

Статья поступила в редакцию: 10.08.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 66.081.6+661.183

Влияние параметров кислотной активации глинистых сорбентов на эффективность очистки компрессорных масел

Жалилов Шерали Некбоевич

*DSc, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара*

Уринов Олим Исломович

*независимый исследователь, преподаватель
Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои*

Рамазонова Зухро Ёрбоевна

*базовый докторант
Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара*

Султанов Шавкат Абдуллаевич

*д-р хим. наук (DSc), проф.
Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: shavkat.sultonov.85@bk.ru*

Influence of acid activation parameters of clay sorbents on the efficiency of compressor oil cleaning

Jalilov Sherali Nekboyevich

*(DSc) Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara*

Urinov Olim Islamovich

*Independent researcher, Teacher
Navoi State of the university
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Ramazonova Zukhro Yorboevna

*Basic doctoral student
Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara*

Sultanov Shavkat Abdullaevich

*PhD DSc, Professor
Navoi State University
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Библиографическое описание: Влияние параметров кислотной активации глинистых сорбентов на эффективность очистки компрессорных масел // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Жалилов Ш.Н. [и др.]. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23323>

Аннотация

В данной статье исследована технология получения эффективных сорбентов для регенерации и очистки компрессорных масел. В ходе научной работы были испытаны различные условия кислотной модификации глинистых сорбентов. Особое внимание уделено влиянию температуры термической обработки, продолжительности активации и соотношения компонентов при приготовлении сорбента на его адсорбционные свойства.

По результатам экспериментов установлено, что наибольшую адсорбционную активность при очистке компрессорных масел проявил сорбент, полученный из местного глинистого сырья при оптимальных параметрах кислотной и термической активации: активации при температуре 200 °C в течение 1,5 часа и соотношении масс — кислота: вода: глина = 1: 10: 2. Полученный сорбент эффективно удалял механические примеси, продукты окисления и смолистые соединения из состава отработанного компрессорного масла, что способствовало значительному улучшению его физико-химических показателей.

Согласно результатам адсорбционно-изотермического анализа, удельная поверхность кислотно-активированной глины составила 242 мл/г, что в 2 раза выше по сравнению с природной глиной (121 мл/г). При оптимальном соотношении кислота: вода: глина = 1: 10: 2 кинематическая вязкость регенерированного компрессорного масла составила 61 мм²/с, температура вспышки — 244 °C, а устойчивость к окислению — 3090 мин. Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении показателей отработанного масла по сравнению с исходными значениями (27 мм²/с, 196 °C и 800 мин соответственно). Предлагаемая технология применения сорбента позволяет эффективно регенерировать компрессорные масла, повышать экономическую и экологическую эффективность, а также является важным фактором для повторного использования ресурсов и создания малоотходной технологии.

Abstract

This article investigates a technology for producing effective sorbents for the regeneration and purification of compressor oils. During the study, various conditions for the acid modification of clay-based sorbents were tested. Particular attention was paid to the effects of thermal treatment temperature, activation duration, and the component ratio used in sorbent preparation on its adsorption properties.

The experimental results demonstrated that the sorbent obtained from locally sourced clay raw materials under optimal acid and thermal activation conditions exhibited the highest adsorption activity in the purification of compressor oils. The optimal conditions included activation at a temperature of 200 °C for 1.5 hours and a mass ratio of acid: water: clay = 1: 10: 2. The resulting sorbent effectively removed mechanical impurities, oxidation products, and resinous compounds from the composition of used compressor oil, which contributed to a significant improvement in its physicochemical properties.

According to the results of the adsorption–isotherm analysis, the specific surface area of the acid-activated clay was 242 ml/g, which is twice as high as that of the natural clay (121 ml/g). At the optimal acid: water: clay = 1: 10: 2 ratio, the kinematic viscosity of the regenerated compressor oil was 61 mm²/s, the flash point was 244 °C, and the oxidation stability was 3090 min. These

results indicate a significant improvement in the properties of the used oil compared with the initial values of 27 mm²/s, 196 °C, and 800 min, respectively. The proposed technology for applying the sorbent enables the effective regeneration of compressor oils, improves economic and environmental efficiency, and serves as an important factor in resource reuse and the development of low-waste technologies.

Ключевые слова: бентонитовая глина, пористая структура, кислотная активация, адсорбционная способность, регенерация отработанного компрессорного масла, адсорбционная кинетика, компрессорное масло, сорбент, адсорбция, активация, регенерация, кислотная обработка.

Keywords: bentonite clay, porous structure, acid activation, adsorption capacity, regeneration of used compressor oil, adsorption kinetics, compressor oil, sorbent, adsorption, activation, acid treatment, regeneration.

Введение

Компрессорные установки широко применяются на промышленных предприятиях, и их эффективная работа напрямую зависит от качества смазочной системы. Компрессорные масла выполняют функции снижения механического трения, охлаждения устройств и защиты от коррозии. Однако в результате длительного использования в составе масла накапливаются механические примеси, продукты окисления, смолистые вещества и ионы металлов. Это приводит к ухудшению физико-химических свойств масла.

Прямой выброс отработанных компрессорных масел вызывает экологические проблемы. По этой причине разработка технологий их восстановления и регенерации является одной из актуальных научно-практических задач. В настоящее время существуют физические, химические и физико-химические методы очистки масел, среди которых адсорбционный метод выделяется своей высокой эффективностью.

В последние годы было проведено множество научных исследований по регенерации отработанных масел. Исследователями адсорбционный метод признан экономически выгодной и экологически безопасной технологией [6]. Сорбционные свойства природных бентонитов во многих случаях недостаточны для промышленных нужд. Поэтому их активация химическими методами широко применяется. Кислотная активация является одним из наиболее эффективных методов, в процессе которого с помощью серной, соляной или азотной кислот происходит обмен ионами Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ и K⁺ между слоями, некоторые октаэдрические ионы Al³⁺, Fe³⁺ и Mg²⁺ частично переходят в раствор, в результате чего образуются новые микро- и мезопоры. При этом увеличивается площадь поверхности и увеличивается число активных центров типа Бренстеда и Льюиса [10].

Глинистые минералы, содержащие в своем составе алюмосиликаты, обладают высокими ионообменными и адсорбционными свойствами. Сорбенты на основе бентонита и каолина эффективно применяются при очистке нефтепродуктов. В исследованиях установлено, что адсорбционная емкость глины, активированной кислотой, увеличивается в несколько раз по сравнению с обычной глиной [5].

Природные глины, особенно алюмосиликатные минералы, такие как бентонит, монтмориллонит, каолинит и палыгорскит, являются перспективными сорбентами благодаря своей высокой ионообменной способности, слоистой кристаллической структуре, механической устойчивости и широкой распространенности. Основную часть состава бентонита составляет монтмориллонит. Слоистая кристаллическая решетка 2:1 монтмориллонита способна удерживать молекулы воды и обменные катионы, что определяет его сорбционные возможности [9].

В процессе обработки кислотой некоторые ионы металлов, содержащиеся в составе глины, вымываются, в результате чего формируется пористая структура сорбента. Это увеличивает число его активных центров. Активация на основе серной и соляной кислот является наиболее широко применяемым методом [12].

Также термическая обработка сорбента считается одним из важных этапов. С повышением температуры влажность сорбента снижается и активируются его адсорбционные активные центры. Однако чрезмерно высокая температура может привести к разрушению кристаллической структуры сорбента [2]. В исследовании, проведенном Тухтаевым С.А. и Амоновым М.Р., изучены возможности регенерации отработанных компрессорных масел адсорбционным методом. Авторы модифицировали природные минеральные сорбенты Узбекистана, в частности Навбахорский бентонит и сапропелевый минерал Аральского региона, и оценили их эффективность при очистке масел. Согласно результатам исследования, термохимически активированный сапропелевый сорбент продемонстрировал высокую эффективность в восстановлении эксплуатационных свойств масла, обеспечивая значительное снижение кислотного числа и вязкости. Данный подход является перспективным с точки зрения повторного использования отработанных масел и ресурсосбережения. В рассматриваемой статье использование бентонита, в свою очередь, обеспечивает экономический эффект [4]. Проведен сравнительный анализ сорбционных свойств порошка активированного палыгорскита на основе различных методов обработки. Результаты исследований показали, что процесс активации значительно повышает эффективность адсорбции минерала, улучшая его удельную поверхность и пористую структуру [3]. Установлено, что в результате активации бентонита кислотой его кристаллическая структура и пористость значительно изменяются. Согласно результатам исследования, кислотная обработка увеличивает удельную поверхность бентонита, улучшая его адсорбционные свойства [8]. Проанализированы методы химической модификации поверхности бентонита и оценено их влияние на эффективность адсорбции. Результаты показали, что модифицированный бентонит эффективно улавливает ионы тяжелых металлов и органические загрязнители [13]. Изучены адсорбционные свойства модифицированных кислотой глинистых минералов при очистке сточных вод. В исследовании отмечается, что кислотная активация увеличивает количество активных центров минерала, обеспечивая высокую эффективность адсорбции загрязняющих веществ [11]. Авторами изучено влияние стадий подготовки глинистых порошков до их активации на сорбционные свойства. В исследовании обосновано, что такие подготовительные процессы, как уменьшение размера частиц, сушка и разделение на однородную фракцию, повышают эффективность активации и улучшают сорбционную активность адсорбента [1]. В процессе адсорбции сорбенты поглощают вредные вещества из состава масла на свою поверхность. В качестве сорбентов

широко используются природные глинистые минералы, бентонит, каолин, цеолит и другие алюмосиликатные материалы. Для повышения их адсорбционных свойств проводятся работы по активации различными методами. В частности, метод кислотной активации имеет важное значение, так как он увеличивает пористость и площадь поверхности сорбента. Поэтому определение условий и оптимальных технологических параметров кислотной активации глинистых порошков в процессе получения эффективных сорбентов для очистки отработанных компрессорных масел является одной из актуальных проблем на сегодняшний день.

Целью данного исследования является определение оптимальных параметров кислотной и термической активации местного глинистого сырья для очистки компрессорных масел.

Для достижения этой цели были определены следующие задачи: изучение физико-химических свойств образцов местной глины, исследование процесса кислотной активации сорбента, определение влияния температуры и времени на активность сорбента, изучение влияния соотношения *кислота: вода: глина* на процесс адсорбции, оценка эффективности очистки компрессорного масла, определение оптимальных технологических параметров, а также максимально приемлемых параметров кислотной и термической активации местного глинистого сырья для очистки компрессорных масел.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовались отработанные компрессорные масла и образцы местной глины. Бентонитовая глина (содержащая не менее 60–70 % монтмориллонита, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ = от 3,3 до 3,6) первоначально измельчается до размера 0,05–2 мм. Затем готовится суспензия из 20–27 массовых частей сухой глины и 70–75 массовых частей воды. В приготовленную смесь добавляется 4–5 массовых частей серной кислоты (с концентрацией 96–98 %), после чего процесс активации проводится при температуре 190–220 °С, под давлением 2,0–4,0 атм. в течение 1,5–2,0 часов при интенсивном перемешивании, постепенно снижая температуру до 140–160 °С, добавляют 3–5 массовых частей цеолита и продолжают перемешивать в течение 1,5±2,0 часов при 150–200 об/мин. После активации полученная пульпа фильтруется в два этапа: реакционная масса направляется на первый этап фильтрации, промывается и сушится, а значение pH доводится до 1,0–1,4, сушится до достижения влажности 5 %±10 %, осуществляется второй этап фильтрации и промывки, в течение которого значение pH доводится до 3,2–3,6, затем направляется на сушку до влажности 7 %±10 %. Высушенный сорбент 0044К пропускают через сито.

Качественные показатели компрессорного масла оценивались на основе следующих параметров: изменение цвета, содержание механических примесей, плотность, кинематическая вязкость, кислотное число, эффективность сорбции.

Результаты исследования и их анализ

В ходе исследования были изучены адсорбционные свойства сорбентов путем их термической обработки.

В сорбентах, приготовленных при 100 °С, эффективность адсорбции была относительно низкой из-за неполного удаления влаги. При 150 °С наблюдалось повышение активности сорбента, однако его способность поглощать некоторые органические соединения оказалась недостаточной.

На рисунках 1, 2, 3 и в таблице 1 показано, что сорбент, приготовленный при температуре 200 °С, достиг самых высоких результатов. При такой температуре хорошо сформировалась пористая структура сорбента, что обусловлено увеличением количества адсорбционных центров.

В результате смолистые вещества и механические примеси в составе компрессорного масла были эффективно удалены.

При 250 °С в некоторых случаях наблюдалось частичное разрушение структуры сорбента. Это, в свою очередь, привело к снижению эффективности адсорбции.

Таким образом, в качестве оптимальной была выбрана температура 200 °С.

Длительность термической обработки изучалась.

При обработке в течение 0,5 часа полной активации сорбента не наблюдалось. При 1 часе адсорбционные свойства улучшились, однако максимальный результат достигнут не был.

Сорбционная эффективность сорбента, обработанного в течение 1,5 часов, показывает наилучшие результаты по сравнению с кривыми, представленными на рисунке 1 ниже.

За это время внутренняя структура сорбента сформировалась оптимальным образом, и адсорбционные центры перешли в активное состояние.

Обработка в течение 2 часов не дала значительного преимущества и в некоторых случаях привела к увеличению расхода энергии.

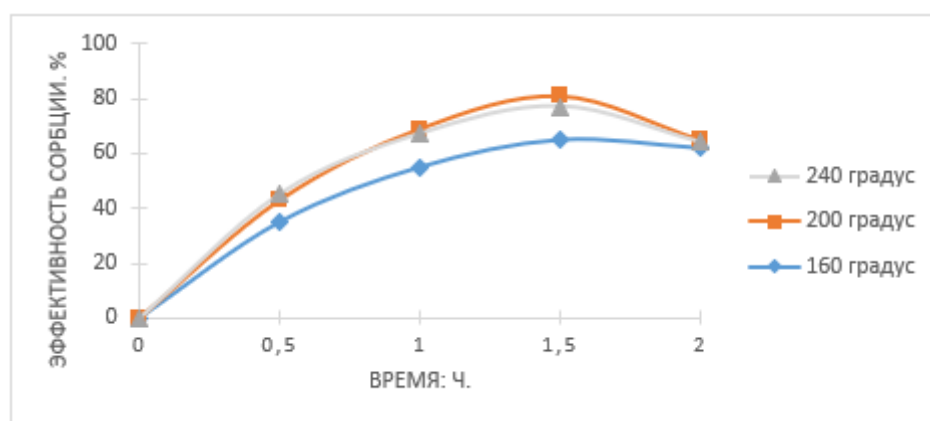


Рисунок 1. Зависимость степени сорбции активированных порошков глины от температуры и времени

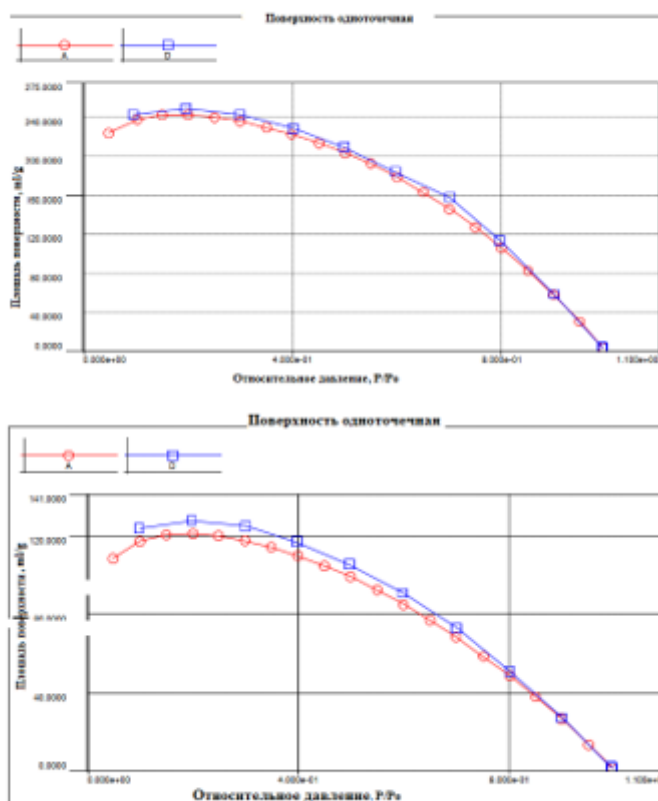
В результате оптимальным временем было признано 1,5 часа.

Влияние соотношения кислота : вода : глина

При соотношении 1:5:2 из-за высокой концентрации кислоты наблюдались некоторые структурные изменения. При соотношении 1:12:2 из-за относительно меньшего количества кислоты активация оказалась недостаточной.

Следовательно, полученное соотношение *кислота: вода: глина* = 1:10:2 было определено как оптимальный состав для процесса активации сорбента. Из компонентов, составляющих добавляемый состав в процессе получения сорбентов видно, что массовые соотношения глины и кислоты друг с другом не изменились, но в результате изменения массового соотношения воды изменилась концентрация кислоты, действующей на активируемую глину.

а)



б)

Рисунок 2. Одноточечная диаграмма BET: а) природная глина, б) активированная глина

Полученный образец можно наблюдать на рисунке 2 ниже с помощью адсорбционно-изотермического анализа сорбционных свойств и поверхности.

Из результатов данного адсорбционно-изотермического анализа видно, что объем поверхности активированного глиняного порошка (242 мл/г) в один раз больше, чем природного глиняного порошка (121 мл/г). Кроме того, результаты ИК-и СЭМ-анализа активированной глины можно наблюдать на рисунке 3 ниже

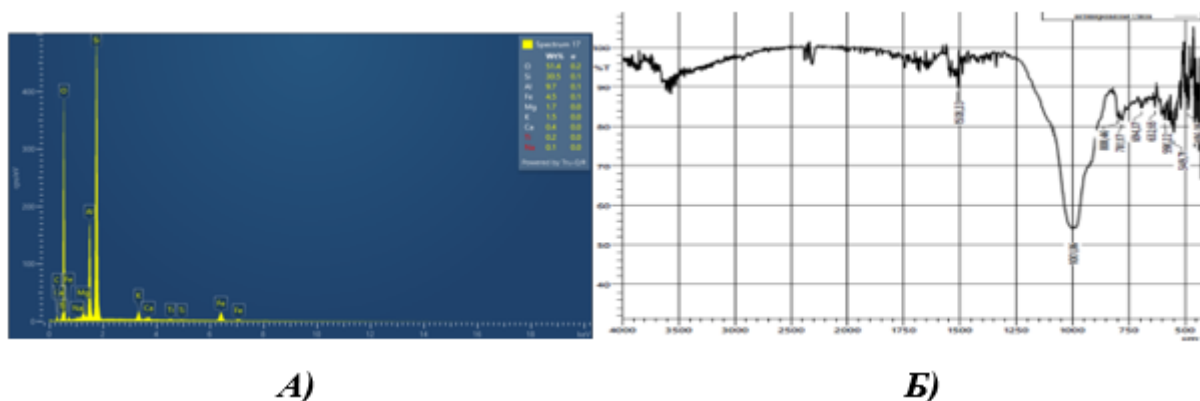


Рисунок 3. ИК и СЭМ анализ активированной глины. А) анализ ИК. Б) СЭМ-анализ

С помощью данных анализов установлено, что в ИК-спектрах сорбента, полученного из бентонитового порошка, присутствуют полосы поглощения при 3830–3610, 1710, 1655, 1543, 1000 и 467 см^{-1} . Данные полосы соответствуют остаточным молекулам кристаллизационной воды в активированной массе, а также изменениям содержания активных металлов и наличию гидроксидов металлов, взаимодействовавших с ионами водорода в кислой среде. Деформационные колебания групп OH^- , H^+ и SO_4^{2-} в области 1655–1543 см^{-1} смещаются в низкочастотную область. Широкая полоса поглощения в диапазоне 1100–1000 см^{-1} может быть отнесена к колебаниям структурных групп $(\text{SiO}_4)^{4-}$ и SiO_2 ; соответствующие полосы также проявляются в области около 800 см^{-1} .

Научная работа Ковальчука и соавторов [10] глубоко раскрыла фундаментальные структурные и сорбционные свойства бентонита, а данное исследование отличается технологической оптимизацией, применением в реальных промышленных условиях, восстановлением качественных показателей масла и обоснованием экономической и экологической эффективности.

Эффективность очистки компрессорных масел

При очистке компрессорного масла с использованием сорбента, полученного в оптимальных условиях, были зафиксированы следующие результаты:

Таблица 1.

Физико-химические свойства компрессорного масла (Shell Corena S3RC 68)

№	Кислота : вода : глина	Кинематическая вязкость (при 40°C)	Температура вспышки	Стабильность против окисле- ния (RPVOT)	Рекомендуемый сервисный интер- вал (винтовой)
	Единица измерения	mm^2/s (cSt)	°C	мин.	часы
1	Показатели по ГОСТ (ТУ)	68	248	700	4000
2	Характеристики отработанного ком- прессорного масла	27	196	420	800
3	1:5:2	50	232	600	3000
4	1:8:2	59	243	670	3070
5	1:10:2	61	244	680	3090
6	1:12:2	59	242	675	3100

Высокая адсорбционная активность сорбента объясняется эффективным удержанием продуктов окисления и смолистых веществ, содержащихся в масле.

Высокая адсорбционная активность сорбента объясняется эффективным удержанием продуктов окисления и смолистых веществ, содержащихся в масле.

Для получения физико-химических параметров применялись следующие приборы:

- для измерения вязкости использовался вискозиметр – Стандарт: ASTM D445, ISO 3104 Cannon Instrument Company, бренд – Labtron LUV-A10.
- прибор для определения температуры вспышки — открытый тигельный датчик температуры вспышки Стандарт: ASTM D92, ASTM D93, бренды: Tanaka APM-8, PAC OptiFlash;
- прибор для определения стойкости к окислению – Аппарат для испытания на стойкость к окислению Стандарт: ASTM D943, ASTM D2272. Бренды: Petrotect RPVOT, Stanhope-Seta Oxidation.

Экономическое и экологическое значение

Внедрение технологии регенерации компрессорных масел обеспечивает ряд экономических и экологических преимуществ.

Во-первых, восстановление отработанных масел снижает затраты на новые масла. Это повышает экономическую эффективность предприятий.

Во-вторых, использование местного глинистого сырья снижает потребность в импортируемых сорбентах.

В-третьих, предотвращается сброс отработанных масел в окружающую среду. В результате снижается загрязнение почвенных и водных ресурсов.

Разработка экологически безопасных технологий является на сегодняшний день одним из приоритетных направлений промышленности.

Заключение

Установлено, что при температуре выше 200°C начинается частичная деградация алюмосиликатной структуры и уменьшается количество активных центров адсорбции.

На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы: наилучший результат наблюдался у сорбента, обработанного при температуре 200 °C в течение 1,5 часов; установлено, что соотношение *кислота:вода:глина* = 1:10:2 является оптимальным составом; полученный сорбент эффективно удалил вредные примеси из компрессорного масла и улучшил показатели качества масла.

Список литературы

1. Султанов, Ш., Холов, Х., Орипова, М. Подготовка к активации глинистых порошков для повышения сорбционных свойств / Ш. Султанов, Х. Холов, М. Орипова // Сообщения НУУз. Серия естественных наук. – 2023. – № 3.

2. Султонов Ш.А., Холов Х.М., Асророва Ф.А. Активация палыгорскитной глинной почвы для отбеливания масел // Образование и наука в XXI веке: междунар. науч.-образовательный электрон. журн. – 2021. – № 20.
3. Султонов Ш.А., Холов Х.М., Сайимова Д.Қ. Сравнительные показатели сорбционных характеристик активированного палыгорскитного порошка // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2023. – № 10. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/16026> (дата обращения: 02.10.2023).
4. Тухтаев С.А., Амонов М.Р. Химическая очистка и повторное использование в производстве отработанных компрессорных масел в нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. [Электронный ресурс]. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23071> (дата обращения: 09.08.2026).
5. Тухтаев С.А., Амонов М.Р., Ахмедов М.М. Очистка компрессорных масел, применяемых в нефтегазовой промышленности, на основе сорбентов. 1-Бухарский государственный университет, 2-Шуртанское нефтегазодобывающее управление // Композиционные материалы: науч. журн. – 2026. – № 2.
6. Тухтаева С.А., Амонова М.Р. Получение эффективных сорбентов на основе природных сапропелевых глинистых порошков и их исследование // Научно-технический журнал «Development of Science» Бухарского государственного технического университета. – 2026. – № 6.
7. Холов Х.М., Собиров Б.Б., Алланазаров Х., Султонов Ш.А. Методика повышения адсорбционных свойств почвы палыгорскитной глины [Электронный ресурс]. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2021. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11315> (дата обращения: 01.08.2026).
8. Abdullah, W. Structural changes in acid-activated bentonite / W. Abdullah // Applied Clay Science. – 2022. – Т. 123. – P. 105–112.
9. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. – 2024. – Т. 25, № 5.
10. Kovalchuk I., Farbun I., Vyshnevskiy O. Acid activation of bentonite: structural transformation and sorption performance for uranium, cesium, and strontium. – No. 3. – 2026. – Vol. 85. – Art. 134.
11. Li, Y. et al. Acid-modified clays for wastewater treatment / Y. Li [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Т. 399. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122832.
12. Osmić S., Odobašić A., Begić S. Selma Osmić, Amra Odobašić, Sabina Begić. The Influence of Acid Activation on Surface Characteristics of Natural Bentonite // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. // International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. – 2024. – Т. 25, № 5.
13. Zhang, J. et al. Surface engineering of bentonite for adsorption / J. Zhang [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Т. 452. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.139247.

References

1. Sultanov Sh., Kholov Kh., Oripova M. [Preparation for the activation of clay powders to enhance sorption properties]. Soobshcheniya NUUz. Seriya estestvennykh nauk, 2023, no. 3/2, Tashkent. (In Russ.)
2. Sulstonov Sh.A., Kholov Kh.M., Asrorova F.A. [Activation of paligorskite clay soil for oil bleaching]. Obrazovanie i nauka v XXI veke: mezhdunarodnyi nauchno-obrazovatelnyi elektronnyi zhurnal, 2021, no. 20, iss. 5, P. 1276–1278. (In Russ.)
3. Sulstonov Sh.A., Kholov Kh.M., Saiimova D.Q. [Comparative indicators of the sorption characteristics of activated paligorskite powder]. Universum: khimiya i biologiya: elektronnyi nauchnyi zhurnal, (112–2). Available at: – 2023. – № 10. – P. 62–67. – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/16026> (дата обращения: 02.10.2023). (In Russ.)
4. Tukhtaev S.A., Amonov M.R. [Chemical treatment and reuse of spent compressor oils in oil and gas industry production]. Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal. Available at: – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23071> (дата обращения: 09.08.2026). (In Russ.)
5. Tukhtaev S.A., Amonov M.R., Akhmedov M.M. [Purification of compressor oils used in the oil and gas industry based on sorbents]. Kompozitsionnye materialy: nauchnyi zhurnal, 2026, no. 2. (In Russ.)
6. Tukhtaeva S.A., Amonova M.R. [Obtaining effective sorbents based on natural sapropel clay powders and their study]. Development of Science: nauchno-tekhnicheskii zhurnal Bukharskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2026, no. 6. (In Russ.)
7. Kholov Kh.M., Sobirov B.B., Allanazarov Kh., Sulstonov Sh.A. [Methodology for enhancing the adsorption properties of paligorskite clay soil]. Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal, 2021, iss. 2 (83). Available at: – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11315> (дата обращения: 01.08.2026). (In Russ.)
8. Abdullah W. Structural changes in acid-activated bentonite. Applied Clay Science, 2022, vol. 123, P. 105–112.
9. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 2024, vol. 25, iss. 5.
10. Kovalchuk I., Farbun I., Vyshnevskiy O. Acid activation of bentonite: structural transformation and sorption performance for uranium, cesium, and strontium, 2026, vol. 85, no. 3, art. 134.
11. Li Y. et al. Acid-modified clays for wastewater treatment // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122832.
12. Osmić S., Odobašić A., Begić S. The influence of acid activation on surface characteristics of natural bentonite. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 2024, vol. 25, iss. 5.
13. Zhang J. et al. Surface engineering of bentonite for adsorption. Chemical Engineering Journal, 2023, vol. 452, P. 139247. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139247.