

МУРЗАХАНОВ Я.А. аспирант БГТУ им. В.Г. Шухова  
Научный руководитель САПРОНОВА Ж.А., д.т.н., доцент,  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)  
г. Белгород

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Природные глины давно известны как эффективные сорбенты в различных областях. Основу их свойств — гидрофильность, сорбционную способность, ионообменные характеристики, прочность, водопроницаемость, пластичность и набухание — обеспечивают глинистые минералы, активные компоненты глин. Средний химический состав минералов определить сложно из-за вариабельности изоморфно замещённых катионов, он уточняется для каждого минерала с помощью химического анализа. Глинистые минералы относятся к слоистым и слоисто-ленточным силикатам и состоят из двух структурных элементов: кремнекислородного тетраэдра, соединяющегося в трёхмерную сеть, и октаэдра с центральным атомом алюминия, железа или магния, окружённым кислородом или гидроксильными группами [1]. Структурная модель кристаллической решетки монтмориллонита приведена на рисунке 1 [2].

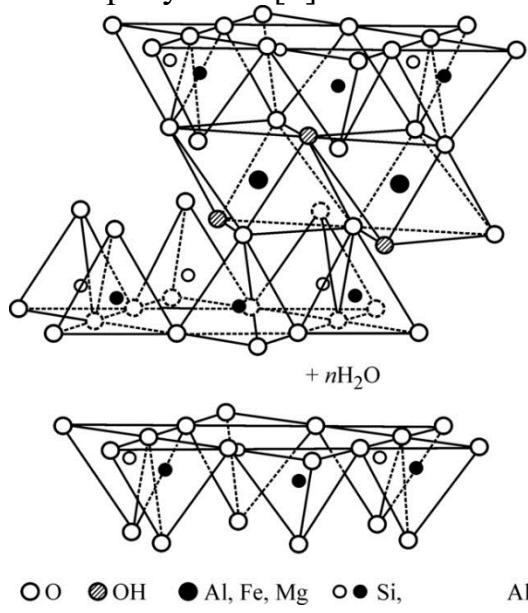


Рисунок 1. Схема кристаллической решетки монтмориллонита

Глинистые минералы привлекают внимание как эффективные адсорбенты благодаря высокой катионообменной способности, большой удельной поверхности и пористости. На адсорбцию загрязнителей влияют pH, температура, дозировка, концентрация вещества и время контакта. Модифицированные или активированные глины показывают более высокую адсорбционную ёмкость, чем необработанные [3].

Широкое применение глин приводит к образованию значительного количества отходов, требующих утилизации. Так, одним из этапов очистки пищевых масел является отбеливание, при котором образуется отработанная отбельная глина. Традиционные методы утилизации включают захоронение, сжигание и компостирование. В работе [4] предложена схема реактивации пищевой отбельной глины: экстракция остаточного масла н-гексаном, термическая активация при  $600^{\circ}\text{C}$  в течение 60 мин, кислотная обработка 10%  $\text{HCl}$  с пропиткой  $\text{BaCl}_2$  5%. Удельная поверхность восстановленных образцов достигала 150–160  $\text{m}^2/\text{г}$ .

Термически обработанная отбельная глина была отмечена как перспективный сорбент для удаления красителей из сточных вод с наибольшей эффективностью при прокаливании при температуре  $300$ – $350^{\circ}\text{C}$  [5]. Аналогично, глинистый отход от очистки пальмового масла был успешно регенерирован прокаливанием при  $500$ – $700^{\circ}\text{C}$  и кислотной активацией с  $\text{CaCO}_3$ , при этом его адсорбционная способность оказалась сопоставима с исходной [6].

Физико-химические и сорбционные свойства глинистого отхода показали мезопористую структуру и удельную поверхность 185,53  $\text{m}^2/\text{г}$ . При дозировке 1,5 г/дм<sup>3</sup> отработанная прокаленная глина удаляет до 96,7% ионов  $\text{Cu}^{2+}$  (10 мг/дм<sup>3</sup>), максимальная сорбционная ёмкость прокалённой при  $350^{\circ}\text{C}$  глины — 0,41 ммоль/г. Она может применяться также как пигментный наполнитель в лакокрасочной промышленности [7].

Была разработана методика [8] синтеза минерально-углеродных сорбентов на основе техногенных отходов: в качестве наполнителя использован пиролизный остаток автомобильных покрышек, а связующим компонентом служат глинистые грунты, полученные при котлованных работах. Процесс включает измельчение, смещивание, экструзию и термообработку в инертной атмосфере. Показано, что состав сорбента существенно влияет на его механическую прочность, пористость и адсорбционные характеристики. Введение 10–25% бентонита заметно усиливает прочность гранул (более чем на 80%) и способствует формированию развитой мезопористой структуры с размерами пор 1–4 нм.

Создан сорбент на основе термически регенерированных отходов бентонитовой глины для удаления метиленового синего из водных растворов. Исследования методом периодической адсорбции показали, что процесс является эндо-термическим, необратимым, спонтанным и благоприятным. Модель Фрейндлиха лучше согласуется с экспериментальными данными, чем модель Ленгмюра, при этом максимальная адсорбционная ёмкость составила 34,77 мг/г [9].

Композитный материал, включающий активированный уголь и глину, был получен из отработанной отбельной глины производства оливкового масла через карбонизацию с последующей активацией  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Максимальная адсорбционная ёмкость монослоя достигала 104,83 и 178,64 мг/г для красителей кислотного синего 29 и метиленового голубого соответственно при  $30^{\circ}\text{C}$  [10].

Помимо использования непосредственно глинистых отходов, многие исследователи комбинируют природную глину с другими отходами для получения различных сорбционных материалов.

Кроме глинистых отходов пищевых производств, в мире образуется большое количество глин, загрязненных нефтепродуктами.

По данным компании Kline [11], ежегодное мировое потребление смазочных масел достигает примерно 40 млн тонн. При этом около 13 млн тонн составляют отработанные масла, из которых около 60% подвергаются сжиганию и лишь около 2,5 млн тонн используются для регенерации. В процессе эксплуатации смазочные масла накапливают загрязнения, окисленные соединения и примеси, что снижает их эксплуатационные свойства и требует замены. Для экономии ресурсов отработанные масла собираются и направляются на регенерацию, однако в странах бывшего СССР перерабатывается лишь около 15% из 1,7 млн тонн, собираемых ежегодно. Низкий уровень утилизации обусловлен техническими, экономическими и инфраструктурными ограничениями: совместная переработка с нефтью затруднена из-за присадок, повреждающих оборудование. Для очистки масел применяются природные сорбенты (глины, цеолиты, бокситы) и синтетические материалы (силикагель, алюмосиликаты) [12]. При этом на каждую тонну очищенного масла приходится 80–140 кг отработанного сорбента, который является токсичным и склонным к самовозгоранию [13].

Основные пути обращения с отработанными нефtesорбентами включают захоронение, деструктивную обработку и регенерацию [14].

Физико-химическая регенерация сорбентов осуществляется с использованием жидких или газообразных реагентов, при этом чаще всего применяются органические растворители, такие как четыреххлористый углерод. Такой подход приводит к образованию значительных объёмов жидких отходов, требующих последующей утилизации. Показано, что простая промывка горячей водой или продувка смесью воздуха и водяных паров обеспечивает лишь частичное восстановление сорбента. Однако высокая термоустойчивость минералов позволяет применять термическую обработку, эффективно удаляющую адсорбированные вещества [15].

Современные исследования всё чаще рассматривают методы регенерации с использованием излучения, в частности электромагнитного в сверхвысокочастотном диапазоне. Под воздействием такого излучения происходит разрушение сорбата, а в малых дозах инициируется окисление органических соединений кислородом. Этот подход исключает необходимость применения сложных устройств для поддержания давления и температурных режимов, предотвращает нагрев сорбента и способствует сохранению его структурных свойств, что продлевает срок службы материала. Тем не менее, высокие энергозатраты и необходимость специализированного оборудования остаются ограничивающими факторами [16].

Проблема регенерации отработанных сорбентов остаётся актуальной из-за её сложности, трудоемкости и высокой стоимости, что стимулирует поиск альтернативных методов обработки. Одним из перспективных направлений является использование химических и биохимических преобразований для превращения отходов в новые функциональные материалы. Также изучаются методы комбинированной регенерации, сочетающие термическую и сорбционно-химическую обработку, позволяющие повысить эффективность восстановления. Интерес представляют и подходы с механохимическим воздействием. Все эти

направления открывают перспективы для создания более устойчивых и экономически оправданных технологий обращения с отходами.

Список литературы:

1. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
2. Golubeva O.Yu., Korytkova E.N., Gusarov V.V. Hydrothermal synthesis of magnesium silicate montmorillonite for polymer-clay nanocomposites // Russian Journal of Applied Chemistry. 2005. V. 78, № 1. P. 26–32.
3. Lamrani M., et al. Clay minerals for effective dye and heavy metal removal // J. Water Environ. Nanotechnol. 2025. V. 10, № 1. P. 85–107.
4. Handoko O.T., Hasanudin U., Suroso E., et al. Economic and environmental analysis of spent bleaching earth reactivation // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2024. V. 1308. 012061. 11 p.
5. Сапронова Ж.А., Свергузова С.В., Гафаров Р.Р., Лупандина Н.С. Пути декарбонизации производства с использованием отхода отбеленной глины // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 51–60.
6. Kurniawan E.S., Saputro E., Siswanti P., Nugroho D.W., et al. Reactivating adsorption capacities of spent bleaching earth for using in crude palm oil industry // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. V. 924. 012014. 8 p.
7. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Гафаров Р.Р., Сапронова Ж.А. Рациональное использование отхода маслоэкстракционного производства — отработанной отбеленной глины // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 7. С. 14–19.
8. Самонин В.В., Подвязников М.Л., Спиридонова Е.А., Хрылова Е.Д., Хохлачев С.П., Гарабаджиу А.В. Получение композиционных сорбционно-активных материалов состава «технический углерод — глинистый материал» из техногенных отходов // Российский химический журнал. 2022. № 3. С. 61–69.
9. Shubber M.D.H., Yousefi Kebria D. Recycling the wasted bentonite clay as a low-cost and novel adsorbent for the removal of the methylene blue dye in the aqueous solution // Advances in Environmental Technology. 2024. V. 10, № 1. P. 70–84.
10. Marrakchi F., Bouaziz M., Hameed B.H. Activated carbon–clay composite as an effective adsorbent from the spent bleaching sorbent of olive pomace oil: process optimization and adsorption of acid blue 29 and methylene blue // Chem. Eng. Res. Des. 2017. V. 128. P. 221–230.
11. The role of EPR in the used oil value chain. Kline Group. URL: [<https://klinegroup.com/energy/the-role-of-epr-in-the-used-oil-value-chain>](<https://klinegroup.com/energy/the-role-of-epr-in-the-used-oil-value-chain>) (дата обращения: 10.06.2025).
12. Технологии регенерации отработанных масел [Электронный ресурс]. 2025. URL: [<https://www.tqm.by/index.php/tekhpodderzhka/kontrol-parametrov-smazochnykh-materialov/blog/183-tehnologii-regeneratsii-otrabotannykh-masel>](<https://www.tqm.by/index.php/tekhpodderzhka/kontrol-parametrov-smazochnykh-materialov/blog/183-tehnologii-regeneratsii-otrabotannykh-masel>) (дата обращения: 10.06.2025).

13. Sabour M.R., Shahi M. Spent bleaching earth recovery of used motor-oil refinery // Civil Eng. J. 2018. V. 4, № 3. P. 572–584.
14. Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Юдаков А.А., Перфильев А.В. Неорганические сорбенты для очистки воды от нефтепродуктов на основе минерального и техногенного сырья: получение, применение, регенерация // Сорбционные процессы и материалы. Вестник ДВО РАН. 2024. № 6. С. 104–126.
15. Плнасюгин А.С., Сильванович И.А., Михалап Д.П., Немененок Д.Б. Система очистки вод машиностроительного комплекса от нефтепродуктов // Литье и металлургия. 2005. № 2 (34). С. 179–181.
16. Лоскутова Е.П., Гусаров И.А., Ушакова Е.С. Регенерация углеродных нефте-сорбентов // VI Всеросс. конф. «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». 2022, 29–30 ноября. С. 1–4.