

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

На правах рукописи



Зо Е Наинг

**Ископаемые угли месторождений Мьянмы Калейва и Тиджит,
как источники сырья для технологии активных углей**

2.6.7. Технология неорганических веществ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре промышленной экологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Научный консультант доктор технических наук, профессор **Клушин Виталий Николаевич**, профессор кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Бейлина Наталия Юрьевна

ведущий научный сотрудник научно-учебной
испытательной лаборатории «Физико-химии
углей» Университета науки и технологий МИСИС

доктор технических наук,
профессор
Глушанкова Ирина Самуиловна

профессор кафедры охраны окружающей среды
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

доктор биологических наук,
доцент
Пьянова Лидия Георгиевна

главный научный сотрудник отдела технологии
топлива и углеродных материалов Центра новых
химических технологий ИК СО РАН

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита диссертации состоится «26» июня 2025 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.06 в конференц-зале (ауд. 344) Тушинского комплекса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125480, г. Москва ул. Героев Панфиловцев, домовладение 20).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.06
кандидат технических наук, доцент



А.Д. Стоянова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Масштабы техногенных поступлений загрязняющих веществ в биосферу в настоящее время, несмотря на предпринимаемые меры по их сокращению, обуславливают нанесение населению Земли, ввиду постоянно растущего производства, вреда, соизмеримого с последствиями использования оружия массового поражения. Среди ансамбля таких веществ наибольшую опасность представляют органические в связи с относительной легкостью их поступления в организмы живых существ, обуславливающей возможность возникновения различных заболеваний, патологий и даже смертельных последствий.

Для борьбы с токсичными выбросами и сбросами используют ряд приемов их очистки от вредных компонентов, финишной стадией которых, обеспечивающей глубокое (санитарное) извлечение целевых компонентов, наиболее часто является обработка соответствующих потоков и сред активными углями. Последние представляют собой на мировых рынках сравнительно дорогостоящие материалы, что существенно ограничивает, особенно в развивающихся странах, таких как Мьянма, их широкое использование.

В связи с этим во многих странах, судя по имеющимся публикациям, ведутся интенсивные исследования, ориентированные на оценку целесообразности и эффективности получения активных углей на базе легко и широкодоступного местного сырья в виде ископаемых углей и отходов агропромышленных комплексов. Низкая стоимость такого сырья и доказанная возможность получения на основе многих его представителей названных адсорбентов достаточно высокого качества представляют собой весьма серьезные мотивы проведения исследований указанного плана.

Республика Союз Мьянма не имеет собственных производств углеродных адсорбентов, но располагает среди имеющихся многочисленных углепроявлений 16-тью разведанными месторождениями низкосернистых ископаемых углей с общим ресурсом 258 млн. т, доказанные запасы каменных углей в которых оценивают в 4,62 млн. т. Следует подчеркнуть, что указанные месторождения в их большинстве крайне мало изучены, а добываемый уголь используют исключительно в энергетических целях.

Однако ценность ископаемых углей определяется не только их энергетическим использованием, но и возможностью извлечения из них ряда редких и рассеянных элементов, аккумуляирования при их добыче угольного метана, получения их основе различных продуктов повышенной стоимости, в том числе активных углей, способных, в

частности, решать многочисленные проблемы Мьянмы в области защиты окружающей среды, включая в перспективе минимизацию и упразднение главного недостатка угольной теплоэнергетики – загрязнения биосферы её дымовыми газами.

Факт зависимости качества получаемых углеродных адсорбентов от вида и состава сырья широко известен. В этой связи оценка возможности и целесообразности переработки ископаемых углей двух наиболее доступных и эксплуатируемых месторождений Мьянмы (Калейва и Тиджит) на активные угли является весьма актуальной задачей, как для экологии, так и для экономики государства.

Степень разработанности темы. В доступных источниках научно-технической информации отсутствуют сведения об использовании ископаемых углей месторождений Мьянмы с целью получения на их основе названных адсорбентов. Наряду с этим широко известна принципиальная возможность такой переработки углей иных месторождений с получением целевых продуктов различных выхода и качества.

Цель работы – разработка теоретических положений и научно обоснованных технологических решений, ориентированных на обоснование реализации значимой для экономики Мьянмы проблемы организации производства на базе отечественных каменноугольных месторождений активных углей.

Задачи исследования:

- Анализ современного состояния вопросов термической переработки ископаемых углей с получением углеродных адсорбентов и использования активных углей в решении задач защиты биосферы.
- Изучение принципиальной пригодности ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит для указанной цели путем петрографических, термографических и химических исследований.
- Обоснование рациональных условий пиролиза названного сырья, его химической активации и активации водяным паром целевых продуктов пиролиза с оценкой выхода и структурно-адсорбционных свойств получаемых материалов, сведением материальных балансов, выявлением состава побочных продуктов и направлений их использования.
- Выявление сопоставительной эффективности использования полученных углеродных адсорбентов в решении природоохранных задач.
- Примерная технико-экономическая оценка производства активных углей на базе ископаемых углей обоих месторождений.

Методология и методы исследований. Мотивом исследований послужили государственные нужды Мьянмы, наличие в стране значительных запасов ископаемых

углей и доступная научно-техническая информация о переработке названного сырья на углеродные адсорбенты. На основе этого определена логика выполнения работы, ее материальные, энергетические и аналитические потребности. Результаты текущих лабораторных испытаний оценены с использованием имеющихся дериватографа, хроматографа, ряда экспериментальных установок и аналитических методик, соответствующих государственным стандартам РФ. Отдельные исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева, в лаборатории физико-химии углей Горного института НИТУ МИСиС и лаборатории активных углей АО «ЭНПО «Неорганика».

Научная новизна. В работе в соответствии с паспортом научной специальности 2.6.7. «Технология неорганических веществ» впервые:

- результатами химических, петрографических и термических исследований внесен вклад в область научных знаний об ископаемых углях путем оценки ряда характеристик углей месторождений Калейва и Тиджит, свидетельствующий о целесообразности их исследования в качестве сырья для получения углеродных адсорбентов,
- с привлечением термографического анализа в защитной и окислительной атмосферах установлены целесообразные пределы исследования термического воздействия на названное сырьё и науглероженные продукты его пиролиза при пиролизе названных ископаемых и активации его целевых продуктов водяным паром в атмосфере продуктов их деструкции,
- выявлены закономерности влияния сырьевых факторов и параметров, управляющих процессами пиролиза ископаемых углей названных месторождений, их химической активации (с использованием NaOH, KOH, ZnCl₂, K₂CO₃) и активации продуктов пиролиза водяным паром (интенсивности нагревания, предельной температуры, длительности изотермической обработки, удельного расхода водяного пара, состава сырьевых композиций) на выход и структурно-адсорбционные свойства целевых продуктов,
- обоснованы условия получения активных углей химической активации с KOH и паровой активации на базе ископаемых углей обоих месторождений, превосходящих известные аналоги в глубине очистки воды (в том числе питьевой) от фенола и этилбензола, соответственно,
- совокупностью полученных результатов выявлены рациональные сочетания значений параметров, управляющих названными термическими переделами, с

показателями выхода и структурно-адсорбционных свойств их целевых продуктов,

- установлены кинетические зависимости эффективности извлечения органических примесей полученными активными углями из производственных стоков от их дозы (применительно к многокомпонентным сточным водам выпуска № 1 АО «Москокс») и фиксации ими плавающих пленок дизельного топлива,
- оценены кинетические и равновесные характеристики процессов использования полученных активных углей при извлечении из воздушных потоков паров летучих органических растворителей (на примере н-бутанола),
- итоги выполненных исследований свидетельствуют о расширении научных представлений о переработке ископаемых углей на углеродные адсорбенты и потенциально увеличена номенклатура активных углей.

Теоретическая и практическая значимость. В работе впервые:

- установлен характер влияния использованного сырья на режимные параметры операций его пиролиза, химической активации и активации водяным паром продуктов пиролиза,
- обоснованы целесообразные условия реализации названных операций, обеспечивающие рациональные сочетания выхода и структурно-адсорбционных свойств целевых продуктов,
- оценен ансамбль тестированных показателей пористой структуры, поглощательных свойств и технических характеристик полученных адсорбентов, свидетельствующий наряду с результатами их прикладного использования о вероятной конкурентоспособности данных поглотителей,
- для лучших активных углей, полученных на базе ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит, осуществлена ориентировочная технико-экономическая оценка себестоимости их производства при производительности 50 т в год,
- показана принципиальная возможность и целесообразность реализации в условиях Мьянмы разработанных технологий, способных обеспечить национальные потребности страны и расширить номенклатуру активных углей на мировых рынках.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты химических, петрографических и термографических исследований сырья, ориентированных на обоснование целесообразности его использования для получения углеродных адсорбентов и оценки областей температурного воздействия на него при пиролизе и активации паром.

2. Экспериментально обоснованные условия реализации процессов пиролиза сырья, его химической активации и активации водяным паром карбонизированных продуктов пиролиза, обеспечивающие рациональное сочетание выхода и структурно-адсорбционных свойств целевых продуктов.

3. Ансамбль технических показателей и поглотительных свойств целевых продуктов, характеризующий их как адсорбенты.

4. Сопоставительные оценки эффективности использования полученных адсорбентов в процессах очистки производственных стоков от органических примесей, фиксации пленочных разливов дизельного топлива на водной поверхности и извлечения паров летучих органических растворителей из их смесей с воздухом.

5. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема производства 50 т в год активных углей в условиях Мьянмы из названного сырья и итоги примерной оценки себестоимости их получения.

Достоверность полученных результатов. Среднеквадратическое отклонение σ экспериментальных результатов множества (более 92 %) воспроизводимых лабораторных определений не превышало уровня наименее точных оценок, связанных с установлением объема неконденсируемых газов ($\sigma = 0,497$), хотя в ряде случаев существенно превосходило должные рамки по причинам, в основном связанными с небольшими массами навесок, коррозией металлических реакторов пиролиза и активации, потерями рабочих жидкостей вследствие адгезии к стенкам емкостей и тому подобными обстоятельствам. Арбитражные определения выполнены с использованием сертифицированного оборудования центра коллективного пользования университета и сторонних организаций.

Апробация работы. Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии (2017, 2021, 2023, 2024, г. Москва); Международной конференции «Химическая технология функциональных наноматериалов» (2017, 2022, г. Москва); IV Международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение» (2021, г. Тамбов); VI Международной научной конференции «Теория и практика процессов химической технологии (Марушкинские чтения)» (2021, г. Уфа); V всероссийской научной конференции (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (2021, г. Иваново); Всероссийской студенческой конференции с международным участием

«Геоэкология: теория и практика» (2021, г. Москва); Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии ПИРХТ-2022» (2022, г. Воронеж); IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Технологии переработки отходов с получением новой продукции» (2022, г. Киров); Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология» (2022, г. Новомосковск); XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» (2023, г. Киров); VII Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (2023, г. Иваново, г. Суздаль); II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные достижения молодых ученых в биологии, медицине и ветеринарии» (2023, г. Астрахань); Научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (2020 – 2021, 2023, г. Севастополь).

Публикации. Основные положения диссертации получили полное отражение в 36 печатных работах, в том числе в 12 статьях в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science, GeoRef, Chemical Abstracts, Springer. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях: опубликовано 22 работы в материалах всероссийских и международных конференций. Получено 2 патента РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 314 страницах машинописного текста, включающих 139 таблиц и 67 рисунков. Библиографический список представлен 306 наименованиями цитированных работ российских и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, отображена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также апробация результатов работы.

Глава 1. В аналитическом обзоре литературы приведены общие сведения об ископаемых углях, их генезисе, структуре и минеральных включениях, а также об

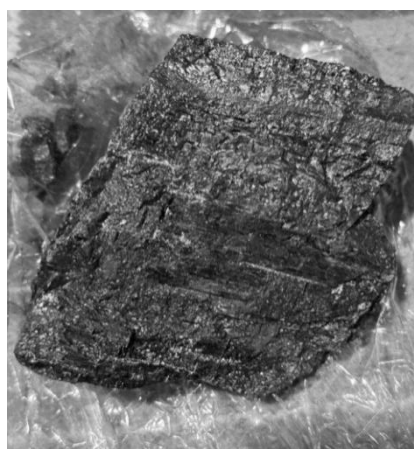
активных углях, способах их производства (преимущественно на основе каменноугольного сырья) и его ключевых термических стадиях наряду с использованием в решении задач защиты биосферы. Рассмотрены основы описания физической адсорбции на этих адсорбентах и некоторые природоохранные проблемы Мьянмы, требующие их использования. Обзор завершён выводами и сформулированными на их основе задачами исследования.

Глава 2 содержит ключевую информацию об объектах углеадсорбционной переработки, описывает опытные установки для термической обработки ископаемых углей и последующей паровой активации карбонизованного продукта и химической активации. Кроме того, рассматриваются методы анализа пористой структуры полученных материалов, их технические параметры, а также используемые приборы и аналитические подходы, обеспечивающие точность и надёжность выполненных исследований.

Глава 3 представляет оценку результатов термической переработки ископаемых углей эксплуатируемых месторождений Мьянмы (рисунка 1) с получением углеродных адсорбентов парогазовой и химической активацией.



а



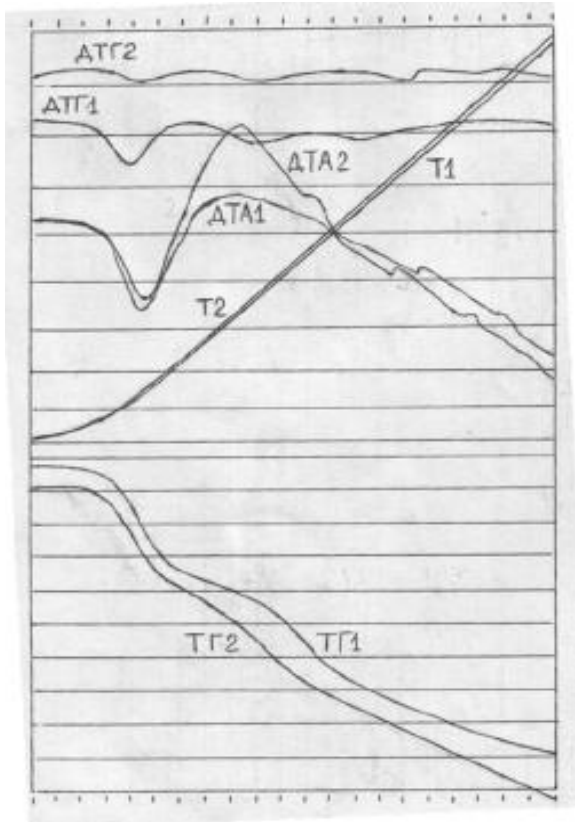
б

Рисунок 1 – Внешний вид образцов ископаемых углей месторождений Калейва (а) и Тиджит (б)

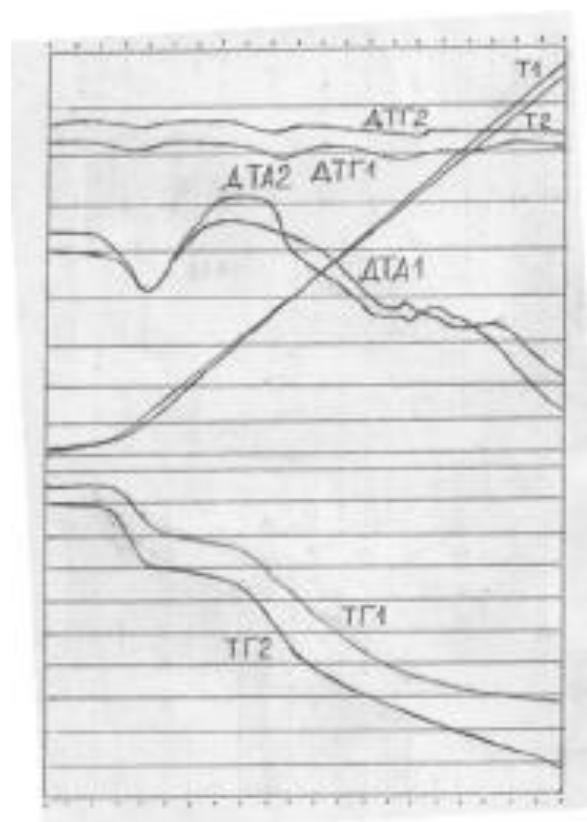
В части предварительной оценки пригодности сырья здесь с привлечением химических, петрографических и термографических (рисунок 2) его исследований экспериментально установлены элементный состав обоих ископаемых (таблица 1), принципиальная пригодность для производства углеродных адсорбентов и целесообразная область термического воздействия на них при пиролизе.

Таблица 1 – Элементный состав и технические свойства (летучие вещества – V^{daf} , содержание влаги – W и золы A_a , насыпная плотность d (в г/см^3) фракции 3-5 мм, прочность при истирании – Π) ископаемых углей (ИУ) месторождений Тиджит (Т) и Калейва (К)

ИУ	Показатель, % масс.									
	C	H	O	N	S	A_a	V^{daf}	W	d	Π
Т	84,0	4,3	7,8	2,6	0,03	11,4	48,4	17,9	1,18	99,2
К	81,3	5,2	9,7	4,6	0,00	3,1	39,2	6,8	0,73	83,9



а



б

Рисунок 2 – Термограммы ископаемых углей месторождений Тиджит (а)/Калейва (б) в атмосферах азота (1, навеска 767,3 мг)/(1, навеска 739,1 мг) и воздуха (2, навеска 737,1 мг)/(2, навеска 681,2 мг)

Горизонтальные линии в верхней части каждой термограммы (рисунок 2 - Т, ТГ, ДТА) соответствуют температурам от комнатной до 900 °С с шагом 100 °С. Размер шкалы ТГ термограмм составляет 500 мг. В нижней части термограммы расстояние между горизонтальными линиями составляет 50 мг.

В части пиролиза (карбонизации) сырья в главе 2 путем пофакторных экспериментов, заключающихся в исследовании влияния на результаты эксперимента одного из изменяемых с определенным шагом управляющих факторов при фиксированных значениях остальных, обоснованы целесообразные условия пиролиза сырья, констатируемые рациональным сочетанием выхода и структурно-адсорбционных показателей целевых продуктов. Области варьирования параметров, управляющих процессом пиролиза, являлись 5-30 °С/мин для интенсивности нагрева «i», 650-850 °С для предельной температуры «t» и 30-120 мин для времени выдержки при конечной температуре «τ». Для целевых продуктов оценивали выход и устанавливали оперативно определяемые показатели качества (суммарную пористость по воде V_{Σ} , объемы сорбирующих пор V_s по парам воды, четыреххлористого углерода и бензола, величины поглощения йода I и красителя метиленового голубого МГ из их растворов). Пиролизу подвергали воздушно сухое сырье фракции 3-5 мм. Рациональные сочетания названных факторов и показателей характеризуют данные таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – Целесообразные условия пиролиза ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит и технические характеристики продуктов

Ископаемый уголь месторождения	Показатели:						
	режима процесса			характеристик карбонизатов			
	i, °С/мин	t, °С	τ, мин	d, г/см ³	A, %	W, %	П, %
Калейва	10	750	60	0,91	9,5	14,4	86
Тиджит	15	800	60	0,68	2,9	5,3	78

Совокупность данных таблицы 2 и 3 свидетельствует о потенциальной возможности получения последующей активацией охарактеризованных карбонизатов достаточно качественных активных углей. Внешний вид карбонизатов (рисунок 3) несколько различен: преимущественно матовые зерна карбонизата рисунка 3-б имеют довольно значительные вкрапления серо-белого и белого цвета в отличие от также матовых зерен рисунка 3-а с редкими аналогичными вкраплениями.

Таблица 3 – Показатели выхода и структурно-адсорбционные свойства целевых продуктов пиролиза концентратов ряда ископаемых углей

Продукт пиролиза ископаемого угля	Показатели						
	Объем пор, см ³ /г				Поглощение, мг/г		Выход, %
	V _Σ	V _{SH₂O}	V _{SCCl₄}	V _{SC₆H₆}	I	МГ	
Калейва	0,16	0,16	0,09	0,17	150	25	57
Тиджит	0,23	0,12	0,08	0,07	311	260	39
КО+КС (ОФ «Томусинская»)	0,51	0,12	0,13	0,04	29	20	83
ГЖО (ЦОФ «Кузбасская»)	–	0,04	0,02	0,07	38	10	80
ОС+КС (ЦОФ «Сибирь»)	–	0,05	0,02	0,04	45	3	81
Шихта для коксования	–	0,02	0,03	0,02	13	–	75



а



б

Рисунок 3 – Фрагменты выгруженных из реактора карбонизатов ископаемых углей месторождений Калейва (а) и Тиджит (б)

Согласно материальным балансам (таблица 4) операций пиролиза обоих видов сырья, выходы карбонизатов, конденсатов и неконденсирующихся газов близки, причем доля целевых продуктов существенно превосходит таковую побочных.

При перегонке конденсата угля месторождения Калейва в количестве ~40 % от его объема образуется не перегоняемая горючая и высоко адгезивная жидкость темного

цвета плотностью 0,42 г/см³ при 60 °С, при остывании превращающаяся в эластичную массу аналогичного цвета, похожую на гудрон.

Таблица 4 – К материальным балансам операций пиролиза ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит

Ископаемый уголь месторождения	Статьи баланса, % масс.	
	Приход	Расход
Калейва	Сырье 100	Карбонизат 59,4
		Конденсат 14,2
		Газы 26,4
	Итого: 100	Итого: 100
Тиджит	Сырье 100	Карбонизат 61,0
		Конденсат 12,7
		Газы 26,3
	Итого: 100	Итого: 100

Неконденсирующиеся газы более значительны по массе, чем конденсаты. Они горючи, что позволяет практически полностью компенсировать энергетические затраты на осуществление процесса пиролиза. Исследованиями их состава применительно к пиролизу угля месторождения Калейва с привлечением газового хроматографа «Цвет-500М» (газ-носитель - азот) установлено наличие водорода, ацетилена, метана, оксидов азота и углерода, содержание которых изменяется с увеличением температуры во время пиролиза, что иллюстрирует рисунок 4.

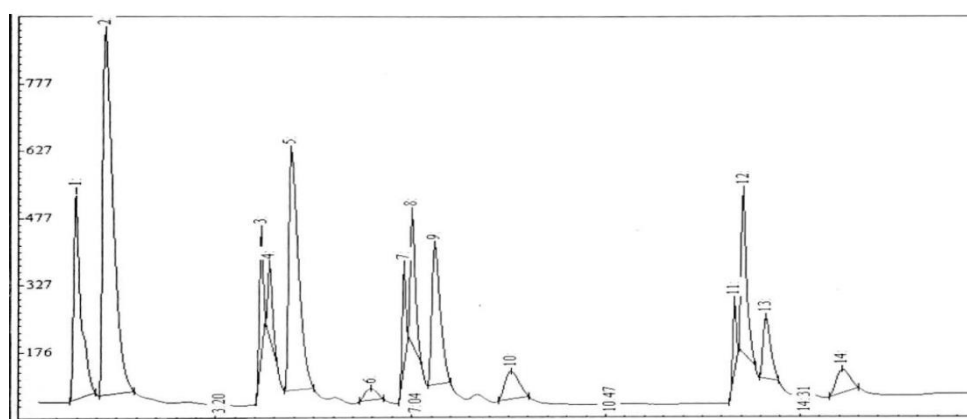


Рисунок 4 – Хроматограммы неконденсируемых газов пиролиза угля месторождения Калейва

Результаты интерпретации хроматограмм рисунка 4 характеризуют данные таблицы 5.

Таблица 5 – Характеристика принадлежности пиков хроматограмм рисунка 4 и трансформации доли компонентов в газах пиролиза в зависимости от температуры процесса

Температура, °C	№ пика	Компонент	Интенсивность пика, мВ	Доля компонента в пробе газа, %об.
350	1	H ₂	462	1
	2	CO	813	41
400	3	H ₂	295	15
	4	NO	179	12
	5	CO ₂	541	31
	6	CH ₄	25	2
450	7	H ₂	240	8
	8	CO	312	17
	9	NO ₂	315	19
	10	C ₂ H ₂	62	5
500	11	H ₂	174	11
	12	NO	379	22
	13	CH ₄	140	9
	14	C ₂ H ₂	51	3

Согласно данным таблицы 5, выделение водорода начинается в области 350 °C, где его содержание близко к 1% по объему, вблизи 400 °C появляется метан, его содержание характеризует максимум в области 500 °C (~ 9 % об). Начало выделения ацетилена фиксировано в области 450 °C, при продолжаемом повышении температуры оно ослабевает. Аналогичные данные получены и для неконденсируемых газов пиролиза угля месторождения Тиджит.

Применительно к активации карбонизатов водяным паром в главе 2 охарактеризованы исследования рациональных условий активации карбонизированных продуктов, полученных в указанных выше рациональных условиях, водяным паром. Они

выполнены аналогичным изучению пиролиза способом при изменении интенсивности нагревания «i» в пределах 5-15 °С/мин, температуры «t» - 750-950 °С, длительности изотермической выдержки «τ»— 0-60 мин и удельного расхода водяного пара (v) - 5-20 г на 1 г целевого продукта. Активации подвергали воздушно сухие карбонизаты фракции 3-5 мм. Рациональные сочетания величин управляющих факторов и показателей полученных активных углей характеризуют данные таблицы 6 и 7.

Таблица 6 – Целесообразные условия активации водяным паром целевых продуктов пиролиза ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит и технические характеристики активных углей

Карбонизат ископаемого угля месторождения	Показатели:							
	режима процесса				характеристик продукта			
	i	t	τ	v	d	A	W	Π
Калейва	10	850	30	10	0,46	6,6	5,0	78
Тиджит	10	900	30	10	0,43	6,8	5,1	70

Таблица 7 – Показатели выхода к карбонизату и структурно-адсорбционные свойства целевых продуктов активации водяным паром карбонизатов пиролиза ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит

Карбонизат ископаемого угля месторождения	Показатели продукта активации						
	Объем пор, см ³ /г				Поглощение, мг/г		Выход, %
	V _Σ	V _{SH₂O}	V _{SCCl₄}	V _{SC₆H₆}	I	МГ	
Калейва	1,60	0,17	0,22	0,29	432	278	39
Тиджит	1,75	0,27	0,47	0,39	610	263	52

Охарактеризованная адсорбционная активность по метиленовому голубому активных углей, полученных из ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит, находится на уровне таковой коммерческого активного угля на каменноугольной основе российского производства марки АГ-3 (110-300 мг/г), насыпная плотность несколько ниже (0,42-0,61 г/см³), как и прочность при истирании (83-98 %), массовое содержание влаги выше (<2,5 %), а содержание золы соответствует (5-11 % масс.). Внешний вид полученных продуктов отражают фото рисунка 5.

Как видно из рисунка 5, основную массу активного угля (фото а) представляют

матовые черные зерна, тогда как на фото б она представлена черными зернами в основном с блестящей поверхностью.



а



б

Рисунок 5 – Ансамбль фрагментов активных углей, полученных паровой активацией карбонизатов ископаемых углей месторождений Калейва (а) и Тиджит (б)

Таким образом, активация паром способствует существенному развитию структурно-адсорбционных показателей соответствующих карбонизатов, обеспечивая выход целевых продуктов к сырью, составляющий несколько более 22 (Калейва) и 20 % (Тиджит). Сведения о материальных балансах активации водяным паром карбонизатов ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит характеризует информация гистограммы рисунка 6.

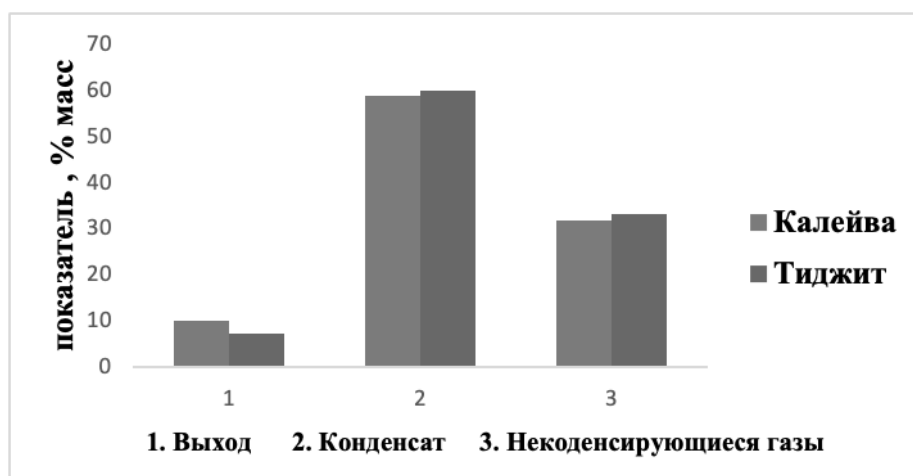


Рисунок 6 – К материальным балансам активации водяным паром карбонизатов ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит

Данные гистограмм рисунка 6 свидетельствуют об ожидаемо большой доле конденсатов среди продуктов активации и, напротив, малой доле в них активных углей.

Масса образующихся конденсатов примерно в 2 раза превышает таковую неконденсирующихся газов. При нагревании обоих конденсатов на песчаной бане имеет место имитирующее кипение в области температур $\sim 50\sim 70$ °С выделение газов, не образующих при охлаждении до комнатной температуры каких-либо конденсирующихся веществ. Как отвердевшие, подобные гудрону, так и жидкие горячие не перегоняемые остатки являются горючими и обладающими в разогретом состоянии высокой адгезией к металлам и древесине. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о весьма высоком потенциале подобных материалов, как источников получения разнообразных продуктов. Некоторые детали процесса перегонки иллюстрируют данные таблицы 8.

Неконденсирующиеся при комнатной температуре газы активации составляют около трети от общей массы продуктов этих операций, что указывает на важность их оценки, с целью чего получены их хроматограммы, подобные представленным на рисунке 4, характеризующие принадлежность пиков и трансформацию доли компонентов в газах активации в зависимости от температуры процесса.

Таблица 8 – Конденсаты активации и продукты их перегонки (числитель – Калейва, знаменатель – Тиджит)

Конденсаты						
Внешний вид	Вязкость	d, г/см ³	Мутность	pH	Запах	Расслоение
темно-коричневые жидкости	несколько более H ₂ O	0,69 / 0,63	да	5 / 4	неприятный	нет
Жидкие продукты перегонки						
Отгоняемый объем, %	Внешний вид	Вязкость	d, г/см ³	Мутность и запах	pH	
~65/60 от объема конденсата	темно-коричневые жидкости	несколько более H ₂ O	~0,69/0,63	да нет	~5/4	
Неперегоняемые остатки						
Внешний вид горячих остатков	pH	Продукты остывания	Внешний вид	Объем, %	d, г/см ³	
темные при 60 °С жидкости	—	упругие массы	цвет черно-коричневый	~35/40 от конденсата	0,48/0,46	

Отдельный раздел главы 2 посвящен химической активации ископаемых углей месторождений Калейва и Тиджит.

Многие публикации свидетельствуют о ряде существенных преимуществ активных углей на каменноугольной основе, полученных путем химической активации. Это обстоятельство обуславливает целесообразность оценки потенциала характеризуемого сырья и с этих позиций. Среди различных агентов химической активации многих ископаемых углей, охарактеризованных в научно-технической литературе, автору представляется наиболее рациональным использование такой относительно легко доступной в Мьянме химической продукции, как NaOH, K₂CO₃, KOH и ZnCl₂. Одни из этих агентов использованы в сухом виде, другие – в виде водных растворов.

Активация угля месторождения Калейва проведена с использованием NaOH и KOH в условиях варьирования интенсивности нагревания (5-20) °C/мин до температур 600-950 °C и длительности изотермической выдержки 30-120 мин. Сырьевые композиции (СК) приготовлены механическим смешиванием зерен угля размером 3-5 мм и частиц активаторов фракции 1-2 ммв различных массовых отношениях. В соответствии с широко практикуемыми приемами остывшие до комнатной температуры целевые продукты пиролиза СК отмывали от избытка активатора сначала водой, затем соляной кислотой и снова водой, после чего сушили при 105 °C до постоянной массы.

Активация с NaOH. Весьма часто удовлетворительные результаты обеспечивает использование массового отношения сырья к NaOH, составляющего 1:1. Установленные при нем целесообразные сочетания условий пиролиза СК и показателей целевых продуктов отражают данные таблицы 9.

Таблица 9 – Рациональные значения управляющих пиролизом СК (с массовым отношением сырья к NaOH = 1:1) параметров, выхода и структурно-адсорбционных свойств активных углей

Для сырья месторож- дения	Показатели:									Выход, %
	условий получения			структуры пор, см ³ /г				поглоще- ния, мг/г		
	i	t	τ	V _Σ	V _{SH₂O}	V _{SCCl₄}	V _{SC₆H₆}	I	МГ	
Калейва	10	750	60	0,27	0,28	0,12	0,30	624	317	52
Тиджит	10	850	60	0,26	0,25	0,10	0,15	776	251	29

Показатели d , W , A_a и P полученных активных углей (числитель – Калейва, знаменатель – Тиджит) составляют $0,57/0,50$ г/см³, $8,9/5,1$, $7,4/7,6$ и $65,7/68,4$ %, соответственно. У активного угля на каменноугольной основе марки АГ-3 российского производства показатель d равен $0,4-0,5$ г/см³, A_a – $12-15$ %, P – $70-75$ %, а I – $650-670$ мг/г.

Увеличения доли NaOH в обеих СК в целом негативно влияет на показатели пористой структуры и поглотительной способности получаемых активных углей, однако несколько увеличивает их выход. Внешний вид полученных адсорбентов отражают фото рисунка 7.

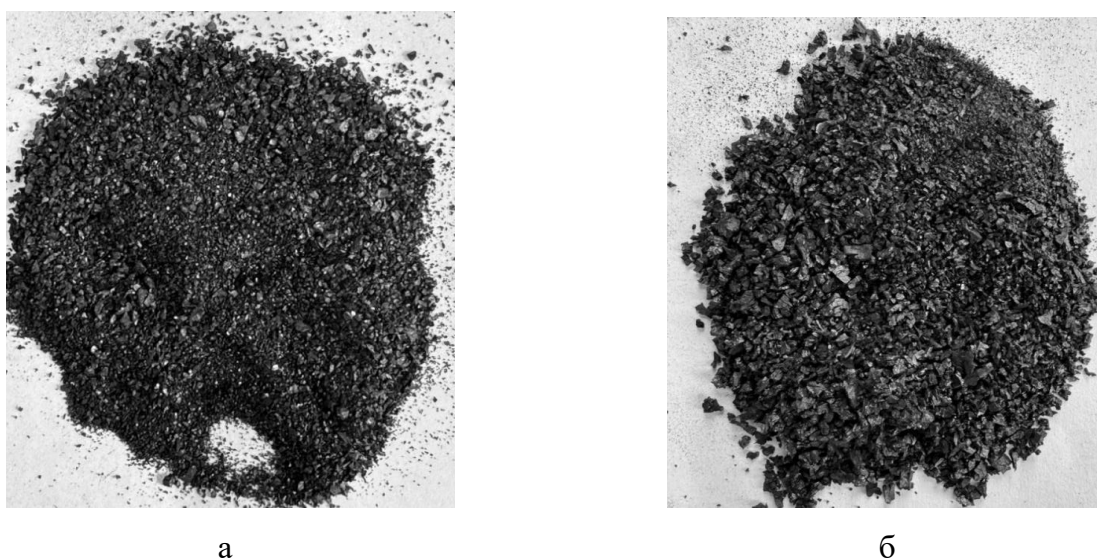


Рисунок 7 – Фото фрагментов активных углей на базе СК с массовым отношением NaOH:уголь= 1:1: Калейва (а) и Тиджит (б)

Активация с КОН. Очевидное положительное влияние сравнительно дешевого NaOH указывает на целесообразность оценки использования и более дорогостоящего, но чаще фигурирующего во многих исследованиях схожей ориентации КОН. Лучшие показатели таких исследований для углей обоих месторождений сопоставлены в таблице 10.

Показатели d , W , A_a и P полученных активных углей (числитель – Калейва, знаменатель – Тиджит) составляют $0,49/0,48$ г/см³, $6,7/5,6$, $8,1/8,1$ и $74,8/66,3$ %, соответственно. Сопоставление этих показателей с приведенными выше для угля АГ-3 свидетельствует, что оба полученных активных угля соответствуют углю АГ-3 по величине d , имеют существенно более низкое содержание золы, хотя величина P одного из них несколько ему уступает, тогда как по величине поглощения I его превосходит в

~2-3 раза.

Таблица 10 – Рациональные значения управляющих пиролизом СК (с массовым отношением сырья к КОН = 1:1) параметров, выхода и структурно-адсорбционных свойств активных углей

Для сырья месторож- дения	Показатели:									Выход, %
	условий получения			структуры пор, см ³ /г				поглоще- ния, мг/г		
	i	t	τ	V _Σ	V _{SH₂O}	V _{SCCl₄}	V _{SC₆H₆}	I	МГ	
Калейва	10	900	60	1,16	0,39	0,41	0,52	2230	321	26
Тиджит	10	900	60	0,44	0,32	0,43	0,15	1209	292	18

Внешний вид ансамбля зерен полученных адсорбентов характеризуют фото рисунка 8.



а



б

Рисунок 8 – Фрагменты активных углей на основе СК с массовым отношением углей месторождений Калейва (а) и Тиджит (б) к КОН, равным 1:1

Активация угля месторождения Тиджит с ZnCl₂. В экспериментах этой серии высушенную до постоянной массы соль растворяли в воде с получением раствора концентрацией 40 %, которым обрабатывали путем настаивания зерна сухого угля с обеспечением массовых отношений ZnCl₂ к углю, составляющих 1:1 и 4:1. Продукт пропитки отделяли от раствора, сушили и подвергали пиролизу. Избыток активатора из полученных адсорбентов удаляли выщелачиванием разбавленным раствором хлорида цинка с последующим экстрагированием HCl при нагревании, завершаемом промывкой

водой для удаления анионов хлора, фильтрованием и сушкой до постоянной массы.

Лучшие результаты обеспечивает пиролиз СК с массовым отношением сырья к $\text{ZnCl}_2 = 1:4$ (таблица 11).

Таблица 11 – Рациональные значения управляющих пиролизом СК (с массовым отношением сырья к $\text{ZnCl}_2 = 1:4$) параметров, выхода и структурно-адсорбционных свойств активного угля

Показатели:									
условий получения			объемы пор, $\text{см}^3/\text{г}$				поглощение, $\text{мг}/\text{г}$		выход, %
i	t	τ	V_Σ	$V_{\text{SH}_2\text{O}}$	V_{SCCl_4}	$V_{\text{SC}_6\text{H}_6}$	I	МГ	68
10	900	60	0,21	0,22	0,11	0,25	596	311	

Зерна полученного активного угля характеризует фото рисунка 10.



Рисунок 10 – Ансамбль фрагментов
активного угля хлорцинковой активации

Гравиметрическая плотность этого адсорбента $0,52 \text{ г}/\text{см}^3$, прочность при истирании 60 %, зольность 6,8 % и содержание влаги 5,1 %. Его адсорбционная активность по йоду находится на уровне указанной выше угля марки АГ-3, насыпная плотность несколько выше, а прочность при истирании и содержание золы ниже.

Активация угля месторождения Тиджитс K_2CO_3 . В ряде публикаций отмечена перспективность химической активации ископаемых углей с использованием K_2CO_3 . В этой связи высушенный до постоянной массы при 105°C ископаемый уголь пропитывали

водными растворами этой соли настаиванием в течение суток с получением СК с массовым отношением K_2CO_3 к сырью 2:1 и 1:1. Итоговые импрегнаты освобождали от растворов декантацией и вновь высушивали до постоянной массы с целью изучения их пиролиза. Итоги исследования рациональных сочетаний условий проведения этого процесса и показателей его целевых продуктов отражают данные таблицы 12.

Таблица 12 – Рациональные значения управляющих пиролизом СК (с массовым отношением сырья к K_2CO_3 = 1:2 (числитель) и 1:1 (знаменатель) параметров, выхода и структурно-адсорбционных свойств активного угля

Показатели:									
условий получения			объемов пор, см ³ /г				поглощения, мг/г		выхода, %
i	t	τ	V _Σ	V _{SH₂O}	V _{SCCl₄}	V _{SC₆H₆}	I	МГ	
10	900	60	0,39	0,28	0,21	0,33	838	331	36
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	900	60	0,36	0,23	0,22	0,35	763	310	43

Информация таблицы 12 указывает на очевидную рациональность использования массового отношения сырья к K_2CO_3 , равного 1:2. Внешний вид продукта такого пиролиза отражает фото рисунка 11.



Рисунок 11 – Массив фрагментов активного угля, полученного из сырьевой композиции с массовым отношением K_2CO_3 к сырью 2:1

Целевой продукт, полученный пиролизом в названных рациональные условия такой сырьевой композиции, характеризуют гравиметрическая плотность 0,52 г/см³, прочность зерен при истирании 68,8 %, зольность 8,9 % и содержание влаги 5,4 %. Его

адсорбционная активность по йоду находится выше уровня таковой угля марки АГ-3, насыпная плотность несколько больше, тогда как прочность при истирании и содержание золы ниже.

Условия получения и показатели охарактеризованных выше активных углей сопоставлены в таблице 13.

Таблица 13 – Сопоставление условий производства, выхода и структурно-адсорбционных свойств лучших из полученных активных углей

Для сырья месторож- дения	Показатели:									Вы- ход, %
	условия получения			объемы пор, см ³ /г				поглоще- ние, мг/г		
	i	t	τ	V _Σ	V _{SH2O}	V _{SCCl4}	V _{SC6H6}	I	МГ	
Калейва(пар)	10	850	30	1,60	0,17	0,22	0,29	432	278	39
Тиджит(пар)	10	900	30	1,75	0,27	0,47	0,39	610	263	52
Калейва (NaOH 1:1)	10	750	60	0,27	0,28	0,12	0,30	624	317	52
Тиджит (NaOH 1:1)	10	850	60	0,26	0,25	0,10	0,15	776	251	29
Калейва (KOH 1:1)	10	900	60	1,16	0,39	0,41	0,52	2230	321	26
Тиджит (KOH 1:1)	10	900	60	0,44	0,32	0,43	0,15	1209	292	18
Тиджит (ZnCl ₂ 4:1)	10	900	60	0,21	0,22	0,11	0,25	596	311	68
Тиджит (K ₂ CO ₃ 2:1)	10	900	60	0,39	0,28	0,21	0,33	838	331	36

Проведенное сравнение указывает, что максимальны выходы продуктов химической активации ископаемых углей месторождений Тиджит (ZnCl₂ 4:1) и Калейва (NaOH 1:1). Наиболее значительные величины поглощения йода демонстрируют активные угли химической активации Калейва (KOH 1:1), Тиджит (KOH 1:1) и в меньшей степени Тиджит (K₂CO₃ 2:1) и Тиджит (NaOH 1:1), а таковые использованного красителя

–Тиджит (K_2CO_3 2:1), Калейва (KOH 1:1), Тиджит ($ZnCl_2$ 4:1), Калейва (NaOH 1:1) и Тиджит (KOH 1:1). Сопоставление же наиболее совершенных совокупностей показателей пористой структуры и поглотительной способности активных углей в качестве лучших СК позволяет констатировать Калейва:KOH (1:1), Калейва:NaOH (1:1), Тиджит:KOH (1:1), Тиджит:NaOH (1:1), Тиджит: $ZnCl_2$ (1:4) и Тиджит: K_2CO_3 (1:2).

В работе с привлечением центра коллективного пользования университета для ряда образцов получена информация о низкотемпературном поглощении ими азота. Такие данные в качестве иллюстрации сопоставлены на рисунке 12 для карбонизата и активного угля химической активации (KOH 1:1), полученных на базе ископаемого угля месторождения Калейва.

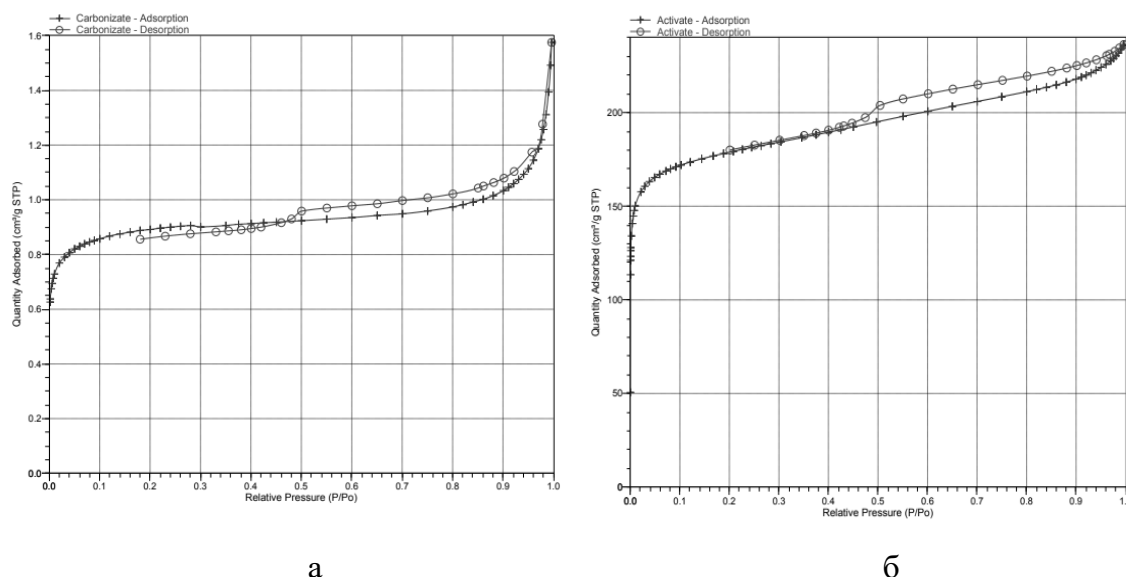


Рисунок 12 – Изотермы адсорбции и десорбции азота карбонизатом (а)
и активным углем (б) на базе сырья месторождения Калейва

Сопоставление изотерм рисунка 12, а и б свидетельствует о значительной разнице в поглотительной способности карбонизата и активного угля химической активации. Последний характеризуют большой выход (39 %), но сравнительно невысокие показатели качества. Распределение объема пор по размерам для обоих адсорбционно активных углеродных материалов приведено на рисунке 13.

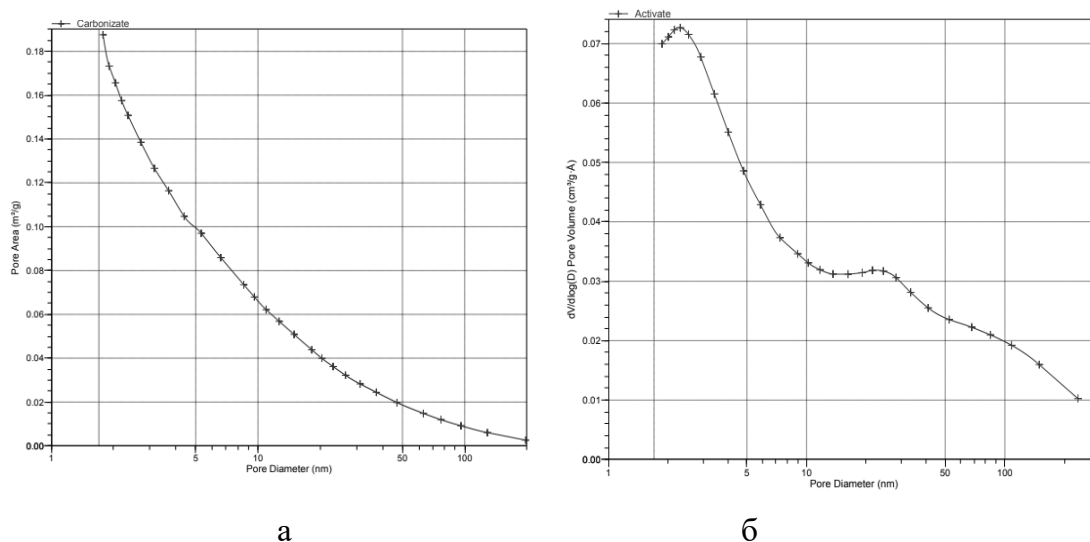


Рисунок 13 – Характер распределения объема пор по диаметрам для карбонизата (а) и активного угля (б)

Сравнение распределения объема пор по размерам обоих углеродных материалов свидетельствует о существенном развитии пористой структуры при переходе от карбонизата к активату и об изменении ее количественных параметров, сводящемся к увеличению поперечников пор всех размеров.

Полученные обработкой аналогичной информации структурные характеристики активного угля (АУ), произведенного из СК «уголь месторождения Калейва:КОН = 1:1» пиролизом при 900 °С, сопоставлены в таблице 14 с таковыми коммерческого активного угля на каменноугольной основе российского производства марки АР-В.

Таблица 14 – Сопоставление свойств активных углей

Марка угля	Суммарный объем пор V_{Σ} , см³/г	Объем $V_{ми}$, см³/г	Объем $V_{ме}$, см³/г	Удельная поверхность, м²/г
АУ	1,16	0,211 (t-метод)	0,076 (1,7 - 300 нм)	811(Ленгмюр) 662 (t-метод)
АР-В	0,55	0,25	0,04	730-800

Показатели удельной поверхности, объема микропор обоих углей и доли их мезопор в суммарном объеме пор сопоставимы (~ 6,9 % для АУ и ~ 7,3 % для АР-В). При этом доля микропор угля АУ (~ 18,2 %) более чем вдвое уступает углю АР-В (~ 45,4 %).

Для реализованных в рациональных условиях процессов физической и

химической активации в работе представлены материальные балансы (подобные таблицы 4), хроматограммы ряда неконденсируемых газов с их расшифровками (подобные рисунка 4 и данным таблицы 5) и показатели некоторых конденсатов.

Глава 4 характеризует некоторые аспекты прикладного использования полученных углеродных адсорбентов.

Их открывает информация об очистке ими стоков АО «Москокс». На рисунке 15 представлены результаты обработки активным углем, полученным пиролизом СК Калейва:КОН = 1:1, образца многокомпонентных сточных вод с территории коксохимического производства АО «Москокс» (выпуск 1), характеризующегося наличием ~760 и ~106 мг/л сухого и прокаленного остатков, соответственно, и содержанием общего органического углерода (ООУ) на уровне 120 мг/л.

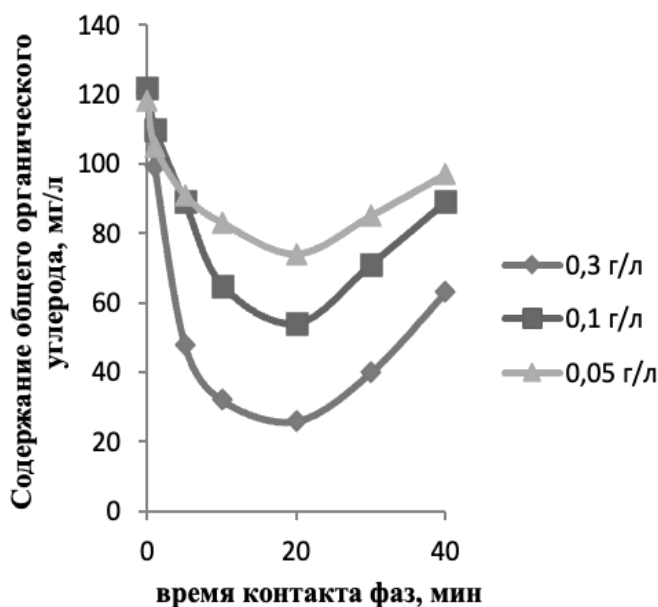


Рисунок 15 – Кинетика изменения содержания общего органического углерода в образце сточной воды с показателем ООУ = 120 мг/л, обработанном при перемешивании ($Re_m = 2150$) активным углем, полученным из СК Калейва:КОН = 1:1 и использованным в различных дозах

Данные рисунка 15 свидетельствуют о необходимости ограничения длительности обработки стока примерно 20 минутами, так как при большей продолжительности происходит возрастание содержания в воде общего органического углерода, что характерно для многих активных углей и, вероятно, связано с конкурентной адсорбцией множества загрязняющих веществ органической природы, находящихся в стоках. При этом значительная доза полученного активного угля (0,3 г/л и более) обеспечивает приемлемую эффективность сокращения содержания общего органического углерода (примерно на три четверти) в обрабатываемой воде.

Многие природоохранные задачи Мьянмы связаны с улавливанием токсичной органики в виде паров летучих органических растворителей (ЛОР) из газовых выбросов -

паровоздушных смесей (ПВС). В этой связи в работе на установке с пружинными весами Мак Бена и катетометром оценены кинетика и равновесие поглощения при комнатной температуре паров н-бутанола из их ПВС полученными адсорбентами. Типичные экспериментальные зависимости, выявленные при 20 °С с использованием зерен поглотителей фракции 1-2 мм и потоков ПВС различных концентраций с удельным расходом 2,5 л/(мин·см²) с целью подавления влияния на процессы адсорбции С₄Н₉ОН фактора внешней диффузии, представлены на рисунке 16.

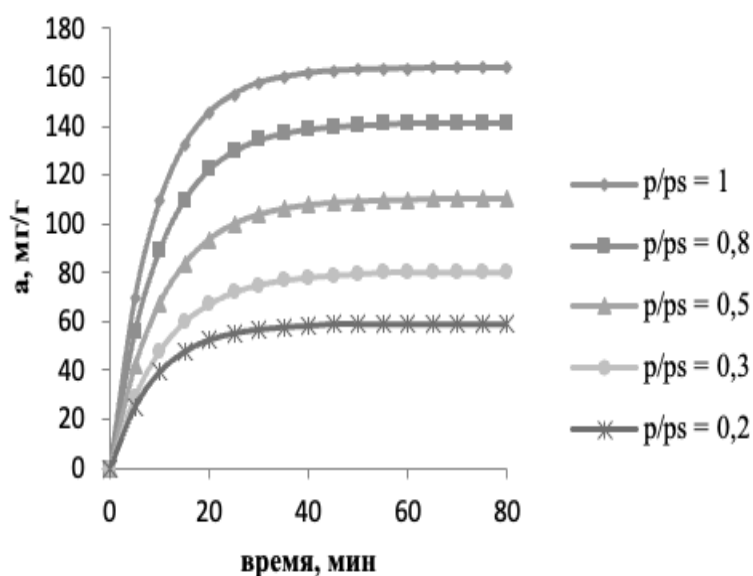


Рисунок 16 – Кинетика адсорбции паров н-бутанола из их ПВС различной концентрации активным углем паровой активации, полученным на базе ископаемого угля месторождения Калейва

На рисунке 17 охарактеризовано равновесие адсорбции паров н-бутанола на ряде активных углей, полученных из растительных отходов различных производств Мьянмы, активном угле российского производства марки БАУ и активном угле паровой активации на базе ископаемого угля (ИУ) месторождения Калейва.

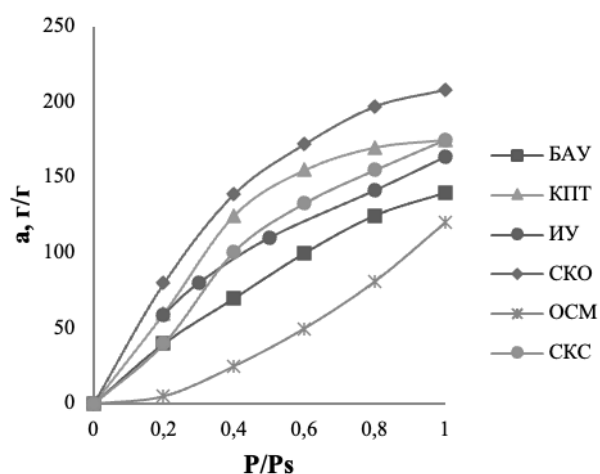


Рисунок 17 – Равновесие адсорбции при 20 °С паров н-бутанола активными углями на базе ИУ Калейва(●), кожуры плодов тамаринда (▲), древесины березы (■), оболочек семян манго (ж), скорлупы кокосовых орехов (◆) и косточек сливы (+)

Из данных рисунка 17 очевидно, что полученный адсорбент превосходит

коммерческий уголь марки БАУ, хотя и несколько уступает активным углям на базе кожуры плодов тамаринда, скорлупы кокосовых орехов и косточек сливы.

В России и ряде соседствующих с ней стран в технологиях очистки эвакуируемых в атмосферу потоков от паров ЛОР наиболее часто используют хорошо зарекомендовавшие себя активные угли российского производства на каменноугольной основе марки АГ-3 и серии АР, что определяет целесообразность сопоставления именно с ними полученных результатов.

На рисунке 18 сопоставлены результаты оценки равновесия адсорбции при 20 °С паров н-бутанола активными углями паровой и химической активации, полученными из ископаемого угля месторождения Калейва и скорлупы кокосовых орехов, и названными коммерческими адсорбентами.

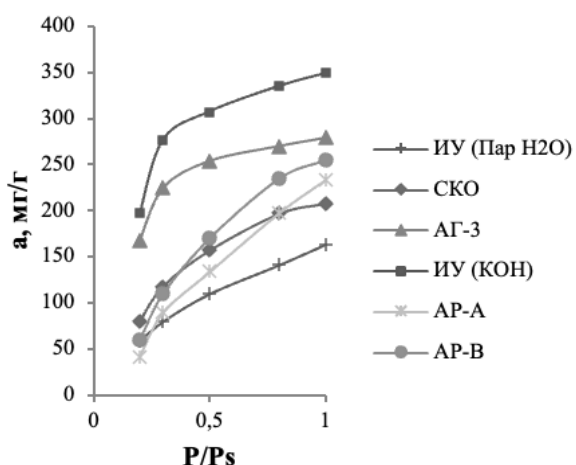


Рисунок 18 – Равновесие поглощения паров н-бутанола из их ПВС различными активными углями

Экспериментальные кривые рисунка 18 свидетельствуют, что изотерма адсорбции паров н-бутанола активными углями химической активации с КОН (1:1) ископаемого угля месторождения Калейва существенно превалируют над иными, включая таковые для российских коммерческих углей марок АГ-3, АР-А и АР-В.

В работе представлены уравнения, формально описывающие кинетику изученных процессов поглощения паров н-бутанола из их ПВС и адсорбционное равновесие для исследованных систем адсорбат-адсорбент.

В теплоэнергетике, водоподготовке и для ряда иных целей очистки воды (в том числе питьевой) особенно остро стоит вопрос удаления растворенных нефтепродуктов, типичным представителем которых является этилбензол. Глубокое его удаление из воды является важной задачей. Исследованиями, выполненными автором в содружестве с сотрудниками лаборатории активных углей, эластичных сорбентов и катализаторов АО «ЭНПО «Неорганика» (г. Электросталь), выявлено, что ряд активных углей паровой

активации, полученных из ископаемого угля месторождения Калейва, обладает способностью поглощения этилбензола из воды в 50-60 мг/г, превосходящей лучшую из опубликованных в доступных источниках информации - 20 мг/г. Это обстоятельство послужило основанием для подачи в ФИПС заявки на предполагаемое изобретение, по результатам рассмотрения которой получен патент РФ.

Среди активных углей, полученных химической активацией с КОН ископаемого угля месторождения Тиджит, по существу случайно выявлен образец с неординарной величиной поглощения из воды фенола, являющегося трудно извлекаемым загрязняющим веществом, как природных, так и сточных вод. В этой связи вопросам получения подобных активных углей уделено особое внимание. Результатами выполненных исследований уточнены условия получения на базе указанного сырья активных углей, использование которых обеспечивает возможность достижения остаточных содержаний фенола в воде на уровне 0,0042-0,0055 мг/л, что явилось основой заявки на возможное изобретение, поданной в Роспатент. Результатом ее рассмотрения ФИПС стало получение патента РФ на изобретение.

Как полученные карбонизированные продукты пиролиза использованного ископаемого сырья, так и активные угли паровой и химической активации наряду с отходами их производства (случайные технологические просипы, остатки периодической зачистки оборудования и т.п.), как выявлено соответствующими оценочными испытаниями, являются достаточно активными материалами в отношении фиксации (связывания) плавающих нефтепродуктов, в неодинаковой степени загрязняющих многочисленные и разнообразные производственные стоки и водоемы Мьянмы. Ансамблем систематических исследований данной ориентации, выполненных на примерах использования различных доз полученных углеродных адсорбентов и толщин пленок дизельного топлива, окрашенного красителем «конго красный» для лучшей визуальной фиксации итогов контакта фаз, охарактеризована эффективность их применения на базе экспериментов, характеризуемых данными рисунка 19.

Подобные данные свидетельствуют о факте практически полного завершения процессов фиксации пленки дизельного топлива использованными агентами в пределах 5 мин, хотя дальнейшая длительность взаимодействия несколько меняет вследствие, вероятно, трансформации во времени механизмов адгезионно-адсорбционного взаимодействия и броуновского движения, начальную форму образующихся агломератов, сутками остающихся плавучими. Наряду с этим визуально различимые радужные разводы и малозаметные в ряде случаев мелкие отдельные пятна дизельного

топлива, результирующие контакты фаз указанной длительности, свидетельствуют о не совсем полной фиксации пленочного топлива в исследованных условиях контакта фаз.

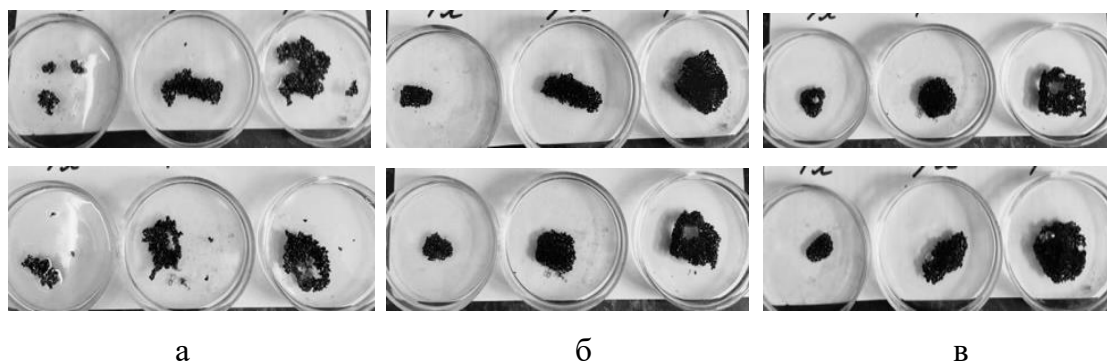


Рисунок 19 – Фотографии, иллюстрирующие кинетику процессов фиксации пленки дизельного топлива толщиной 3,5 мм фракцией зерен 1-2 мм дозой $6,5 \cdot 10^{-2}$ г/см² карбонизированного продукта пиролиза (верхний ряд) ископаемого угля месторождения Калейва и активного угля паровой активации на его основе (нижний ряд) при длительности контакта фаз (мин): 0 (а), 5 (б) и 60 (в)

В работе выявлен ряд особенностей взаимодействий данного типа и проведена оценка эффективности циклического использования (рисунка 20) названных адсорбентов с применением экстракционной регенерации CCl_4 количественно собранных с поверхности воды насыщенных агломератов фиксаторов с последующей отгонкой остатка растворителя в сушильном шкафу при температуре 110 °С.

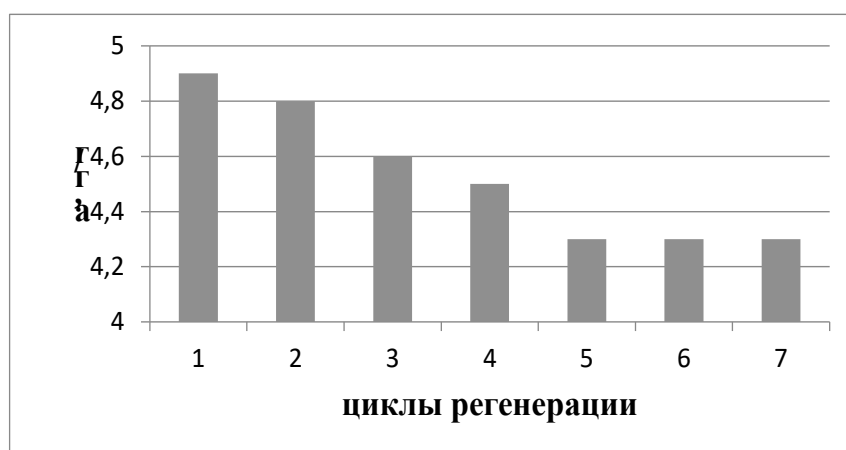


Рисунок 20 – Эффективность циклического использования активного угля паровой активации на базе ископаемого угля месторождения Калейва при контакте с пленкой дизельного топлива толщиной 3,5 мм

Таким образом, полученные на базе использованного ископаемого сырья карбонизаты и активные угли могут служить достаточно эффективными агентами фиксации разливов на поверхности воле нефтепродуктов, позволяющими их цикличное использование и обеспечивающими возврат в материальное производство собранных ими нефтепродуктов.

Глава 5 характеризует предлагаемую технологию и ее ориентировочное технико-экономическое обоснование.

Охарактеризованная выше информация свидетельствует о принципиальной возможности переработки ископаемых углей обоих месторождений на дробленые активные угли достаточно хорошего качества методами парогазовой и химической активации. Однако, лучшие из них получены путем химической активации с КОН. В этой связи именно для них наиболее целесообразна разработка на основе полученных экспериментальных данных принципиальной пооперационной блок-схемы предлагаемой технологии и выполнение ее примерного технико-экономического обоснования.

Предлагаемую пооперационную блок-схему характеризует рисунок 21.

На планируемую переработку принимают угли, доставленные любым способом с пересыпкой в оборотную тару на территории склада 1. Транспортирование заполненных соответствующими материалами контейнеров 2 к отдельным агрегатам и устройствам технологической линии производят с помощью тельферной лебедки, перемещаемой по монорельсу. Доставляемые со склада угли подвергают переработке в молотковой дробилке 3, где измельчают до разноразмерного продукта. Продукт дробления рассеивают на грохоте 5 с выделением целевой фракции 3-5 мм, направляемой в контейнеры 4, возвращая надрешетный материал на доизмельчение и аккумулируя подрешетный продукт (фракцию менее 3 мм) в аналогичные контейнеры, транспортируемые к топке 13 или на склад.

Контейнеры для сбора целевого продукта грохота 5 снабжены специальными внутренними сетчатыми вставками-корзинами, способствующими эффективному выполнению различных технологических операций. Вначале заполненные сырьем контейнеры доставляют на импрегнирование, где сырье в сетчатой вставке-корзине, погружают на определенное время в одну из емкостей 6 с раствором гидроксида калия, затем освобождают в емкости 7 от избытка этого раствора обычным произвольным его стеканием (этот раствор КОН возвращают на пропитку, компенсируя недостаток свежим раствором), после чего обезвоживают разбавленными воздухом дымовыми газами в сушилке 8 и подвергают активации без доступа воздуха при $\sim 900^\circ\text{C}$ со скоростью

подъема температуры ~ 10 °С/мин и продолжительностью пребывания в зоне изотермической выдержки 60 мин в трубчатой печи 9. Карбонизацию сырьевой композиции обеспечивают дымовые газы сжигания подрешетного угля и горючих продуктов его термического распада при пиролизе. Тепло отработанных дымовых газов сначала используют в котле-утилизаторе 11 с целью получения пара, частично направляемого на собственные технологические нужды, а затем для подогрева направляемых в топку 13 потоков дутьевого воздуха и неконденсируемых горючих газов пиролиза (некоторую часть дымовых газов передают на сушку импрегнированного угля), после чего дымовые газы дымососами 16 эвакуируют в атмосферу.

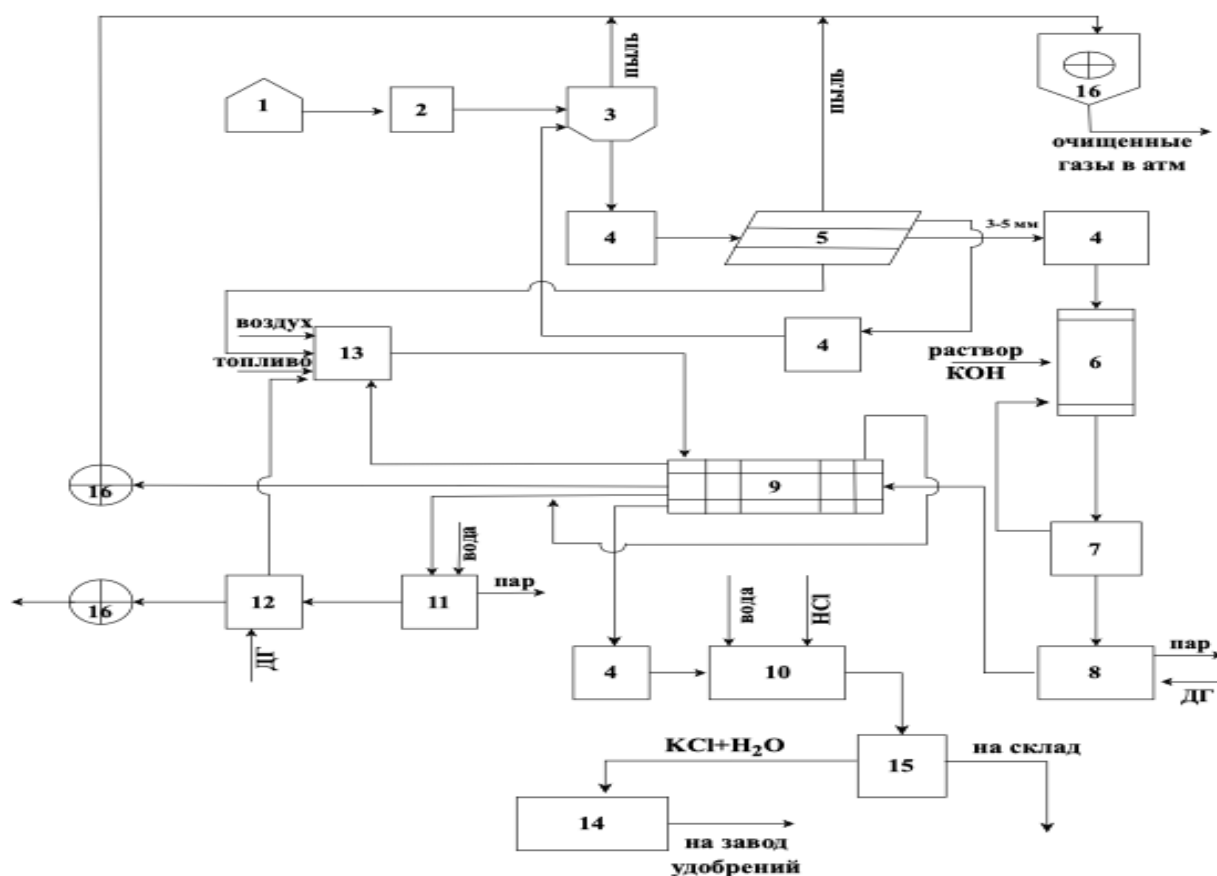


Рисунок 21 – Блок-схема производства активных углей путем химической активации с КОН ископаемого сырья названных месторождений

1 – склад; 2 – герметичный контейнер; 3 – молотковая дробилка; 4 – контейнер; 5 – грохот; 6 – емкость для пропитки; 7 – емкость для отделения избытка пропиточного раствора; 8 – сушилка; 9 – трубчатая печь косвенного нагрева; 10 – емкость для отмывки избытка гидроксид калия; 11 – котел-утилизатор; 12 – подогреватель дутьевого воздуха и неконденсированных газов активации; 13 – топка; 14 – конденсатор; 15 – разделитель фаз; 16 – дымосос

Полученный в печи продукт отдельными порциями аккумулируют в сетчатые вставки-корзины герметичных контейнеров⁴ и после остывания в них отмывают в емкости 10 соляной кислотой и водой для глубокого удаления избытка КОН и сушат в названном агрегате 8 горячим воздухом. Товарные продукты переработки сырья перемещают на склад.

При выполнении ориентировочного технико-экономического обоснования предложенной технологии согласно схемы рис. 21 отмечено, что климат и природные условия страны предопределяют возможность весьма значительной экономии, как капитальных затрат на строительство зданий и сооружений для размещения производства активных углей путем возведения легких конструкций ангарного типа и навесов, так и эксплуатационных расходов, связанных, в частности, с широкой доступностью источников пресной воды.

Приемлемым для Мьянмы является и ряд других условий, заложенных в оценочные расчеты: стоимость 1 т ископаемого угля – 100 \$, 1 т гидроксида калия – 530 \$, 1 кВт-часа электроэнергии – 0,06 \$, размер средней годовой заработной платы – 2523 \$, амортизационные отчисления, близкие 20 % стоимости оборудования.

Общая стоимость оборудования, исходя из указанных выше затрат на его приобретение (72558 \$) должна включать стоимость неучтенного оборудования (15 % от стоимости учтенного), стоимость монтажа оборудования (14 %), трубопроводов (10 %), КИПиА (10 %) и специальных работ (10 %), а также транспортно-заготовительные и складские затраты (8 % от стоимости оборудования, включая неучтенное). В итоге капитальные затраты (Кз) будут составлять 121172 \$.

При средневзвешенной норме амортизационных отчислений в 8,3 % их размер должен составлять $121172 \cdot 0,083 = 10057$ \$. Расходы же на содержание и эксплуатацию оборудования оцениваются в 5991,5 \$.

Согласно осуществленным оценкам калькуляцию себестоимости проектируемого производства 50 т в год активного угля из использованных в работе ископаемых углей характеризуют данные таблицы 15.

Таблица 15 – Некоторые технико-экономические показатели производства 50 т/год активного угля из ИУ

Наименование показателя	Един. Измерения	Норма расхода на 1 т продукта	Всего за год	Цена за единицу, \$.	Общая стоимость, \$.
1	2	3	4	5	6
Сырье	т	3,33(2)	167	100	16700
Гидроксид калия	т	3,33	167	900	150300
Топливо	л	2,14	107	0,23	24,61
Электроэнергия	кВт-ч	3420,4	171010	0,06	10261
Капитальные затраты	\$.				121172
Годовой фонд заработной платы	\$.				50000
Амортизационные отчисления	\$.				10057
Содержание и эксплуатация оборудования	\$.				3603
Себестоимость производства	\$.			3667,77	183389
Приведенные затраты	\$.			1494	
Оптовая цена	\$.			2376	

Таким образом, сведения, представленные в таблице 15, позволяют констатировать, что даже в условиях периодической реализации процесса организация производства из ИУ 50 т в год активного угля может быть экономически целесообразной, учитывая современные цены на мировом рынке на данные адсорбенты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие **выводы:**

1. Выполненными в работе исследованиями решена важная для экономики и экологии Мьянмы научная проблема обоснования целесообразности и эффективности использования ископаемых углей эксплуатируемых отечественных месторождений для производства углеродных адсорбентов путем достижение поставленной в ней цели и решения связанных с ней задач.

2. С привлечением результатов комплекса методов петрографических, термографических и химических анализов оценена перспективность исследований ископаемых углей месторождений Мьянмы Калейва и Тиджит, как потенциально возможного сырья для получения углеродных адсорбентов.

3. Путем систематических исследований выявлено влияние параметров, управляющих процессами пиролиза названного сырья, его химической активации и активации водяным паром целевых продуктов его пиролиза, на выход и структурно-адсорбционные свойства получаемых углеродных адсорбентов.

4. В виде совокупности величин интенсивности нагревания, конечной температуры, длительности изотермической выдержки при ней обрабатываемого материала, а также удельного расхода водяного пара, обеспечивающей рациональное сочетание выхода и структурно-адсорбционных характеристик целевых продуктов, разработаны технологические основы ключевых термических переделов названных ископаемых углей в углеродные адсорбенты.

5. Охарактеризована совокупность технических характеристик полученных углеродных адсорбентов, конденсатов и неконденсирующихся газов, как побочных продуктов ключевых термических операций их производства, относительно которых обсуждены возможные направления использования.

6. Оценена эффективность использования полученных углеродных адсорбентов в решении природоохранных задач (очистка производственных сбросов от растворенных загрязнений органической природы, фиксация пленочных разливов на зеркале воды дизельного топлива и извлечения из воздушных выбросов паров летучих органических растворителей) и смежных им задач, результаты которой свидетельствуют об их конкурентоспособности в сравнении с коммерческими активными углями.

7. Выполнена ориентировочная технико-экономическая оценка реализации в условиях Мьянмы производства дробленых активных углей с использованием в качестве сырья ископаемых углей названных месторождений, результаты которой свидетельствуют о возможности получения качественной продукции пониженной себестоимости.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных

1. **Зо Е Найнг.** Исследование переработки ископаемых углей месторождений «Калейва» и «Тиджит» как сырья для производства активных углей парогазовой активацией / **Зо Е Найнг**, Со Вин Мьинт, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // *Chemical Bulletin*. – 2024. – Т. 7. – № 3. – С. 93-101. (*Chemical Abstracts*)
2. Со Вин Мьинт. Удаление вредных газов из потока воздуха с использованием углеродных сорбентов на основе растительных отходов Республики Союз Мьянма / Со Вин Мьинт, **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, А. А. Курилкин, Д. В. Клушин., Клушин В.Н. // *Chemical Bulletin*. – 2024. – Т. 7. – № 4. – С. 118-130. (*Chemical Abstracts*)
3. **Зо Е Найнг.** Получение активных углей на основе каменного угля месторождения Калейва для очистки производственно-ливневых сточных вод коксохимического производства / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, А. А. Курилкин, В. Н. Клушин // *Черные металлы*. – 2023. – № 8 (1100). – С. 53-56. (*Chemical Abstracts*)
4. **Zaw Ye Naing.** Chemical activation as a prospect for the transformation of fossil coal from the Kalewa deposit into active coals / **Zaw Ye Naing**, A. V. Nistratov, V. N. Klushin // *International Journal of Biology and Chemistry*. – 2021. – V. 14. – № 1. – P. 172-176. (*Scopus*)
5. Saw Win Myint. Inexpensive resources of Myanmar as a source of carbon adsorbents / Saw Win Myint, **Zaw Ye Naing**, Min Thu, Myat Min Thu, V. N. Klushin // *International Journal of Modern Agriculture*. – 2020. – V. 9. – № 3. – P. 342-350. (*Web of Science*)
6. **Зо Е Найнг.** Предпосылки и технологические основы получения активных углей из доступного сырья Мьянмы / **Зо Е Найнг**, Со Вин Мьинт, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // *Химическая промышленность сегодня*. – 2021. – № 6. – С. 32-35. (*Chemical Abstracts*)
7. Saw Win Myint. New carbon base nano absorbents from Myanmar macadamia nutshells, applied for the adsorption of n-butanol from vapor-gas mixture / Saw Win Myint, **Zaw Ye Naing**, A. V. Nistratov, V. N. Klushin // *International Research Journal*. – 2024. – № 12 (150). – P. 1-7. DOI: 10.60797/IRJ.2024.150.4 (*GeoRef*)
8. Saw Win Myint. Myanmar agricultural wastes processing by using the method of pyrolysis to produce new nano sorbents for environmental pollution control / Saw Win Myint, **Zaw Ye Naing**, A. V. Nistratov, V. N. Klushin // *International Research Journal*. – 2025. – № 1 (151). – P. 1-6. – DOI: 10.60797/IRJ.2025.151.62 (*GeoRef*)

9. **Zaw Ye Naing**. Kinetics and balance of adsorption of n-butanol from its vapor-air mixtures by activated carbon from the fossil coal of the Kalewa deposit / **Zaw Ye Naing**, Saw Win 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 (*Scopus*)

10. Saw Win Myint. Activated carbon based on rice husks of Myanmar enterprises as a remover of organic solvent vapors from the air / Saw Win Myint, **Zaw 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 (*Scopus*)

11. Saw Win Myint. Efficiency of Using Granular Activated Carbon Obtained from Tamarind Fruit Processing Waste for the Purification of Multi Components Impurities in Industrial Draining Wastewater / Saw Win Myint, **Zaw Ye Naing**, A. V. Nistratov, V. N. Klushin // Advances in Ecology and Environmental Engineering. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – 2024. – P.217 - 228. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_19 (*Springer*)

12. **Zaw Ye Naing** Chemical Activation as Promising Method of Converting Fossil Coal from the Tigyt Deposit into Activated Carbons / **Zaw Ye Naing**, Saw Win Myint, A. V. Nistratov, A. A. Kurilkin, V. N. Klushin // Advances in Ecology and Environmental Engineering. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – 2024. – P. 469 - 478. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64423-8_41 (*Springer*)

Публикации в сборниках материалов международных и всероссийских конференций

1. **Зо Е Найнг**. Характер деструкции ископаемого угля месторождения Калейва при нагревании / **Зо Е Найнг**, В. Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. – Т. 31. – № 9 (190). – С. 37-38.

2. **Зо Е Найнг**. Оценка перспективности использования ископаемых углей месторождений Калейва и Тейчик в качестве сырья для производства активных углей / **Зо Е Найнг**, В. Н. Клушин // Сборник материалов международной конференции со школами и мастер-классами для молодых ученых «Химическая технология функциональных наноматериалов». – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. – С. 102-104.

3. **Зо Е Найнг**. Особенности термического и термоокислительного распада ископаемого угля месторождения Тейчик // **Зо Е Найнг**, В. Н. Клушин // Успехи в химии

и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017. – Т. 31. – № 9 (190). – С. 34-36.

4. **Зо Е Найнг.** Технические характеристики активных углей – продуктов химической активации ископаемого угля месторождения «Калейва» / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020». – Севастополь, 2020. – С. 202-206.

5. **Зо Е Найнг.** Петрографический анализ ископаемого угля месторождения Калейва как сырья для производства углеродных адсорбентов / **Зо Е Найнг**, С. А. Эпштейн, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021». – Севастополь, 2021. – С. 266-271.

6. **Зо Е Найнг.** Условия термических переделов технологии активных углей на базе ископаемого угля месторождения Тиджит / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2021. – Т. 35. – № 12 (247). – С. 69-72.

7. **Зо Е Найнг.** Отходы переработки в углеродные адсорбенты ископаемого угля месторождения Тиджит как средства фиксации плавающих нефтепродуктов / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Геоэкология: теория и практика: сборник научных трудов по материалам Всероссийской студенческой конференции с международным участием. – Москва, РУДН, 2021. – С. 125-128.

8. **Зо Е Найнг.** Петрографическое исследование ископаемого угля месторождения Тиджит как сырья для получения активных углей / **Зо Е Найнг**, С. А. Эпштейн, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Материалы V Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов». – Иваново, ИГХТУ, 2021. – С. 68-70.

9. Мухин В.М. Каменные угли – основной тип сырья для многотоннажного производства активных углей / В. М. Мухин, **Найнг Зо Е**, В. Н. Клушин // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Тамбов, ТГТУ, 2021. – С. 445-449.

10. **Зо Е Найнг.** Использование отходов получения активного угля из ископаемого угля месторождения Калейва для фиксации плавающих нефтепродуктов / **Зо Е Найнг**, Зин Мое, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2021. – Т. 35. – № 13 (248). – С. 31-33.

11. **Зо Е Найнг.** Химическая активация (NaOH) ископаемого угля месторождения Калейва Республики Мьянмы / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Теория и практика процессов химической технологии (Марушкинские чтения): Материалы VI Международной научной конференции. – Уфа, УГНТУ, 2021. – С. 346–347.

12. **Зо Е Найнг.** Технические характеристики карбонизата ископаемого угля месторождения «Калейва» / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Проблемы и инновационные решения в химической технологии ПИРХТ-2022: материалы всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж, ВГУИТ, 2022. – С. 403-405.

13. **Зо Е Найнг.** Оценка выхода и состава побочных продуктов получения активных углей из ископаемого угля / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Киров, ВятГУ, 2022. – С. 33-37.

14. **Зо Е Найнг.** Изучение кинетики и равновесия адсорбции н-бутанола из его паровоздушных смесей активированным углем на базе ископаемого угля месторождения «Тиджит» / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Новомосковск, 2022. – С. 722-728.

15. **Зо Е Найнг.** Поглощение паров н-бутанола из потока воздуха активным углем на базе ископаемого сырья месторождения Тиджит / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022. – Т. 36. – № 12 (261). – С. 69-71.

16. Со Вин Мьинт. Структурно-адсорбционные показатели углеродных адсорбентов на базе отходов пищевых производств Мьянмы / Со Вин Мьинт, **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2023: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – Севастополь, 2023. – С. 232-236.

17. **Зо Е Найнг.** Оценка перспективности использования карбонизата ископаемого угля месторождения Калейва в качестве сырья для производства активного угля / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Суздаль, 2023. – С. 184-186.

18. **Зо Е Найнг.** Изучение сорбционной способности активного угля из ископаемого угля месторождения Калейва / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Киров, ВятГУ, 2023. – С. 92-95.

19. **Зо Е Найнг.** К оценке перспективности использования ископаемого угля месторождения Тиджит в качестве сырья для производства активного угля / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Современные достижения молодых ученых в биологии, медицине и ветеринарии: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Астрахань, 2023. – С. 24-25.

20. **Зо Е Найнг.** Мелкозернистый активный уголь на основе ископаемого угля месторождения Тиджит как средство фиксации плавающих нефтепродуктов / **Зо Е Найнг**, Со Вин Мьинт, А. В. Нистратов, Д. В. Клушин, В. Н. Клушин // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2023: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. – Севастополь, 2023. – С. 37-42.

21. **Зо Е Найнг.** Показатели выхода и состава побочных продуктов карбонизации ископаемого угля месторождения «Тиджит» / **Зо Е Найнг**, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы Международной научно-практической конференции. – Киров, ВятГУ, 2024. – С. 239-242.

22. **Зо Е Найнг.** Исследование переработки ископаемого угля месторождения Тиджит как сырья для производства активных углей парогазовой активацией / **Зо Е Найнг**, С. А. Эпштейн, А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Успехи в химии и химической технологии. – Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2024. – Т. 38. – № 8 (287). – С. 37-40.

Патенты

1. Патент № 2776530 С1 Российская Федерация, МПК C01B 32/312, B01J 20/20, C02F 1/28. Способ получения дробленого активированного угля из каменноугольного сырья : № 2021130912 : заявл. 22.10.2021 : опубл. 21.01.2022 / В.Н. Клушин, В.М. Мухин, **Е.Н. Зо**, А.В. Нистратов – 5 с.

2. Патент № 2829815 С1 Российская Федерация, МПК C01B 32/312, B01J 20/30. Способ получения активного угля : № 2024104709 : заявл. 26.02.2024 : опубл. 06.11.2024 / Клушин В.Н., **Зо Й.Н.**, В.М. Мухин, Со В.М., Нистратов А.В., Клушин Д.В. – 6 с.