (II)») и её электропроводности κ (кондуктометр «Aqua Pro Water tester HM Digital»), типичные зависимости которых от числа операций отмытки представлены на рисунке 3.

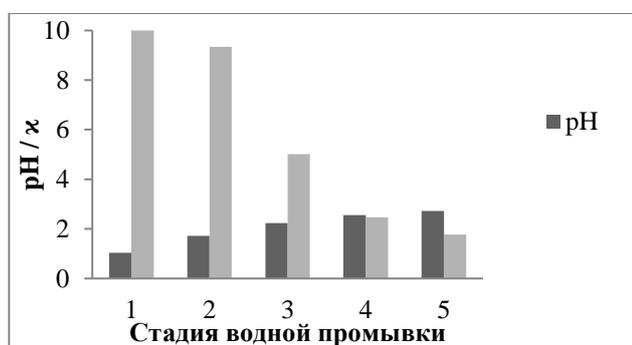


Рисунок 3 - Показатели содержания кислот и солей в промывной воде при отмывке продукта пиролиза смеси компонентов БР, обработанного HF. Итогами изучения процесса обеспечено получение весьма дисперсного продукта со средней зольностью 0,9 % и содержанием углерода 84 % масс.

Продукты, полученные пиролизом сырья при 500 °С и последовательно отмытые растворами HCl, HF и горячей водой, как углеродные адсорбенты, имеют показатели, охарактеризованные в таблице 9.

Таблица 9 - Технические характеристики полученных материалов

Продукт пиролиза	Выход, %	d, г/см ³	V _Σ , см ³ /г	V _s , см ³ /г			Поглощение	
				H ₂ O	C ₆ H ₆	CCl ₄	I, мг/г	MГ, мг/г
Карбонизированный	49,0	0,51	1,31	0,17	0,41	0,35	355	45
Отмытый	24,0	0,40	2,60	0,08	0,47	0,39	76	0

При этом отмечены два значимых обстоятельства. Во-первых, резкое сокращение массы обработанного кислотами и отмытого продукта по причине его значительных потерь из-за низкой прочности и, во-вторых, существенное сокращение полярных свойств его поверхности, на что косвенно указывает более чем двойное снижение объема сорбирующих пор по парам воды, обусловленное общей деградацией пористой структуры вследствие воздействия кислот, о чем свидетельствует и падение адсорбционной способности по тестовым веществам.

Наряду с этим охарактеризованная весьма затратная обработка удовлетворяет потребностям технологий, в которых преобладают задачи использования углеродных материалов с минимальным содержанием золы. Таким образом, выполненными исследованиями обоснованы режим карбонизации сырья и реагентной отмывки ее целевого продукта, обеспечивающий получение материала с минимальной зольностью и максимальным содержанием углерода.

Подраздел 3.3 диссертации содержит аналогичные охарактеризованным в подразделе 3.1 результаты выявления рациональных условий активации водяным паром карбонизированных остатков пиролиза отходов, выхода её продуктов, структурно-адсорбционных свойств и технических показателей активных углей.

Так, в таблице 10 отражены значения параметров, управляющих процессами активации водяным паром науглероженных продуктов пиролиза отходов.

Таблица 10 - Условия активации карбонизированных остатков пиролиза отходов водяным паром

Тип отхода	Область варьирования				Рациональные величины			
	i, °С/мин	t, °С	τ, мин	v*, г/г	i, °С/мин	t, °С	τ, мин	v, г/г
ГП	5 и 10	750 - 900	30 - 60	10 - 20	10	800	45	15
ЖД	5 - 20	800 - 850	15 - 120	3 - 30	10	850	60	5
КПТ	5 - 20	700-900	0 - 60	3, 5, 7	5	750	0	5
ОСМ	10, 15, 20	750 - 900	15 - 120	5 - 15	15	800	90	5
РШ	5 - 20	600 - 800	15 - 150	3 - 10	15	750	30	7
СКО	10, 15, 20	800, 850, 900	30, 60	3, 5, 7	15	850	60	3
СКС	5 - 20	750 - 900	0 - 60	5 - 20	15	850	60	15
БР	10	450	0	3	10	450	0	3

v* – удельный расход водяного пара, выраженный в г на 1 г полученных активных углей

В таблицах 11 и 12 сопоставлены аналогичные показатели характеризующих продуктов пиролиза сырья и активации водяным паром его карбонизированных остатков.

Таблица 11 – Значения структурно-адсорбционных показателей и выхода целевых продуктов пиролиза сырья (верхняя строка) и активации водяным паром его карбонизированных остатков (нижняя строка)

Сырье	Показатель, его размерность и значение						
	V _Σ , см ³ /г	V _{SH₂O} , см ³ /г	V _{SCCl₄} , см ³ /г	V _{S C₆H₆} , см ³ /г	I, мг/г	MГ, мг/г	Выход*, %
СКО	0,16	0,15	0,03	0,16	403	5,3	25,3
	0,91	0,36	0,14	0,31	620	280,7	60,5/15,3
РШ	0,13	0,12	0,08	0,11	710	307,0	42,4
	0,17	0,13	0,08	0,13	772	531,0	91,2/38,7
ЖД	0,72	0,14	0,64	0,16	416	1,8	29,0
	1,57	0,18	0,67	0,78	981	198,0	41,4/12,0
ОСМ	0,87	0,13	0,05	0,17	294	3,6	24,8
	1,25	0,16	0,31	0,31	1058	109,0	50,2/12,4
СКС	0,62	0,10	0,10	0,14	770	4,4	31,8
	0,74	0,20	0,26	0,26	1003	300,0	22,0/14,5
ГП	1,38	0,13	0,03	0,13	70	8,4	26,1
	1,79	0,23	0,26	0,26	343	204,0	75,0/19,6
КПТ	0,70	0,23	0,08	0,04	445	320,0	46,0
	1,10	0,28	0,24	0,26	558	340,7	46,0/21,2
БР	1,13	0,17	0,35	0,38	325	245,0	49,0
	0,58	0,19	0,09	0,12	281	196,0	45,0/18,4

* выход активного угля указан по отношению к карбонизату (числитель) и сырью (знаменатель)

Таблица 12 - Физические показатели карбонизатов пиролиза отходов (числитель) и продуктов их активации водяным паром (знаменатель)

Сырье	Размеры (мм) и форма фрагментов продуктов:		d, кг/дм ³	A, %	W, %	П, %
	пиролиза	активации				
СКО	(30-85)х(1,5-10)	3-7, разные формы	0,54/0,25	4,71	8,00	98,00/97,50
РШ	2-4 для ширины чешуек длиной 7-9	2-4 для ширины чешуек длиной 7-9	0,11/0,08	48,50/64,53	6,06/6,35	44,75/28,07
ЖД	≤20	2,5-5,0	0,21/0,17	1,62/5,05	5,91/1,44	98/60
ОСМ	5-8	3-5	0,12/0,11	8,52/8,74	3,47/2,05	97,07/66,80
СКС	3-5	3-5	0,30/0,24	2,67/3,50	1,90/1,71	98,03/90,00
ГП	7-12	7-10	0,19/0,13	2,56/6,14	11,83/2,98	86,23/53,33
КПТ	10-15	7-10	0,14/0,11	10,40/16,00	3,02/1,71	83,00/76,00
БР	<25	<16	0,51/0,22	2,4/2,6	5,88/1,33	2,40/0,45

Данные таблицы 13 отражают сведения о материальных балансах операций активации.

Таблица 13 - Материальные балансы стадий активации

Приход:	г	% масс.	Расход:	г	% масс.
Сырье:			Продукты:		
Карбонизат СКО	27,44	25,71	Адсорбент	16,46	21,45
Водяной пар	49,40	64,29	Конденсат	33,40	43,53
			Неконденсирующиеся парогaзы	26,866	35,02
Итого:	76,84	100	Итого:	76,726	100
Сырье:			Продукты:		
Карбонизат РШ	21,8	13,47	Адсорбент	20,95	12,95
Водяной пар	140,0	86,53	Конденсат	132,0	81,58
			Неконденсирующиеся газы	8,85	5,47
Итого:	161,8	100	Итого:	161,8	100
Сырье:			Продукты:		
Карбонизат древесины			Адсорбент	5,60	13,33
ЖД	14,0	28,6	Конденсат	25,96	61,81

Водяной пар	28,0	71,4	Неконденсирующиеся газы	10,44	24,86
Итого:	42,0	100	Итого:	42,0	100
Сырье: Карбонизат ОСМ	3,33	33,30	Продукты: Адсорбент	1,33	13,30
Водяной пар	6,67	66,70	Конденсат	2,35	23,50
			Неконденсирующиеся газы	6,32	63,20
Итого:		100	Итого:		100
Сырье: Карбонизат СКС	40	8,16	Продукты: Адсорбент	30	6,12
Водяной пар	450	91,84	Конденсат	425	86,73
			Неконденсирующиеся газы	35	7,15
Итого:	490	100	Итого:	490	100
Сырье: Карбонизат ГП	14,50	18,42	Продукты: Адсорбент	10,87	6,12
Водяной пар	163,05	81,58	Конденсат	90,05	50,72
			Неконденсирующиеся газы	76,63	43,16
Итого:	177,55	100	Итого:	177,55	100
Сырье: Карбонизат КПТ	10	25	Продукты: Адсорбент	4,7	11,75
Водяной пар	30	75	Конденсат	30,0	75,99
			Неконденсирующиеся газы	5,3	13,25
Итого:	40	100	Итого:	40	100
Сырье: Карбонизат БР	10	25	Продукты: Адсорбент	5,2	13,99
Водяной пар	30	75	Конденсат	20,85	52,125
			Неконденсирующиеся газы	13,95	34,875
Итого:	40	100	Итого:	40	100

Оценка пористой структуры полученных в работе активных углей с привлечением низкотемпературной адсорбции-десорбции азота выполнена аналогично охарактеризованной в подразделе 3.1 на основе первичной информации, представленной в приложении к работе. Ряд её результатов представлен в таблицах 14 и 15.

Таблица 14 - Некоторые результаты оценки изотерм низкотемпературной адсорбции-десорбции азота образцами полученных активных углей

Активный уголь	Объем пор, см ³ /г			E ₀ , кДж/моль	W ^s , см ³ /г (по C ₆ H ₆)
	V _{ми}	V _{ме}	V _{ми+ме}		
СКО	0,33	0,05	0,38	26,48	0,32
РШ	0,12	0,05	0,17	27,50	0,09
ЖД	0,28	0,38	0,66	23,18	0,78
ОСМ	0,19	0,43	0,62	25,09	0,31
СКС	0,30	0,26	0,56	25,78	0,37
ГП	0,17	0,09	0,26	28,89	0,26
АУ КПТ	0,28	0,31	0,59	14,70	0,25
БР	0,22	0,28	0,50	12,64	0,41

Таблица 15 - Структурные показатели образцов полученных активных углей паровой активации

Активат	S _{уд} , м ² /г		По Д/Р		По Д/А	
	Ленгмюр	БЭТ	S _{уд.ми} , м ² /г	Емкость монослоя, см ³ /г	S _{уд.ми} , м ² /г	Предельный V _{ми} , см ³ /г
СКО	-	689,82	933,35	214,41	916,53	0,342
СКО	-	707,67	788,37	181,10	720,11	0,279
РШ	415,74	-	380,56	87,42	310,88	0,140
РШ	-	263,36	810,10	186,09	628,08	0,260
ЖД	-	737,19	800,2	183,8	801,3	0,31
ОСМ	-	577	626	143,8	640	0,236
СКС	-	785,92	846,67	194,49	827,21	0,313
ГП	480,61	-	463,50	106,47	463,57	0,167
КПТ	636,42	-	788,69	181,18	480,45	0,199
БР	-	42,90	52,05	11,96	44,42	0,025

Оценка данных таблиц 14 и 15 и характера распределения объема пор активных углей по диаметрам и их сопоставление с таковыми для продуктов пиролиза использованных отходов свидетельствуют о существенном развитии пористой структуры при переходе от карбонизированных остатков пиролиза отходов к активным углям равной природы и позитивном изменении качественных и количественных параметров последних,

В этом же подразделе аналогично подразделу 3.1 охарактеризованы побочные продукты активации водяным паром полученных карбонизированных материалов.

Подраздел 3.4. содержит данные о выщелачивании полученных углеродных адсорбентов в дистиллированной воде.

Контакт углеродных адсорбентов с дистиллированной и водопроводной водой и, в частности, с агрессивными (кислыми и щелочными) водными системами, содержащими взвешенные и растворенные загрязняющие вещества, обуславливает необходимость оценки весьма практически важных процессов вторичного загрязнения обрабатываемых сред этими адсорбентами и особенно таковыми, полученными из различных отходов. С целью ориентировочной оценки этой способности охарактеризованы экспериментальные результаты данной ориентации. Навески воздушно сухих образцов полученных углеродных адсорбентов, взятые в заведомо больших дозах (20 г/л), приводили в контакт с дистиллированной водой (рН 8,44) путём суточного настаивания с периодическим встряхиванием, после чего фазы разделяли на фильтре Шотта и определяли величины сухих и прокалённых остатков сепарированных растворов. Условия и результаты таких определений представлены в таблице 16.

Таблица 16 - Показатели выщелачивания в воде карбонизированных остатков пиролиза использованных отходов (числитель) и продуктов их активации водяным паром (знаменатель)

Основа углеродного адсорбента	Объем воды, см ³	рН водной вытяжки	Остаток в мг на 1 г адсорбента	
			сухой	прокалённый
СКО	150/100	8,82/9,81	35/19	18/12
РШ	200/200	8,81/9,27	45/20	35/10
ЖД	100/100	8,31/8,90	69/24	19/4
ОСМ	100/200	8,63/9,55	35/16	28/10
СКС	200/200	8,11/9,45	74/50	31/22
ГП	150/150	8,82/9,80	47/6	25/4
КПТ	100/200	8,85/9,68	13/5	6/0,8
БР	150/150	8,68/9,22	42/18	12/5

Данные таблицы 16 свидетельствуют, что полученные активные угли, за исключением таковых на основе СКС и, возможно, ЖД, с учётом обычно практикуемых доз их использования (до 5 г/л) при обработке жидкофазных сред и потоков, могут загрязнять дистиллированную воду продуктами их растворения при длительностях контакта фаз в пределах до 60 мин в количествах, существенно меньших, чем оцениваемые из данных таблицы 16 и составляющие до 100 мг/г. При использовании же продуктов пиролиза изученных отходов, кроме карбонизата КПТ, такое загрязнение может существенно превышать названные количества.

В подразделе 3.5 приведены сведения об ионообменной способности активных углей паровой активации.

Оценками статической ионообменной емкости полученных в работе углеродных адсорбентов выявлено практическое отсутствие или весьма слабое (на уровне точности анализа) проявление большинством полученных адсорбентов катионообменной способности (исключение составляет активный уголь на основе КПТ с величиной $COE_K=0,2$ ммоль-экв/г), что, однако, не свойственно, в частности, подобным продуктам термической переработки многих видов РЩ, охарактеризованных в доступных источниках научно-технической информации. Величины анионообменной способности полученных активных углей паровой активации характеризует информация рисунка 4.

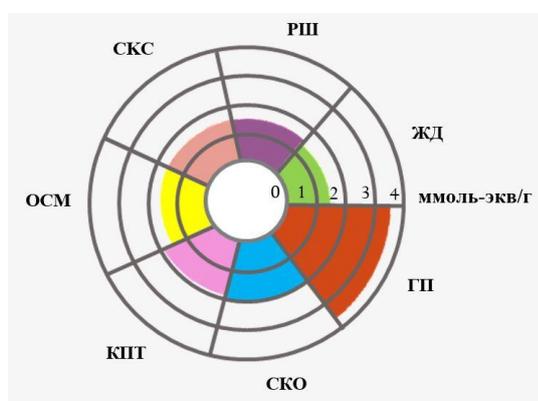


Рисунок 4 - К характеристике анионообменной способности активных углей паровой активации

В целом же полученные активные угли, как и обычные, обладают достаточно низкими ионообменными свойствами.

Подраздел 3.6, заключающий раздел 3, ориентирован на обоснование практического использования полученных активных углей в решении природоохранных задач.

В частности, в таблице 17 ряд показателей активных углей, полученных из использованных отходов, сопоставлен, как это замечено выше, с аналогичными показателями активных углей на древесной основе (в том числе коммерческих) и на древесно-полимерной базе.

Таблица 17 - Некоторые показатели активных углей на растительной основе

Марка угля	Объем пор, см ³ /г			S _{уд} *, м ² /г	А, %	П, %	Выход к сырью, %
	V _Σ	V _{микро} *	V _{мезо} *				
СКО	0,38	0,33	0,05	689,82	4,71	97,50	15,3
РШ	0,17	0,12	0,05	415,74	64,53	28,07	38,7
ЖД	1,57	0,28	0,38	737,19	5,05	60,00	12,0
ОСМ	1,25	0,19	0,43	577	8,74	66,80	12,4
СКС	0,74	0,30	0,26	785,92	3,50	90,00	7,0
ГП	1,79	0,17	0,09	480,61	6,14	53,33	19,6
КПТ	1,10	0,28	0,31	636,42	16,00	76,00	21,2
БР	0,58	0,22	0,15	42,90	2,6	0,45	18,4
БАУ-А**	1,71	0,24	0,09	400-500	6,0	60-75	-
ДПУ**	0,80	0,40	0,38	966-1047	13,0	65-70	14-17

Примечания: * - по данным низкотемпературной адсорбции азота; ** - данные заимствованы из диссертационной работы Зеньковой Е.В. (Москва, 2018) [413], ДПУ – древесно-полимерный уголь, охарактеризованный в этой работе.

В подразделе обсуждены данные таблицы 17 в плане общих рекомендаций по практическому использованию охарактеризованных активных углей.

Раздел 4 диссертации в виде пяти подразделов содержит сведения об эксплуатационных свойствах углеродных адсорбентов, полученных активацией водяным паром, иных возможностях получения из использованных отходов углеродных адсорбентов и некоторых аспектах организации производства этих продуктов.

Подраздел 4.1 характеризует эффективность использования полученных углей паровой активации для очистки от органических примесей отобранных проб одного из многокомпонентных стоков АО «Москокс» и фиксации плёнок дизельного топлива, разлитого на водной поверхности.

Рисунок 5, в частности, иллюстрирует кинетику очистки названных стоков по критерию общего органического углерода.

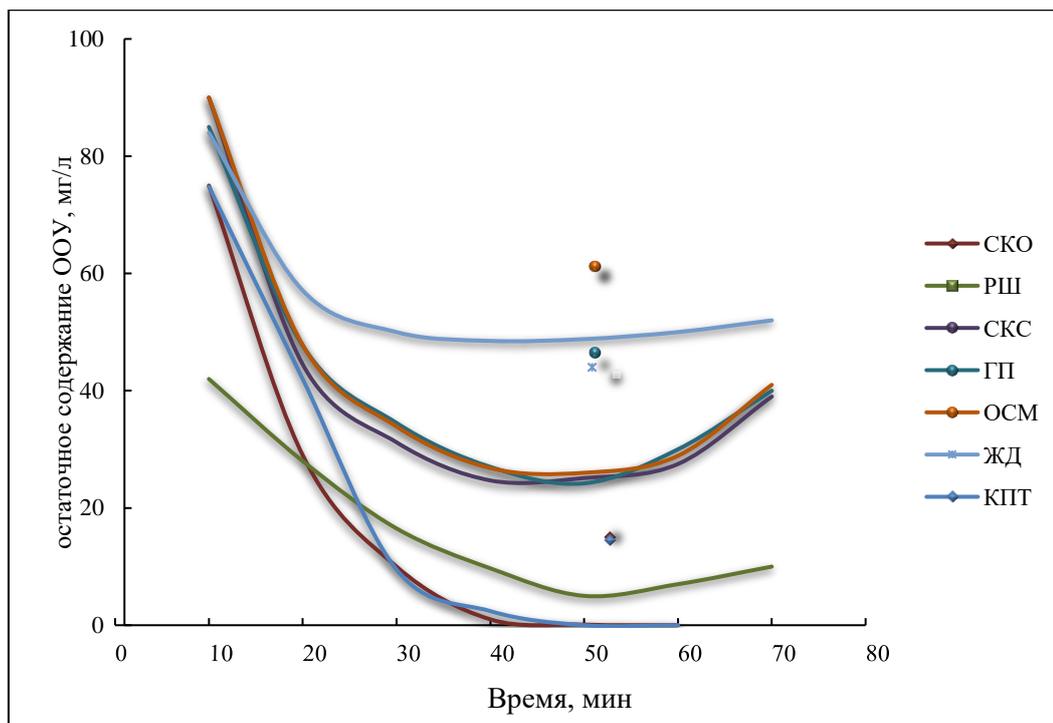


Рисунок 5 - Кинетика изменения показателя содержания ООУ в сточных водах АО «Москочес» при их контакте с полученными активными углями паровой активации дозой 0,3 г/л: СКО – фракция 0,5-1,0 мм и величина $Re_{ц}=2500$; РШ - 0,5-1,0 мм (для $C_o=50$ мг/л) и 1,0-2,0 мм (для $C_o=42$ мг/л) при $Re_{ц}=4200$; ЖД – 0,25-0,50 мм и $Re_{ц}=2620$ при дозе 0,4 г/л; ОСМ - 0,25-0,50 мм и $Re_{ц}=2250$; СКС - 0,25-0,50 мм и $Re_{ц}=9980$; ГП - 0,25-0,50 мм и $Re_{ц}=9600$; КПТ - 0,5-1,0 мм и $Re_{ц}=2600$

Данные рисунка 5 свидетельствуют, что за исключением активного угля на базе древесины ЖД, все адсорбенты (особенно при значительных дозах порядка 0,5-0,6 г/л) обеспечивают за относительно короткое время контакта фаз (в пределах 15 мин.) значение показателя остаточной величины ООУ на уровне 30 мг/л, способствующем решению задачи удаления органических загрязняющих веществ до кондиций воды водоёмов рыбохозяйственного назначения, и существенно его ниже.



Рисунок 6 - Развитие процесса фиксации плёнки ДТ толщиной 1,4 мм порошком фракции 1-2 мм активного угля паровой активации на базе ЖД дозой $2,8 \cdot 10^{-2}$ г/см²: длительность контакта фаз (мин): 0 (а), 1 (б) и 30 (в)

Рисунок 6 иллюстрирует произвольную трансформацию во времени картины поведения подкрашенной плёнки дизельного топлива при её взаимодействии с мелкими частицами одного из полученных активных углей.

Сопоставительную эффективность использования с данной целью полученных углеродных адсорбентов иллюстрируют данные рисунка 7.

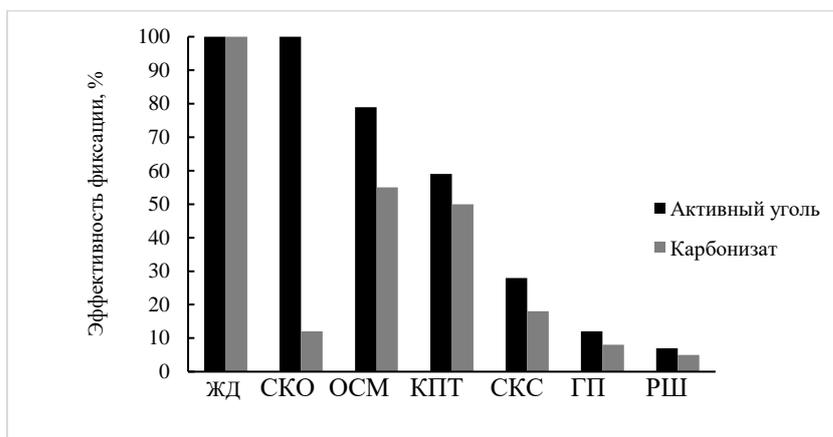


Рисунок 7 - Показатели эффективности связывания близких по толщине плёнок ДТ полученными углеродными адсорбентами

Сформировавшиеся агрегаты «фиксатор-ДТ» во всех изученных условиях контакта фаз остаются на плаву в течение не менее 3-х месяцев, вследствие чего их сбор с водной поверхности не представляет сложной задачи. При регенерации насыщенного поглотителя обработкой CCl_4 , завершаемой отгонкой растворителя при ~ 80 °С до постоянной массы, и последующем цикличном использовании имеет место определённое падение фиксирующей способности в течение 2-5 первых циклов с дальнейшим её установлением на достигнутом уровне, иллюстрируемое гистограммой рисунка 8.

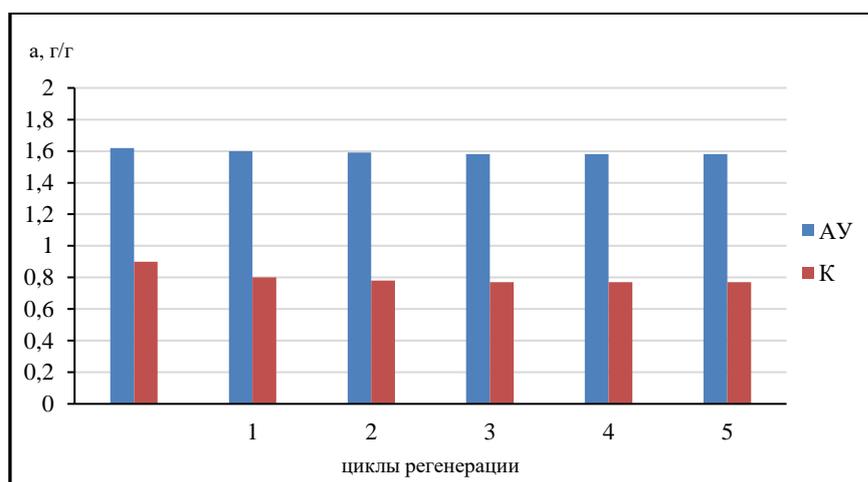


Рисунок 8 - Эффективность циклического использования зёрен фракции 1-2 мм карбонизата и активного угля на базе древесины железного дерева при фиксации дозами $4,2$ и $2,8 \cdot 10^{-2}$ г/см², соответственно, плёнки дизельного топлива толщиной 1,3 мм

В подразделе 4.2 освещены результаты оценки способности полученных активных углей при улавливании паров летучих органических растворителей (ЛОР) из их смесей с воздухом на примере н-бутанола. Здесь охарактеризованы аспекты кинетики и равновесия этих процессов. Констатировано, что, несмотря на вполне удовлетворительную кинетику, иллюстрируемую рисунком 9, и изученную способность насыщенных поглотителей к сравнительно простой регенерации и циклическому использованию (рисунок 10), совокупность полученных данных указывает на низкую эффективность этих адсорбентов в решении наиболее распространённых задач глубокого (санитарного) улавливания паров ЛОР и принципиальную возможность их использования лишь для предварительного извлечения этих соединений из их достаточно концентрированных смесей в процессах рекуперационной газоочистки.

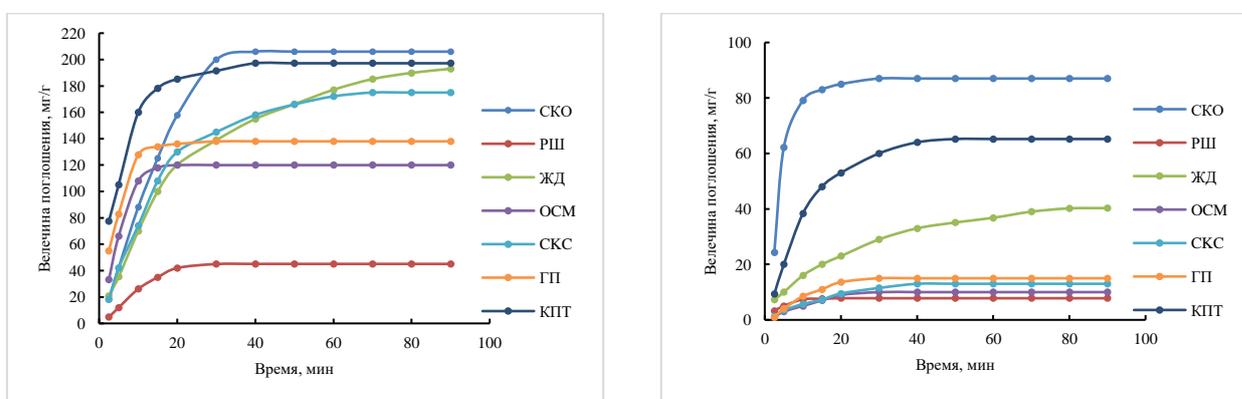


Рисунок 9 - Кинетика адсорбции углями паровой активации при 20-22 °С паров н-бутанола из его смесей с воздухом при $p/p_s = 1$ (а) и $p/p_s = 0,1$ (б)

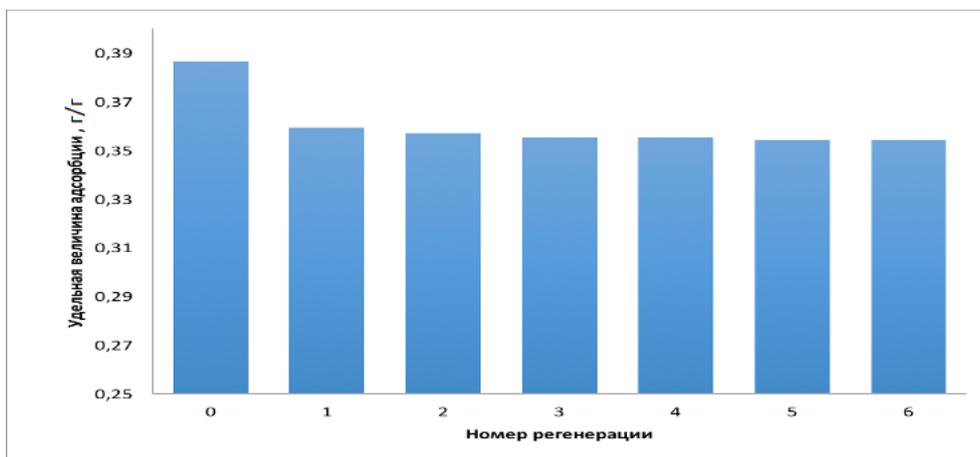


Рисунок 10 - Зависимость удельной величины адсорбции паров н-бутанола (эксикаторный метод при 22 °С) активным углем на базе СКС от числа операций регенерации водяным паром в течение 1 ч при ~150 °С

Подраздел 4.3 содержит сведения об уникальных свойствах некоторых активных углей паровой активации, полученных из использованных отходов, в решении ряда задач защиты окружающей среды и охраны здоровья человека.

Так, при выборе активных углей для обработки многокомпонентных сточных вод во многих случаях ориентируются на величины поглощения ими I и красителя МГ. При исследованиях термической переработки РШ выявлены охарактеризованные в тексте работы условия, обеспечивающие получение на её основе продуктов с показателями поглощения I и МГ, достигающими 230 и 900 мг/г, соответственно. Разработанная технология защищена патентом РФ № 2609802.

В обеспечении задачи минимизации ущерба здоровью курящих, наносимого табачным дымом, весьма результативным оказалось изложенное в работе решение, разработанное при содействии и участии лаборатории активных углей, эластичных сорбентов и катализаторов АО «ЭНПО «Неорганика», в котором обоснована высокая эффективность использования активных углей, полученных из отходов древесины ЖД, для улавливания из табачного дыма паров одного из его наиболее опасных компонентов – метанола. При рассмотрении этого решения в ФИПС РФ получен патент № 2675569.

Высокоэффективное осветление растворов желатина, используемых, в частности, в микробиологии (создание питательных сред для культивирования микроорганизмов), фармакологии и для медицинских инъекций, обеспечивают, как это детально освещено в тексте диссертации, активные угли в виде частиц размером менее 100 мкм, полученные на основе ОСМ. Это их свойство защищено патентом РФ на изобретение № 2675576.

Глубокую очистку воды от фенола – одной из важнейших проблем водоподготовки позволяет использование активных углей на базе СКС, подготовленных в цикле исследований данной направленности, подробно изложенных в работе. Итоги исследований этого цикла защищены патентом РФ № 2715538.

Весьма эффективное обезвреживание (ремедиацию) почв сельскохозяйственных угодий, загрязнённых остатками гербицида атразина (майазина), являющегося одним из основных гербицидов, применяемых при возделывании риса – наиболее важной пищевой культуры Мьянмы, обеспечивают активные угли, полученные на базе отходов возделывания хлопчатника в виде гуза-паи. Результаты изложенных в работе исследований данной ориентации с использованием рапса в качестве тест-культуры, выполненных при содействии АО «ЭНПО «Неорганика» и НИИ фитопатологии, признаны ФИПС РФ изобретением и защищены патентом № 2714083.

Новый эффективный носитель для перорального дозирования бифидобактерий экспериментально обоснован охарактеризованными в работе исследованиями, выполненными в содружестве с ЭНПО «Неорганика».

Бифидобактерии принадлежат к одному из основных родов бактерий, составляющих микробиоту желудочно-кишечного тракта млекопитающих. Микробиом человека (совокупность всех видов микроорганизмов, населяющих человека) медики подразделяют на «здоровый» и «дисбиотический». При дисбиозе снижается разнообразие микроорганизмов и нарушается соотношение полезных и вредных микробов, что негативно отражается на здоровье человека. Необходимую коррекцию осуществляют путём, в частности, перорального дозирования бифидобактерий на нейтральных носителях.

Названными исследованиями установлено, что порошковые активные угли парогазовой активации с массовым количеством фракции 50-80 мкм не менее 80 %, полученные из скорлупы кокосовых орехов Мьянмы (наряду с таковыми на базе косточек персика и абрикоса) имеют минимальное содержание остаточных канцерогенных веществ, что благоприятно сказывается на их совместимости с бифидобактериями, адсорбционная способность по которым для угля на основе СКО составляет $1,0 \times 10^5$ колониеобразующих единиц (КОЕ) на 1 мг. Наряду с этим содержание золы в таких активных углях (3-5 %) в разы ниже такового использованного в качестве прототипа угля БАУ (10 %), как и концентрация пиридина (до 2,5 мкг/кг) против таковой названного древесного угля (12 мкг/кг). Эти обстоятельства обусловили целесообразность обращения в ФИПС РФ с заявкой на предполагаемое изобретение, по итогам рассмотрения которой получен патент № 2786071.

В подразделе 4.4 изложены оценки некоторых иных возможностей получения активных углей из использованных отходов.

В частности, применительно к рисовой шелухе, доставленной из Мьянмы, оценена эффективность ее переработки охарактеризованными в литературе приёмами с получением наряду с активными углями важных товарных продуктов.

С названной целью образец воздушно сухой РШ подвергнут пиролизу при интенсивности нагревания 10 °С/мин до 600 °С без последующей изотермической выдержки. Ряд показателей полученного целевого продукта охарактеризован в таблице 18.

Таблица 18 - Адсорбционно-технические свойства продукта пиролиза рисовой шелухи

Объект	Показатель						
	Выход, %	V_{Σ} , см ³ /г	Величина V_s , (см ³ /г) по парам			Поглощение, мг/г	
			H ₂ O	CCl ₄	C ₆ H ₆	I	MГ
Карбонизат РШ	~50	1,00	0,08	0,02	0,09	68	160

Порошок полученного карбонизата массой 10 г с целью удаления из него соединений кремния обработан при 80–90 °С и непрерывном перемешивании ($Re_m = 4250$) в течение 3-х ч для обеспечения максимального модуля получаемого жидкого стекла раствором 100 см³ NaOH концентрацией 3,67 г/см³. Результирующая этот процесс суспензия освобождена от дисперсных углеродных частиц фильтрованием на стеклянном фильтре. В сепарированный раствор добавлен 0,1 н раствор H₂SO₄ дозой 0,1 мл на 100 мл для обеспечения лучшего формирования осадка диоксида кремния, после чего раствор был выпарен, а результирующий остаток высушен при 100 °С до постоянной массы. В результате с массовым выходом по кремнию 18 % получен белый аморфный порошок SiO₂ чистотой 98 %, характеризуемый гравиметрической плотностью 1,2 г/см³.

Оставшийся на фильтре науглероженный продукт отмывали на нем от остатков силикатного раствора, после чего сушили до постоянной массы и в виде отдельных порций пропитывали раствором хлорида цинка, обеспечивая различные его массовые отношения к высушенному остатку. Импрегнированные частицы освобождали от избытка раствора, сушили до постоянной массы и подвергали пиролизу с указанной выше интенсивностью до 650 °С. Ряд показателей полученных в этих условиях активных углей характеризуют данные таблицы 19.

Таблица 19 - Некоторые показатели полученных активных углей

Отношение $ZnCl_2 : C$	Выход, %	V_{Σ} , cm^3/g	Величина V_s , (cm^3/g) по парам			Поглощение, мг/г	
			H_2O	CCl_4	C_6H_6	I	МГ
0,75:1	25	1,00	0,06	0,21	0,25	635	351
1:1	25	1,02	0,07	0,22	0,28	635	340
2:1	21	1,00	0,09	0,20	0,28	401	90
3:1	21	1,02	0,05	0,14	0,28	250	15

Представленные в таблице 19 результаты указывают на целесообразность использования отношения $ZnCl_2 : C = 1:1$. Выполненными исследованиями констатирована малая целесообразность использования изотермической обработки данной сырьевой композиции при 650 °С.

Таким образом, активный уголь изученной химической активации на основе РШ по сравнению с углеродкремнезёмным адсорбентом паровой активации имеет существенно более высокие показатели V_{Σ} и V_s по парам CCl_4 и C_6H_6 , но несколько меньшие величины поглощения I и МГ, а основное преимущество данного приёма химической активации состоит в более рациональном использовании РШ, обеспечивающем возможность получения названной дополнительной товарной продукции.

В диссертационной работе установлено, что модифицирование активного угля паровой активации на базе древесины железного дерева дешёвой тиомочевинной и последующий пиролиз импрегната обеспечивают изменение ионообменных свойств целевого продукта и практическую сохранность его охарактеризованных показателей на уровне таковых исходного материала. Кроме этого, оно существенно сказывается на прикладных свойствах модифицированного активного угля (МАУ). Так, в частности, рисунок 11 демонстрирует результаты контакта твёрдой и жидкой фаз в идентичных условиях для активного угля паровой активации, для продукта его модифицирования и для коммерческого активного угля российского производства марки БАУ, свидетельствующие о несомненном преимуществе использования модифицированного угля.

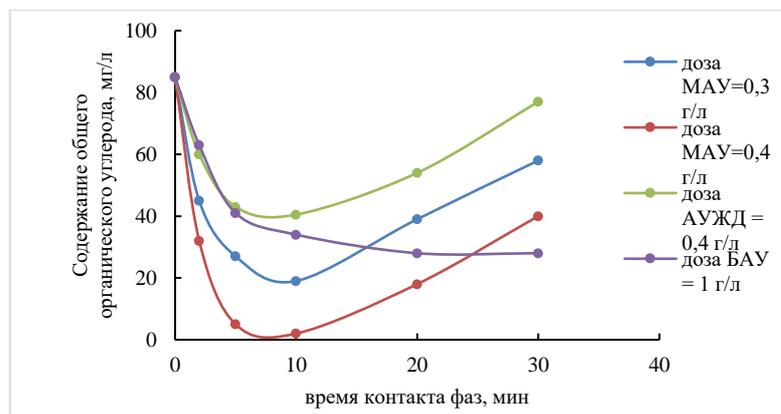


Рисунок 11 - Кинетика очистки при 20 °С стока АО «Москок» зёрнами фракции 1-2 мм немодифицированного и модифицированного тиомочевинной активными углями на основе древесины ЖД и активного угля БАУ ($Re_{ц}=2560$)

Названное модифицирование открывает также возможность использования характеризуемого угля для извлечения из сточных вод ионов тяжёлых металлов, результативность которого, однако, сравнительно низка.

Активный уголь паровой активации на базе ОСМ имеет сравнительно низкую величину анионообменной статической емкости ($COE_a = 1,58$ мг-экв/г) при отсутствии способности к катионному обмену. Наряду с этим опубликованные данные свидетельствуют о целесообразности химической активации ОСМ с целью удаления из различных стоков загрязняющей их органики и особенно ионов тяжёлых металлов. С их учётом в работе в сопоставимых условиях одного из режимов паровой активации продукта пиролиза ОСМ выполнена серия экспериментов с использованием ряда агентов, широко практикуемых в химической активации. Ее результаты отражают данные таблицы 20.

Таблица 20 - Выход и структурно-адсорбционные показатели активных углей химической активации, полученных при интенсивности нагревания 15 °С/мин до 800 °С без изотермической выдержки при массовом отношении сырьё : активатор = 1:2

Активатор	V_{sH_2O} , см ³ /г	V_{sCCl_4} , см ³ /г	$V_{sC_6H_6}$, см ³ /г	МГ, мг/г	I, %	V_{Σ} , см ³ /г	Выход, %
ZnCl ₂	0,11	0,12	0,19	21,53	57,95	0,99	35,0
KOH	0,09	0,05	0,13	22,08	53,02	1,77	16,0
Na ₂ CO ₃	0,13	0,02	0,04	9,40	21,17	1,67	23,5

Данные таблицы 20 указывают на рациональность химической активация данного сырья с хлоридом цинка. При обосновании её рациональных условий констатировано, что

таковые соответствуют сырьевой композиции с массовым отношением активатора к сырью 3:1, интенсивности её нагревания 15 °С/мин до 800 °С и длительности изотермической выдержки 30 мин. Показателями активного угля хлорцинковой активации, полученного в данных условиях пиролиза, являются (в скобках указаны значения для угля паровой активации): выход 33,4 (12,4) %; величины V_{Σ} , V_s по парам H_2O , CCl_4 и C_6H_6 составляют 1,01 (1,25), 0,32 (0,16), 0,34 (0,31) и 0,35 (0,31) cm^3/g , соответственно; значения поглощения I и $MГ$ – 974 mg/g и 145 (109) mg/g ; влажность 0,2 (2,05) %, зольность 8,5 (8,7) %, преобладающая фракция 5-10 (3-5) мм, насыпная масса 0,22 (0,11) g/cm^3 , прочность при истирании 96,9 (66,8) %. Таким образом, сопоставленные показатели определённо указывают на несомненные преимущества угля химической активации, как адсорбента. В пользу этого заключения свидетельствуют также данные о низкотемпературной адсорбции азота сопоставленными активными углями, о трансформации их ионообменных свойств, значительном росте поглотительной способности по парам *n*-бутанола и эффективности извлечения ИТМ из их растворов.

Значительный ряд публикаций свидетельствует об эффективности переработки косточкового сырья в активные угли методами химической активации. Целесообразность использования данного приёма применительно к отходам в виде СКС оценена в работе с привлечением ряда наиболее употребляемых средств химической активации при их массовом отношении к сырью 1:1 в охарактеризованных выше (таблица 3) рациональных условиях её пиролиза. Полученные результаты отражают данные таблицы 21.

Таблица 21 - Показатели активных углей химической активации на базе СКС (интенсивность нагревания 15 °С/мин до 600 °С, длительность изотермической выдержки 10 мин)

Агент активации	Выход, %	V_{Σ} , cm^3/g	Поглощение, mg/g		V_s , cm^3/g , по парам:		
			$MГ$	I	H_2O	CCl_4	C_6H_6
$ZnCl_2$	40,0	0,62	8,09	10,16	0,098	0,020	0,091
$NaOH$	40,0	1,03	10,78	33,02	0,093	0,045	0,119
H_3PO_4	35,5	0,50	30,54	22,86	0,083	0,019	0,107
H_2SO_4	35,0	1,20	12,60	17,78	0,066	0,048	0,119
K_2CO_3	36	1,57	14,37	16,51	0,078	0,044	0,064
Na_2CO_3	32,2	0,68	26,94	67,31	0,110	0,012	0,115
$Na_2CO_3^*$	27,5	1,20	25,15	35,56	0,094	0,054	0,140
$Na_2CO_3^{**}$	27,3	0,99	26,95	36,83	0,103	0,006	0,178

Длительность изотермической выдержки 60* и 120** мин

Данные таблицы 21 указывают на целесообразность использования среди исследованных агентов Na_2CO_3 . Полученный из такой композиции активный уголь имеет 0,23 % влаги и 5,5 % золы, его насыпная плотность 0,25 кг/дм³, а прочность при истирании 96 %. Вместе с этим лишь показатели его выхода и прочности при истирании превышают таковые активного угля паровой активации (таблицы 11 и 12). Эти обстоятельства ставят под сомнение целесообразность химической активации СКС с использованием Na_2CO_3 , по крайней мере, в охарактеризованных выше условиях. Наряду с этим данная активация приводит к появлению у её целевого продукта некоторой катионообменной способности, обуславливающей извлечение им ИТМ (Zn^{2+} , Fe^{3+} и Cu^{2+}) в близких условиях контакта фаз с аналогичной быстрой кинетикой, но несколько меньшей глубиной извлечения, чем для охарактеризованного выше МАУ на основе древесины ЖД.

Завершающий раздел 4 подраздел 4.5 характеризует некоторые аспекты организации производства активных углей на базе растительных отходов Мьянмы. В качестве иллюстрационных примеров здесь приведены две принципиальные аппаратурно-технологические схемы переработки использованных в работе отходов на активные угли. Подчёркнуто, что потребности Республики Союз Мьянма в активных углях собственного производства в настоящее время чётко не определены в связи с отсутствием соответствующих маркетинговых исследований, функционированием ещё далёкой от совершенства системы законодательства в сфере защиты окружающей среды от антропогенного загрязнения и рядом иных обстоятельств. По этим причинам целесообразна реализация производства названных адсорбентов, прежде всего, по сравнительно простой и поэтому относительно легко доступной к реализации в условиях Республики Союз Мьянма технологии парогазовой активации. Другими значимыми аргументами являются дешевизна рассмотренного сырья (определяемая в ряде районов его низкими затратами на логистику и малой местной востребованностью), простота изготовления технологического оборудования в виде средств перемещения и хранения соответствующих материалов и достаточно широкая доступность приобретения более сложных технологических агрегатов и устройств.

Некоторые технико-экономические показатели производства активных углей на базе сырья в виде использованных в работе отходов, являющиеся итогами собственных расчётов с использованием данных, заимствованных из ряда публикаций, представлены в таблице 22.

Таблица 22 - Некоторые технико-экономические показатели производства активных углей паровой активации

№	Сырье	Выпуск продукта, т/год	Себестоимость производства 1 т	Оптовая цена за 1 т	Возможная годовая прибыль	Год оценки
1	ГП	30	1899 US \$	2900US \$	30030 US \$	2025
2	СКС	30	3270 US \$	4300 US \$	30900 US \$	2025
3	ОСМ	30	2634 US \$	3600US \$	28710 US \$	2025
4	ЖД	30	1229 US \$	2220US \$	29730 US \$	2025
5	РШ	30	1974 US \$	2900 US \$	27780 US \$	2025
6	СКО	30	2464 US \$.	3500 US \$.	31080 US \$	2025
7	КПТ	30	4839 US \$	5750 US \$	27330 US \$	2025

Для активного угля, полученного из БР, оценка не осуществлена в связи с его порошковым состоянием, относительно слабой поглотительной способностью и крайне низким показателем прочности при истирании.

Вполне очевидно, что себестоимость получения активных углей может быть существенно снижена при непрерывной эксплуатации производства с обеспечением его более высокой прибыли, способствуя увеличению объёмов утилизации отходов и решению задач защиты окружающей среды.

В настоящее время в России оптовые цены на активные угли на древесной основе, согласно размещённой в сети интернет информации составляют у различных поставщиков от 80 руб. за 1 кг (в розницу от 130 до 300 руб. за 1 кг) для углей марки БАУ-А, а для активных углей на кокосовой основе - от 175-195 руб. за 1 кг оптом до 300 руб. за 1 кг в розницу, причём оптовая цена весьма высококачественных активных углей Каусорб-212, -221, -223, -224 на кокосовой основе составляет около 3700 US \$/т. В связи с этим, принимая отпускную цену получаемых в охарактеризованных условиях активных углей на вполне допустимом оптовом уровне, масштабы даже сравнительно скромного (по существу, опытно-промышленного) производства обеспечивают, по оценке автора, его определённую экономическую эффективность.

Таким образом, охарактеризованные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности внедрения разработанных технологий в условиях Мьянмы. Однако соотношение цена/качество и ряд конкретных обстоятельств в хозяйственной деятельности страны представляются определяющими в решении вопроса о целесообразности реализации конкретных из охарактеризованных технологий.

Выводы

1. Методами физико-химических, физических и химических исследований представительных образцов крупнотоннажных растительных отходов сельскохозяйственного и пищевых производств Мьянмы установлены элементный состав и показатели ряда технических свойств этих материалов, характеризующие их в качестве сырья для производства углеродных адсорбентов, чем внесён вклад в область научных знаний об этих материалах, как потенциальных ресурсах для данного производства.
2. Термографическим изучением отходов и науглероженных продуктов их пиролиза, выполненным в защитной и окислительной средах, установлены рациональные области исследований термического воздействия на эти материалы в атмосфере продуктов собственного разложения.
3. Систематическими исследованиями выявлены особенности и обобщены закономерности влияния сырьевых факторов и параметров, управляющих процессами пиролиза названных отходов и активации водяным паром его карбонизированных продуктов, на выход, технические свойства и структурно-адсорбционные показатели получаемых углеродных адсорбентов.
4. Путём сопоставительных оценок выходов, структурно-адсорбционных и технических свойств полученных углеродных адсорбентов обоснованы целесообразные условия их производства, обеспечивающие рациональное сочетание выхода и структурно-адсорбционных характеристик целевых продуктов, чем установлены технологические основы ключевых термических переделов разрабатываемых технологий.
5. Установлены показатели целевых продуктов обоих термических переделов, реализованных в целесообразных условиях, характеризующие их большинство как адсорбенты достаточно высокого качества.
6. Охарактеризован ряд технологически важных показателей конденсатов и неконденсирующихся газов, как побочных продуктов операций пиролиза и активации, относительно которых обсуждены возможные направления их использования.
7. Прослежены зависимости технических (выхода, зольности, прочности при истирании) и структурно-адсорбционных характеристик (объёмов суммарного, микро- и мезопор, удельной поверхности, поглощения йода и красителя метиленового голубого) полученных активных углей от типа растительных отходов, использованных в качестве сырья. Констатированы их хорошее соответствие известным фактам трансформации растительного сырья при пиролизе и активации его науглероженных остатков водяным паром наряду с индивидуальностью для каждого вида сырья, исключающей обоснование иных, кроме названных фактов, общих чётких закономерностей.

8. Оценена эффективность полученных углеродных адсорбентов при их использовании для очистки производственных сбросов от растворенных загрязнений органической природы, фиксации плёночных разливов на зеркале воды дизельного топлива, извлечения из воздушных выбросов паров летучих органических растворителей и решения смежных задач, результаты которого свидетельствуют об их конкурентоспособности в сравнении с коммерческими активными углями российского производства на древесной основе.
9. Обоснована целесообразность более рационального использования рисовой шелухи путём обработки продукта её пиролиза раствором NaOH с последующей активацией с ZnCl₂ освобождённого от соединений кремния, отмытого и высушенного углеродного остатка, обеспечивающей возможность получения наряду с активным углем дополнительной товарной продукции в виде жидкого стекла или диоксида кремния чистотой 98 %..
10. Показано, что модифицирование активного угля на основе древесины железного дерева раствором тиомочевины и последующий пиролиз импрегната обеспечивают изменение ионообменных свойств целевого продукта, придавая ему определённую катионообменную способность и практически сохраняя его структурно-адсорбционные свойства на уровне таковых исходного материала. Наряду с этим, модифицированные адсорбенты демонстрируют существенные преимущества при очистке от органических примесей многокомпонентных производственных стоков в сравнении с активным углём российского производства марки БАУ.
11. Выявлена рациональность химической активация оболочек семян манго с хлоридом цинка, обеспечивающей трансформацию пористой структуры и ионообменных свойств получаемых углей, значительный рост их поглотительной способности по парам н-бутанола и эффективности извлечения ИТМ из их растворов.
12. Новизна технических решений, связанных с получением из ряда использованных отходов активных углей, обладающих уникальными свойствами, защищена патентами РФ.
13. Выполнена ориентировочная технико-экономическая оценка реализации в условиях Мьянмы производства активных углей путём пиролиза изученных отходов и активации его науглероженных остатков водяным паром, результаты которой свидетельствуют о возможности получения качественной продукции пониженной себестоимости.
14. Совокупностью выполненных исследований внесён потенциально значимый вклад в технологию производства активных углей на основе растительных отходов и их номенклатуру.

Список основных работ, опубликованных автором

1. Сое Н.Л. Углеродные адсорбенты на базе растительных отходов Мьянмы как средства очистки производственных выбросов и сбросов / Н.Л. Сое, З. Мое, М. Тху, М.М. Тху, **С.В. Мьинт**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 19, № 5. – С. 574-581. (**Scopus**)
2. Saw W. M. Inexpensive resources of Myanmar as a source of carbon adsorbents / **W.M. Saw**, Z.Y. Naing, M. Thu, M.M. Thu, V.N. Klushin // International Journal of Modern Agriculture. – 2020. – Vol. 9, No. 3 – P. 342 – 350. (**Web of Science**)
3. Найнг Л. С., Зин Мое, Со Вин Мьинт, Нистратов А.В., Клушин Н.В. Технологические аспекты и показатели переработки отходов древесины железного дерева и оболочек семян манго на углеродные адсорбенты / Л.С. Найнг, М.Р. Зин, **В.М. Со** [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2018. – № 4. – С. 28-34. (**Chemical Abstracts**)
4. Со В.М. Особенности активных углей, полученных химическим модифицированием из отходов растительного сырья Республики Союз Мьянма / **В.М. Со**, Т. Мин, Л.С. Найнг [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2020. – № 1. – С. 32-35. (**Chemical Abstracts**)
5. Зо Е.Н. Предпосылки и технологические основы получения активных углей из доступного сырья Мьянмы / Е.Н. Зо, **В.М. Со**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Химическая промышленность сегодня. – 2021. – № 6. – С. 32-35. (**Chemical Abstracts**)
6. Зо Е.Н. Исследование переработки ископаемых углей месторождений «Калейва» и «Тиджит» как сырья для производства активных углей парогазовой активацией / Е.Н. Зо, **В.М. Со**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Chemical Bulletin. – 2024. – Т. 7, № 3. – С. 93-101. (**Chemical Abstracts**)
7. Со В.М. Удаление вредных газов из потока воздуха с использованием углеродные сорбенты на основе растительных отходов Республика Союз Мьянма / **В.М. Со**, Е.Н. Зо, А.А. Курилкин [и др.] // Chemical Bulletin. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 118-130. (**Chemical Abstracts**)
8. Saw W. M. New carbon base nano absorbents from Myanmar macadamia nutshells, applied for the adsorption of n-butanol from vapor-gas mixture / **W.M. Saw**, Y.N. Zaw, L.S. Naing [et al.] // International Research Journal. – 2024. – № 12 (150). – P. 1-7. – DOI: 10.60797/IRJ.2024.150.4 (**GeoRef**)
9. Saw W.M. Myanmar agricultural wastes processing by using the method of pyrolysis to produce new nano sorbents for environmental pollution control / **W.M. Saw**, Y.N. Zaw, A.V. Nistratov, V.N. Klushin // International Research Journal. – 2025. – № 1 (151). – P. 1-6. – DOI: 10.60797/IRJ.2025.151.62 (**GeoRef**)

10. Saw W.M. Oxidation – adsorption method of wastewater treatment from synthetic dyes / **Saw Win Myint**, Zaw Ye Naing, T.G. Lyubushkin, Timofey G., A.V. Nistratov, A.A Kurilkin // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. – 2025. – 18 (1). – P. 85-93. (**Scopus**)
11. Со В.М., Наинг Линн Сое, Зин Мое, Мин Тху, Мьят Мин Тху, Нистратов А.В., Клушин В.Н. Термический рециклинг растительных отходов Мьянмы с получением углеродных адсорбентов / **В.М. Со**, Л.С. Наинг, М. Зин [и др.] // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 61-67. (**ВАК**)
12. Модифицирование в технологии углеродных адсорбентов / В.М. Мухин, В.Н. Клушин, А.В. Нистратов А.В., **Со Вин Мьинт** [и др.]. – Москва : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2022. – 326 с. – ISBN 978-5-7237-1955-2.
13. Сое Н.Л. Сопоставительные характеристики активных углей, полученных на основе отходов механической обработки железного дерева / Н.Л. Сое, З. Мое, В.М. Со, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Труды III Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов», г. Иваново, 26 – 30 июня 2018 г. – Иваново, 2018. – С. 151-153.
14. Мин Т. Условия получения активных углей из фрагментов скорлупы косточек сливы / Т. Мин, М.Т. Мьят, **В.М. Со** [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам международной конференции, Севастополь, 24 – 27 сентября 2018 года / под ред. Л.И. Лукиной, Н.А. Бежина, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 796-798.
15. Мьят М.Т. Гуза-пая как источник получения углеродных адсорбентов / М.Т. Мьят, Т. Мин, **В.М. Со** [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам международной конференции, Севастополь, 24 – 27 сентября 2018 года / под ред. Л.И. Лукиной, Н.А. Бежина, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 857-859.
16. Наинг Л.С. Исследование переработки отходов разделки стволов железного дерева на активные угли / Л.С. Наинг, М. Зин, **В.М. Со** [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам международной конференции, Севастополь, 24 – 27 сентября 2018 года / под ред. Л.И. Лукиной, Н.А. Бежина, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное

- образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 860-863.
17. Сое Н.Л. Экспериментальная оценка вовлечения в производство активных углей древесины железного дерева / Н.Л. Сое, З. Мое, **С.В. Мьинт** [и др.] // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития: Материалы II Международной научно-практической конференции, Иркутск, 19 – 21 ноября 2018 года. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2018. – С. 341-345.
 18. Мин Т. Показатели пористой структуры и адсорбционной способности целевых продуктов трансформации в активные угли оболочек косточек сливы / Т. Мин, М.Т. Мьят, **В.М. Со** [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 23 – 26 сентября 2019 года / Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 1055-1059.
 19. Наинг Л.С. Способность дисперсных отходов переработки растительного сырья в активные угли к фиксации плёночных нефтепродуктов / Л.С. Наинг, **В.М. Со**, В.Н. Клушин [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 23 – 26 сентября 2019 года / Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 1152-1155.
 20. Павлищева Т.А. Показатели продуктов активации карбонизата древесины пуинкадо углекислым газом / Т.А. Павлищева, Л.С. Наинг, **В.М. Со** [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 23 – 26 сентября 2019 года / Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 1237-1240.
 21. Со В.М. Оптимизация условий пиролиза оболочек плодов тамаринда / **В.М. Со**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: Сборник материалов VIII Всероссийской конференции, посвященной 60-летию ПАО «Химпром», Чебоксары, 16 – 17 апреля 2020 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2020. – С. 70-71.
 22. Со В.М. Показатели углеродных адсорбентов на базе кожуры опада плодов тамаринда / **В.М. Со**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Материалы V Всероссийской научной

- конференции (с международными участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов». 30 июня – 2 июля 2021 г. Иваново: Материалы конференции. – ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2021. – 506 с. – С. 157-160.
23. Мьинт С.В., Нистратов А.В., Клушин В.Н. Активный уголь из кожуры плодов тамаринда - отхода пищевых производств Мьянмы / **С.В. Мьинт**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 30 ноября 2022 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 159-163.
24. Со В.М. Нистратов А.В., Клушин В.Н. Удаление фенола из воды с использованием активного угля на основе кожуры плодов тамаринда / **В.М. Со**, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // VII Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 50-летию академической науки на Урале «Техническая химия. От теории к практике»: сборник тезисов докладов. – Пермь: Институт технической химии УрО РАН, 2022. – С. 203.
25. Зо Е.Н. Мелкозернистый активный уголь на основе ископаемого угля месторождения Тиджит как средство фиксации плавающих нефтепродуктов / Е.Н. Зо, **В.М. Со**, А.В. Нистратов [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 18 – 21 сентября 2023 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 37-42.
26. Со В.М. Структурно-адсорбционные показатели углеродных адсорбентов на базе отходов пищевых производств Мьянмы / **В.М. Со**, Е.Н. Зо, А.В. Нистратов, В.Н. Клушин // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 18-21 сентября 2023 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2023. – С. 232-236.
27. Myint S.W. Activated carbon based on rice husks of Myanmar enterprises as a remover of organic solvent vapors from the air / **S.W. Myint**, Z. Ye. Naing, A.V. Nistratov, V.N. Klushin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1061, No. 1. – P. 012033. – DOI 10/1088/1755-1315/1061/1/012033
28. Myint S.W. Technical indicators of active coal obtained by chemical activation of the carbon residue of rice hazel pyrolysis / **S.W. Myint**, A.H. Thu, V.N. Klushin // Proceedings of 9th International Conference of Advances in Bio-Informatics, Bio-Technology and Environmental Engineering ABBE 2019. – P. 28-31. DOI 10.15224/978-1-63248-180-1-08

29. Naing Z.Ye. Kinetics and balance of adsorption of n-butanol from its vapor-air mixtures by activated carbon from the fossil coal of the Kalewa deposit / Z. Ye. Naing, **S.W. Myint**, A.V. Nistratov, V.N. Klushin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1061, No. 1. – P. 012032. – DOI 10.1088/1755-1315/1061/1/012032
30. Naing Z.Ye. Chemical activation as a promising method of converting fossil coal from the Tigyit deposit into activated carbons / Zaw Ye Naing, **Saw Win Myint**, A.V. Nistratov, A.A. Kurilkin, V.N. Klushin // Radionova, L.V., Ulrikh, D.V. (eds.). Advances in Ecology and Environmental Engineering. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. P. 469-478. doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_41
31. Myint S.W. Efficiency of using granular activated carbon obtained from Tamarind fruit processing waste for the purification of multi components impurities in industrial draining wastewater // Radionova, L.V., Ulrikh, D.V. (eds.). Advances in Ecology and Environmental Engineering. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. P. 217-228. doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_19
32. 1. Патент № 2609802 С1 Российская Федерация, МПК С01В 31/08. Способ получения активного угля из растительного сырья : № 2015149673 : заявл. 19.11.2015 : опубл. 06.02.2017 / В.Н. Клушин, Т.А. Си, В.М. Со [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».
33. Патент № 2605967 С1 Российская Федерация, МПК С01В 31/08. Способ получения дробленого активного угля : № 2015149672 : заявл. 19.11.2015 : опубл. 10.01.2017 / В.Н. Клушин, В.М. Со, В.М. Мухин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».
34. Патент № 2675576 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/318, С01В 32/324. Способ получения активного угля на основе растительных отходов : № 2018116213 : заявл. 28.04.2018 : опубл. 19.12.2018 / В.Н. Клушин, В.М. Мухин, В.М. Со [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».
35. Патент № 2675569 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/318, С01В 32/324. Способ получения активного угля на основе древесного сырья : № 2018116211 : заявл. 28.04.2018 : опубл. 19.12.2018 / В.Н. Клушин, В.М. Мухин, В.М. Со [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

36. Патент № 2829815 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/312, В01J 20/30. Способ получения активного угля : № 2024104709 : заявл. 26.02.2024 : опубл. 06.11.2024 / В.Н. Клушин, Й.Н. Зо, В.М. Со [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».