

Научная статья  
УДК 544.723.21  
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-29-35>  
EDN MWSOOP

## Глина как часто используемый материал в качестве адсорбента в нефтяной промышленности

*В. В. Давидюк, Н. А. Агапонова, С. Ю. Болгов, Н. Н. Обуховская<sup>✉</sup>, Д. В. Путилин*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, [Obuhovskaya.nat@mail.ru](mailto:Obuhovskaya.nat@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Аннотация.** Процедуры дистилляции или разделения нефтяного сырья на фракции служат начальной стадией при его обработке. В основном вырабатываемые материалы трансформируются впоследствии в более ценные субстанции посредством варьирования их параметров за счет конверсионных операций, например риформинга или крекинга. С целью выработки конечных материалов реализуются операции гидроочистки, экстракции, адсорбции и подслащивания. Глины как доступный и дешевый минерал применяют в качестве эффективных сорбентов по причине специфики их физико-химических параметров. Они широко используются в индустрии переработки нефтяного сырья, в частности, при осуществлении операций сепарирования и адсорбции. Очистка от ряда составляющих, например, от тяжелых металлов, серы и красящих веществ, а также извлечение определенных классов углеводородов из нефтяного сырья и его фракций, проводят используя глину как адсорбент. В статье обобщены способы реализации глины как адсорбента в ряде операций при переработке нефтяного сырья, в частности, при деасфальтизации и десульфурации. Сделаны выводы о том, что эффективность адсорбции глиной повышается для нефтяного сырья и его фракций путем использования ряда ее модификаций, например посредством кислотной и термоактивации, а также пропитки металлами. Кроме того, предварительная адсорбционная обработка влияет на снижение коррозионной активности и ее интенсивности. Отмечено, что обработка глины посредством перколяции служит перспективным способом фракционной обработки нефтяного сырья в колонном аппарате с крупнозернистой глиняной насадкой, причем активность глины падает при извлечении премиксов из нефти. Обработка глиной перколяцией широко использовалась, например, для производства смазочных масел. Чтобы восстановить активность глины, периодически необходимо ее извлекать из башни и обжигать в контролируемых условиях, чтобы исключить спекание.

**Ключевые слова:** индустрия нефтепереработки, глина, адсорбция, деасфальтизация, десульфурация, коррозионная активность, ингибиторы коррозии

**Для цитирования:** Давидюк В. В., Агапонова Н. А., Болгов С. Ю., Обуховская Н. Н., Путилин Д. В. Глина как часто используемый материал в качестве адсорбента в нефтяной промышленности // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2024. № 4. С. 29–35. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-29-35>. EDN MWSOOP.

Original article

## Clay as a commonly used adsorbent in the petroleum industry

*V. V. Davidiuk, N. A. Agaponova, S. Yu. Bolgov, N. N. Obukhovskaya<sup>✉</sup>, D. V. Putilin*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, [Obuhovskaya.nat@mail.ru](mailto:Obuhovskaya.nat@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Abstract.** The distillation or separation procedures of crude oil into fractions serve as the initial stage in its processing. Basically, the materials produced are subsequently transformed into more valuable substances by varying their parameters through conversion operations, for example, reforming or cracking. In order to produce the final materials, hydrotreating, extraction, adsorption and sweetening operations are carried out. Clays, as an affordable and cheap mineral, are used as effective sorbents due to the specificity of their physico-chemical parameters. They are widely used in the oil refining industry, in particular, in the implementation of separation and adsorption operations. Purification from a number of components, for example, from heavy metals, sulfur and coloring substances, as well as the extraction of certain classes of hydrocarbons from petroleum raw materials and its fractions, is carried out using clay as an adsorbent. The article summarizes the methods of clay realization as an adsorbent in a number of operations

during the processing of petroleum raw materials, in particular, during deasphaltation and desulfurization. It is concluded that the efficiency of clay adsorption increases for petroleum raw materials and its fractions by using a number of its modifications, for example, through acid and thermal activation, as well as metal impregnation. In addition, pre-adsorption treatment affects the reduction of corrosion activity and its intensity. It is noted that clay processing by percolation serves as a promising method of fractional processing of petroleum raw materials in a column apparatus with a coarse-grained clay nozzle, and the activity of clay decreases when premixes are extracted from oil. Clay percolation treatment has been widely used, for example, for the production of lubricating oils. To restore the activity of the clay, it is periodically necessary to remove it from the tower and burn it under controlled conditions to eliminate sintering.

**Keywords:** oil refining industry, clay, adsorption, deasphaltation, desulfurization, corrosion activity, corrosion inhibitors

**For citation:** Davidiuk V. V., Agaponova N. A., Bolgov S. Yu., Obukhovskaya N. N., Putilin D. V. Clay as a commonly used adsorbent in the petroleum industry. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2024;4:29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-4-29-35>. EDN MWSOOP.

### Введение

Процедуры дистилляции или разделения нефтяного сырья (НС) на фракции служат начальной стадией при его обработке, в частности фракционировании и классификации углеводородных классов. В основном вырабатываемые материалы трансформируются впоследствии в более ценные субстанции посредством варьирования их параметров за счет конверсионных операций, например риформинга или крекинга. С целью выработки конечных материалов реализуются операции гидроочистки, экстракции, адсорбции и подслащивания [1, 2].

Глины как доступный и дешевый минерал применяют в качестве эффективных сорбентов по причине специфики их физико-химических параметров [3, 4], особенно в индустрии переработки НС [5]. Их реализуют как активные составляющие, связующие субстанции, адсорбенты, ионообменники и катализаторы [3, 5]. Известен ряд типов глины, например аттапульгит, бентонит, каолин, сепиолит и гекторит [6].

Адсорбция как несложная энергосберегающая и эффективная операция при разделении составляющих широко применяется в промышленности по ряду причин. Она проводится в атмосферных условиях при исключении применения дорогих и дефицитных материалов [7]. Ее реализуют для очистки НС и его фракций [6, 8], а также при его переработке и доводке посредством деасфальтизации, обессеривания, отбеливания и т. д. [6].

Обработка глины посредством перколяции служит перспективным способом фракционной обработки НС в колонном аппарате с крупнозернистой глиняной насадкой, причем активность глины падает при извлечении премиксов из НС. Обработка глиной перколяцией широко использовалась, например для производства смазочных масел. Чтобы восстановить активность глины, периодически необходимо ее извлекать из башни и обжигать в контролируемых условиях, чтобы исключить спекание [6, 9].

Известен ряд разновидностей глины, пригодной для адсорбционного очищения, для фракций нефти. Так, аттапульгитовый подвид реализуют для разде-

ления НС на ароматические насыщенные комплексы и смолы посредством хроматографической колонки насадочного типа. Бентонитовый подвид по причине слоистой структурной организации и большой площади контакта ( $\sim 800 \text{ м}^2/\text{г}$ ) имеет хорошую адсорбционную способность и реализуется преимущественно как сорбент. Ряд разновидностей данного подвида может полностью поглощать водную среду и масло на 80 %. Одной из разновидностей бентонита служит сепиолит, площадь которого меньше по отношению к бентониту ( $\sim 300 \text{ м}^2/\text{г}$ ) из-за значительной пористости. Его реализуют в красящих веществах, косметических и отбеливающих субстанциях, фильтрующих перегородках и промышленных абсорбентах [6, 10, 11]. Известно, что сепиолит может поглощать масло [12, 13]. Конечная стадия обработки глиной традиционно реализуется при обработке воска и смазочных масел. Глина имеет способность удалять следы асфальтовых материалов и иных комплексов, обуславливающих негативные цветовую гамму и аромат масла и воска. Иногда крекированную нефть обрабатывают при контакте с глиной для исключения формирования смол в бензине посредством извлечения диолефинов [6, 14].

*Цель статьи* – обобщение способов реализации глины как адсорбента в ряде операций при переработке НС, в частности при деасфальтизации и десульфурации.

### Удаление асфальтенов и тяжелых металлов

Асфальтены являются составляющей НС и растворяются в ароматических средах, например в толуоле, но не растворяются в алканах, например в гептане или пентане. Данные вещества осаждают посредством варьирования температурных условий и давления, интенсивности сдвига и состава. При транспортировке, хранении и переработке НС и нефтепродуктов данные субстанции приводят к засорению продуктопроводов, насосных станций, клапанных элементов, а также к загрязнению внешней среды. Это обуславливает дополнительные эксплуатационные и капитальные вложения [15, 16]. Адсорбция широко используется при извлечении асфальтенов или смоляных соединений из запасов

смазочных масел с использованием активированного кислотой бентонита, фуллеровой земли и бокситов [6, 17]. Асфальтены могут адсорбироваться на различных глинах, в т. ч. и модифицированных, таких как каолин, иллит и бентонит и др. [4, 6]. Кроме того, для разделения смол можно использовать различные поверхностно-активные материалы, такие как аттапульгусная глина, фуллеровы земли, диоксид кремния или глинозем из мальтенов, путем адсорбции с помощью препаративной жидкостной хроматографии и десорбции ароматическими/полярными растворителями [15, 16].

Проведен анализ поглощательной способности комплекса синтезированных наночастиц NiO по отношению к асфальтенам и мезо- и макропористого каолина при каталитической паровой газификации. Полученные данные свидетельствуют о том, что адсорбенты обусловили более эффективную адсорбцию вследствие роста разброса пустот по размерам с 200 до 800 Å и обладают малой поверхностной основностью. К тому же пропитывание наночастиц ниобия каолином, кроме повышения эффективности адсорбции асфальтенов, интенсифицирует газификацию адсорбированных асфальтенов, что приводит к формированию основных материалов – CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> [4, 6]. К. Р. Дин и Дж. Л. Макати-младший [18] пришли к выводу, что адсорбция асфальтенов на двух различных глинистых минералах обусловлена их поверхностными параметрами и практически не зависит от температурных условий. Однако есть сведения о том, что адсорбция асфальтенов на минералах снижается с температурным ростом при агрегации и самоассоциации [6]. В работе [19] проведен анализ адсорбирования асфальтенов для пяти видов НС на неорганических частицах (каолин, CaCO<sub>3</sub>, BaSO<sub>4</sub>, FeS, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>). Полученные данные свидетельствуют о том, что в таком варианте степень адсорбции не изменяется после 12 часов взаимодействия. К тому же адсорбция в основном обусловлена видом адсорбента, в отличие от природы источника асфальтенов. Уровень адсорбции растет при росте в асфальтенах доли гетероатомов [4, 6].

В частности, каолинит причисляют к активным адсорбентам по причине наличия полярных площадок на краях изломов и открытых плоскостей с гидроксильными концами в его структурной организации. В публикации [20] приведен способ растворения в толуоле с целью адсорбции на каолините фракций смолы и асфальтенов, извлеченных из четырех вариантов источников. Эти данные являются подтверждением того, что поведение адсорбента в толуоле обусловлено наноагрегацией частиц асфальтенов, а взаимное влияние смола-смола слабее при агрегации частиц адсорбента.

Есть информация об извлечении асфальтенов до каталитической конверсии с применением экстракции, гидротирования и адсорбции. До гидро-

крекинга и гидрообессеривания в промышленных условиях предварительная адсорбция определяет снижение или исключение отравления катализатора по причине дезактивации для снижения вероятности формирования кокса и отведения металлических примесей [6, 21].

#### **Обессеривание посредством десульфурации**

Обессеривание фракций НС проводят с целью выработки экологически безопасных топливных материалов. Серосодержащие комплексы во фракциях НС при сжигании обуславливают загрязнение внешней среды, кислотные дожди, необходимость катализаторов для минимизации токсичных выбросов и коррозионного воздействия на детали двигателей. Операция адсорбции существенно влияет на формирование фракций НС и его десульфурацию. Выборочная адсорбция серосодержащих комплексов в НС и его фракциях, например в дизельном топливе (ДТ) и керосине, может обеспечиваться посредством ряда глин как адсорбентов, включая каолинит, монтмориллонит, палыгорскит, а также вермикулит [22, 23].

С целью десульфурации ДТ для обессеривания используют ряд дешевых адсорбентов, в частности бентонит. Наибольший удельный выход каолинита равнялся примерно 60, 64, 76 % при 6-часовом взаимодействии НС, ДТ и керосина [6, 24].

В работе [6] приведено сравнение эффективности операции десульфурации ДТ посредством адсорбции сквозь натриевый цеолит, местную глину и активированный уголь. Десульфурация активированным углем составляет около 20 %, что более эффективно, чем при использовании цеолита и глины.

Л. В. Байя и др. [25] изучили кинетические и изотермические характеристики адсорбции различных промышленных глин, таких как аттапульгитовая и бентонитовая, с целью обессеривания и отведения азота из ДТ. Максимум адсорбционной активности при обессеривании и отведении азота наблюдался при реализации бентонита, по всей видимости, по причине наличия кислотных центров Бренстеда. При этом аттапульгитовая глина была более выборочной при отведении азотных комплексов.

В работе [26] приведено заключение о том, что оксид кальция и глина не эффективны для обессеривания масел, формирующихся при пиролизе изношенных шин.

В ряде публикаций соотносят способность подвидов глин к обессериванию с их модификациями [6, 27, 28]. Монтмориллонитовая глина (ММТ) доступна на рынке адсорбентов и может быть эффективно использована для обессеривания. Модификация ММТ, а именно пропитка глины металлами, повышает ее адсорбционные характеристики [6]. Обессеривание путем адсорбции технического керосина и ДТ осуществлялось с помощью кислотно-

модифицированной глины ММТ, пропитанной различными металлами. Среди металлов, после влажной импрегнации посредством ММТ, наблюдали Fe, Cr, Ni, Co, Mn, Pb, Zn и Ag. При этом максимум уровня десульфурации, судя по объемной доле керосина и ДТ, были соответственно 76 и 77 % при абсорбции посредством Zn-ММТ. В случае пропитывания Zn наблюдается рост и улучшение площади и морфологии поверхности ММТ, повышение дисперсности и объема пустот [29].

Была изучена десульфурация посредством адсорбции из модельного масла меркаптанов, реализуя бентонит, пропитанный  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+1}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$  и  $\text{MnO}_4^{-1}$ . В работах [6, 29] приходят к заключению о максимуме эффективности бентонитовой десульфурации при пропитке  $\text{Fe}^{+3}$  и  $\text{MnO}_4^{-1}$ , что обусловлено окислением меркаптанов. Пропитанный магнетитом бентонит обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками и самой высокой производительностью в обессеривание топлива. Это может быть сделано в зависимости от каталитической способности магнетита для комплексной конверсии или деструкции серосодержащих комплексов. При этом восстановление магнетита успешно реализуется посредством магнитной сепарации. Присутствует информация о падении доли серы в модельном масле как жидком топливном материале углеводородного типа, посредством адсорбции для отведения пропилмеркаптана и диметилсульфида, посредством пропитки Cu (II) бентонита. Приведенные данные приводят к выводу о том, что максимальная интенсивность адсорбции серы наблюдалась при доле Cu (II) 15 % масс. и рациональной температуре обжига 150 °C [4, 6].

Осуществлены динамическая и статическая оценки поровой емкости и эффективности сорбентов для удаления алкилдибензотиофенов с использованием модифицированного серебром бентонита и необработанного активированного бентонита. Результаты показывают, что ионы серебра, нанесенные на бентонит, лучше поглощают алкилдибензотиофены, чем активированный бентонит. Это может быть связано с тем, что ионы серебра могут вступать в сложные реакции с алкилдибензотиофенами. Кроме того, адсорбционная способность алкилдибензотиофенов постепенно возрастала с увеличением содержания ионов серебра и понижением температуры [30].

Для адсорбции диметилдисульфидного соединения серы из нефтяной фракции были выбраны активированные кислотой каолинит и бентонит, нефтяной кокс и печная цементная пыль, а также древесный уголь. При этом для бентонита эффективность адсорбции серы была повышенной, что, по-видимому, обусловлено его структурной организацией после диссоциации водных молекул между силикатными прослойками по причине си-

ликат-силикатного происхождения при наличии кислотных брэнстедовских центров. К тому же глинистая поверхность при кислотной модификации обладает положительными водородными площадками. По этой причине решетка бентонит-глина деструктурирует зарядное равновесие, что обусловлено ростом числа кислотных центров, селективно взаимодействующих с серными комплексами [31]. К примеру, в [4, 6] реализуется периодическая адсорбция обозначенных комплексов после окисления в ДТ с применением активированной глины при варьированных показателях. Таким образом, данная адсорбция в ДТ приводит к хорошим ее параметрам, т. е. кислотность, доза адсорбента и температурные условия заметно воздействуют на долю сульфонов в дизельном масле при малой продолжительности взаимодействия и интенсивности перемешивания.

Активированный кислотой аттапульгит эффективен при СВЧ-термоактивации и воздействии ультразвука. Его эффективность определялась в процессе десульфурации имитируемого бензина [32]. Полученные данные приводят к выводу о том, что интенсивность отведения тиофена растет при росте объема соляной кислоты в процессе модификации аттапульгита при СВЧ-воздействии.

В работах [6, 33] исследовали воздействия глины и органоглинистых комплексов на теплосодержание адсорбции при взаимном контакте одорантов в топливно-газовой индустрии, что определялось посредством газовой хроматографии. Кроме того, отмечено, что сульфидные отдушки имеют большее теплосодержание по отношению к тиоловым на глиняной и органоглиняной поверхностях. Полученные результаты объясняют, что кислотно-щелочной состав Льюиса значительно отличается по величине энтальпии на глинистых поверхностях между сульфидными и тиоловыми отдушками.

### Заключение

Процедуры дистилляции или разделения нефтяного сырья на фракции служат начальной стадией при его обработке. В основном вырабатываемые материалы трансформируются впоследствии в более ценные субстанции посредством варьирования их параметров за счет конверсионных операций, например риформинга или крекинга. С целью выработки конечных материалов реализуются операции гидроочистки, экстракции, адсорбции и подслащивания.

Глины как доступный и дешевый минерал применяют в качестве эффективных сорбентов по причине специфики их физико-химических параметров. Они широко используются в индустрии переработки нефтяного сырья, в частности при осуществлении операций сепарирования и адсорбции. Очистка от ряда составляющих, например тяжелых металлов, серы и красящих веществ,

а также извлечение определенных классов углеводородов из нефтяного сырья и его фракций, проводят используя глину как адсорбент. Проведенный анализ приводит к выводу о том, что эффективность адсорбции глиной повышается для нефтяного сырья и его фракций путем использования ряда

ее модификаций, например посредством кислотной и термоактивации, а также пропитки металлами. Кроме того, предварительная адсорбционная обработка влияет на снижение коррозионной активности и ее интенсивности.

#### Список источников

1. Kanicky J. R. et al. Surface chemistry in the petroleum industry // Handbook of applied surface and colloid chemistry. 2001. Vol. 1. P. 251–267.
2. Иванова М. А. Разработка системы управления колонных аппаратов нефтепереработки: выпускная квалификационная работа. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2017. 100 с.
3. Карапетян К. Г., Дорош И. В., Коршунов А. Д. Обзор неорганических сорбентов для ликвидации разливов нефти // Юж.-Сиб. науч. вестн. 2023. № 4 (50). С. 77–88.
4. Гайсина Р. К., Башкатова В. С., Осипова Е. А. Перспективное использование глин в качестве сорбентов // Университет. комплекс как регионал. центр образования, науки и культуры. 2021. С. 2687–2690.
5. Абдурахмонов Э. Б., Аслонов А. А. Состояние вопроса комплексной очистки сточных вод, используемых в нефтеперерабатывающей отрасли // Universum: техн. науки. 2023. № 4 (109). С. 5–8.
6. Emam E. A. Clay adsorption perspective on petroleum refining industry // Industrial Engineering. 2018. Vol. 2, N. 1. P. 19–25.
7. Шайхиев И. Г. и др. Химические, физико-химические и биологические методы обезвреживания нефтесодержащих отходов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментал. и приклад. исслед. 2021. С. 187–196.
8. Мустафина Э. А., Полетаева О. Ю., Мовсумзаде Э. М. Тяжелые металлоносные нефти и их демецеллизация // Нефтегазохимия. 2014. № 4. С. 15–18.
9. Бельчинская Л. И. и др. Влияние термического модифицирования на адсорбционные свойства природных силикатов // Сорбц. и хроматограф. процессы. 2006. Т. 6, № 1. С. 80–88.
10. Иванова М. А., Чикина Н. С., Зенитова Л. А. Ликвидация нефтяных загрязнений // Бутлеров. сообщения. 2012. Т. 29, № 3. С. 1–12.
11. Калинин В. Ф. Физико-химические основы и характерные особенности механизма повышения продуктивности скважин методом обработки призабойной зоны пласта органическими растворителями // Недра Поволжья и Прикаспия. 2023. Вып. 110. С. 48–62.
12. Rajaković-Ognjanović V., Aleksić G., Rajaković L. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials // Journal of hazardous materials. 2008. Vol. 154, N. 1-3. С. 558–563.
13. Rajakovic V. et al. Efficiency of oil removal from real wastewater with different sorbent materials // Journal of hazardous materials. 2007. Vol. 143, N. 1-2. С. 494–499.
14. Носков А., Казаков М. Перспективы использования нетрадиционного углеводородного сырья в ТЭК России // Энергет. политика. 2021. № 5 (159). С. 14–25.
15. Akbarzadeh K. et al. Asphaltene – problematic but rich in potential // Oilfield review. 2007. Vol. 19, N. 2. P. 22–43.
16. Abdel-Raouf M. Crude oil emulsions – Composition stability and characterization. InTechOpen, 2012. 240 p.
17. Aziz B. K., Abdullah M. A., Jubrael K. J. Acid activation and bleaching capacity of some clays for decolourizing used oils // Asian Journal of Chemistry. 2009. Vol. 23, N. 6. P. 2449.
18. Dean K. R., McATEE Jr J. L. Asphaltene adsorption on clay // Applied Clay Science. 1986. Vol. 1, N. 4. P. 313–319.
19. Dudášová D. et al. Study of asphaltene adsorption onto different minerals and clays. Part 1. Experimental adsorption with UV depletion detection // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2008. Vol. 317, N. 1-3. P. 1–9.
20. Tsiamis A., Taylor S. E. Adsorption behavior of asphaltene and resins on kaolinite // Energy & Fuels. 2017. Vol. 31, N. 10. P. 10576–10587.
21. Khan A. H., Batool N., Aziz A. Recovery of base oil from used oil through solvent extraction followed by adsorption: a review // Environmental Protection Research. 2023. P. 319–340.
22. Катасонова О. Н., Савонина Е. Ю., Марютина Т. А. Экстракционные методы выделения серы и ее соединений из нефти и нефтепродуктов (обзор) // Журн. приклад. химии. 2021. Т. 94, № 4. С. 411–439.
23. Самойленко Е. А. и др. Удаление сераорганических соединений из нефти // Защита окружающ. среды в нефтегаз. комплексе. 2017. № 1. С. 32–35.
24. Дудник А. А., Скрипник А. С., Хисамова М. Н. Применение ультразвукового воздействия в процессах десульфуризации дизельного топлива // Наука молодых – будущее России. 2020. С. 253–256.
25. Baia L. V. et al. Removal of sulfur and nitrogen compounds from diesel oil by adsorption using clays as adsorbents // Energy & Fuels. 2017. Vol. 31, N. 11. P. 11731–11742.
26. Ahmad S. et al. Oxidative desulfurization of tire pyrolysis oil // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2016. Vol. 22, N. 3. P. 249–254.
27. Tang X., Meng X., Shi L. Desulfurization of model gasoline on modified bentonite // Industrial & engineering chemistry research. 2011. Vol. 50, N. 12. P. 7527–7533.
28. Lee C. W. et al. Centimeter-scale tellurium oxide films for artificial optoelectronic synapses with broadband responsiveness and mechanical Flexibility // ACS nano. 2024. Vol. 18, N. 28. P. 18635–18649.
29. Özkan A., Özkan V. Adsorptive Desulfurization of Crude Oil with Expanded Perlite // Caucasian Journal of Science. 2022. Vol. 9, N. 2. P. 175–183.
30. Emam E. A. Clays as catalysts in petroleum refining industry // ARPN Journal of Science and Technology. 2013. Vol. 3, N. 4. P. 356–375.
31. Mikhail S., Zaki T., Khalil L. Desulfurization by an economically adsorption technique // Applied Catalysis A: General. 2002. Vol. 227, N. 1-2. P. 265–278.

32. Silva V. C. et al. Adsorption behavior of acid-treated Brazilian palygorskite for cationic and anionic dyes removal from the water // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, N. 7. C. 3954.

33. Miller K. E., Bruno T. J. Enthalpy of fuel gas odorants on surrogate soil surfaces by gas chromatography // *Journal of Chromatography A*. 2002. Vol. 975, N. 2. P. 311–318.

## References

1. Kanicky J. R. et al. Surface chemistry in the petroleum industry. *Handbook of applied surface and colloid chemistry*, 2001, vol. 1, pp. 251-267.

2. Ivanova M. A. *Razrabotka sistemy upravlenija kolonnyh apparatov neftepererabotki: vypusknaja kvalifikacionnaja rabota* [Development of a control system for oil refining column apparatuses: final qualification work]. Krasnojarsk, Sibirskij federal'nyj universitet, 2017. 100 p.

3. Karapetjan K. G., Dorosh I. V., Korshunov A. D. Obzor neorganicheskikh sorbentov dlja likvidacii razlivov nefi [Overview of inorganic sorbents for oil spill response]. *Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*, 2023, no. 4 (50), pp. 77-88.

4. Gajšina R. K., Bashkatova V. S., Osipova E. A. Perspektivnoe ispol'zovanie glin v kachestve sorbentov [Promising use of clays as sorbents]. *Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovanija, nauki i kul'tury*, 2021, pp. 2687-2690.

5. Abdurahmonov Je. B., Aslonov A. A. Sostojanie voprosa kompleksnoj ochistki stochnyh vod, ispol'zuemyh v neftepererabatyvajushhej otrasli [The state of the issue of integrated wastewater treatment used in the oil refining industry]. *Universum: tehnicheckie nauki*, 2023, no. 4 (109), pp. 5-8.

6. Emam E. A. Clay adsorption perspective on petroleum refining industry. *Industrial Engineering*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 19-25.

7. Shajhiev I. G. i dr. Himicheskie, fiziko-himicheskie i biologicheskie metody obezvezhivaniya neftesoderzhashih othodov [Chemical, physico-chemical and biological methods of neutralization of oily waste]. *Bezopasnost', zashhita i ohrana okruzhajushhej prirodnoj sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovanija*, 2021, pp. 187-196.

8. Mustafina Je. A., Poletaeva O. Ju., Movsumzade Je. M. Tjzhelye metallonosnye nefi i ih demetallizacija [Heavy metal-bearing oils and their demetallization]. *Neftegazohimija*, 2014, no. 4, pp. 15-18.

9. Bel'chinskaja L. I. i dr. Vlijanie termicheskogo modifirovaniya na adsorbcionnye svojstva prirodnyh silikatov [The effect of thermal modification on the adsorption properties of natural silicates]. *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 80-88.

10. Ivanova M. A., Chikina N. S., Zenitova L. A. Likvidacija nefjnyh zagryznenij [Elimination of oil pollution]. *Butlerovskie soobshhenija*, 2012, vol. 29, no. 3, pp. 1-12.

11. Kalinin V. F. Fiziko-himicheskie osnovy i harakternye osobennosti mehanizma povyshenija produktivnosti skvazhin metodom obrabotki prizabojnoj zony plasta organicheskimi rastvoriteljami [Physico-chemical bases and characteristic features of the mechanism of increasing the productivity of wells by treating the bottom-hole zone of the formation with organic solvents]. *Nedra Povolzh'ja i Pri-kaspija*, 2023, iss. 110, pp. 48-62.

12. Rajaković-Ognjanović V., Aleksić G., Rajaković L. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. *Journal of hazardous materials*, 2008, vol. 154, no. 1-3, pp. 558-563.

13. Rajakovic V. et al. Efficiency of oil removal from real wastewater with different sorbent materials. *Journal of hazardous materials*, 2007, vol. 143, no. 1-2, pp. 494-499.

14. Noskov A., Kazakov M. Perspektivy ispol'zovanija netradicijonno uglevodorodnogo syr'ja v TJeK Rossii [Prospects for the use of unconventional hydrocarbon raw materials in the fuel and energy complex of Russia]. *Jenergeticheskaja politika*, 2021, no. 5 (159), pp. 14-25.

15. Akbarzadeh K. et al. Asphaltenes – problematic but rich in potential. *Oilfield review*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 22-43.

16. Abdel-Raouf M. *Crude oil emulsions – Composition stability and characterization*. InTechOpen, 2012. 240 p.

17. Aziz B. K., Abdullah M. A., Jubrael K. J. Acid activation and bleaching capacity of some clays for decolourizing used oils. *Asian Journal of Chemistry*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 2449.

18. Dean K. R., McATEE Jr J. L. Asphaltene adsorption on clay. *Applied Clay Science*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 313-319.

19. Dudášová D. et al. Study of asphaltenes adsorption onto different minerals and clays. Part 1. Experimental adsorption with UV depletion detection. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, vol. 317, no. 1-3, pp. 1-9.

20. Tsiamis A., Taylor S. E. Adsorption behavior of asphaltenes and resins on kaolinite. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 10, pp. 10576-10587.

21. Khan A. H., Batool N., Aziz A. Recovery of base oil from used oil through solvent extraction followed by adsorption: a review. *Environmental Protection Research*, 2023, pp. 319-340.

22. Katasonova O. N., Savonina E. Ju., Marjutina T. A. Jekstrakcionnye metody vydelenija sery i ee soedinenij iz nefi i nefteproduktov (obzor) [Extraction methods for the separation of sulfur and its compounds from petroleum and petroleum products (review)]. *Zhurnal prikladnoj himii*, 2021, vol. 94, no. 4, pp. 411-439.

23. Samojlenko E. A. i dr. Udalenie seraorganicheskikh soedinenij iz nefi [Removal of organosulfur compounds from oil]. *Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse*, 2017, no. 1, pp. 32-35.

24. Dudnik A. A., Skripnik A. S., Hisamova M. N. Primenenie ul'trazvukovogo vozdeystvija v processah desulfurizacii dizel'nogo topliva [The use of ultrasonic exposure in diesel fuel desulfurization processes]. *Nauka molodyh – budushhee Rossii*, 2020, pp. 253-256.

25. Baia L. V. et al. Removal of sulfur and nitrogen compounds from diesel oil by adsorption using clays as adsorbents. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 11, pp. 11731-11742.

26. Ahmad S. et al. Oxidative desulfurization of tire pyrolysis oil. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2016, vol. 22, no. 3, pp. 249-254.

27. Tang X., Meng X., Shi L. Desulfurization of model gasoline on modified bentonite. *Industrial & engineering chemistry research*, 2011, vol. 50, no. 12, pp. 7527-7533.

28. Lee C. W. et al. Centimeter-scale tellurium oxide films for artificial optoelectronic synapses with broadband responsiveness and mechanical Flexibility. *ACS nano*, 2024, vol. 18, no. 28, pp. 18635-18649.

29. Özkan A., Özkan V. Adsorptive Desulfurization of Crude Oil with Expanded Perlite. *Caucasian Journal of Science*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 175-183.

30. Emam E. A. Clays as catalysts in petroleum refining industry. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 356-375.

31. Mikhail S., Zaki T., Khalil L. Desulfurization by an economically adsorption technique. *Applied Catalysis A: General*, 2002, vol. 227, no. 1-2, pp. 265-278.

32. Silva V. C. et al. Adsorption behavior of acid-treated Brazilian palygorskite for cationic and anionic dyes removal from the water. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 7, p. 3954.

33. Miller K. E., Bruno T. J. Enthalpy of fuel gas odorants on surrogate soil surfaces by gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2002, vol. 975, no. 2, pp. 311-318.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 30.10.2024  
The article was submitted 03.09.2024; approved after reviewing 16.10.2024; accepted for publication 30.10.2024

### Информация об авторах / Information about the authors

**Валерий Владимирович Давидюк** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; daviduk62@gmail.com

**Надежда Андреевна Агапонова** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; agaponova\_na@mail.ru

**Сергей Юрьевич Болгов** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; fila9488@mail.ru

**Наталья Николаевна Обуховская** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; Obuhovskaya.nat@mail.ru

**Денис Владимирович Путилин** – магистрант кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; denisputilin37@gmail.com

**Valery V. Davidyuk** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; daviduk62@gmail.com

**Nadezhda A. Agaponova** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; agaponova\_na@mail.ru

**Sergei Yu. Bolgov** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; fila9488@mail.ru

**Natalya N. Obukhovskaya** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; Obuhovskaya.nat@mail.ru

**Denis V. Putilin** – Master's Course Student of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; denisputilin37@gmail.com

