

УДК 628.316.12 : 544.723.21

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИОННОГО ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОД ОТ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2025 А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, Я.А. Мурзаханов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Статья поступила в редакцию 20.05.2025

Сорбционный метод очистки широко применяется для извлечения различных загрязнителей, включая поверхностно-активные вещества (ПАВ). В работе рассмотрены особенности сорбционного процесса при очистке модельных вод от анионных ПАВ. В качестве ПАВ использовался лаурилсульфат натрия. Сорбционные материалы были получены из карбонатсодержащего отхода сахарной промышленности и диатомитового шлама пивоваренной промышленности путем термической модификации. В исследованиях использовались как отдельные сорбционные материалы, так и их смеси в различных пропорциях. В процессе очистки модельных вод было установлено, что наибольшая эффективность извлечения ПАВ достигается при использовании диатомитового шлама, термообработанного при 450 °С и гидрофобизованного стеариновой кислотой. Высокие значения эффективности были получены также при использовании гидрофобизованного шлама карбонатсодержащего отхода, термообработанного при 450 °С и гидрофобизованного диатомитового шлама, термообработанного при 550 °С. Для лучшего понимания сорбционных процессов была построена изотерма сорбции для диатомитового шлама, термообработанного при 450 °С и гидрофобизованного стеариновой кислотой. По классификации Международного союза теоретической и прикладной химии полученную кривую можно отнести к I типу изотерм. Проведенные расчеты с использованием математических моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ, ТОЗМ, Дубинина-Радushкевича, Темкина показали, что механизм сорбционного взаимодействия лучше всего описывается моделью Ленгмюра. Это позволяет предположить протекание процесса адсорбции по мономолекулярному типу, с распределением сорбата между энергетически равнозначными активными центрами.

Ключевые слова: очистка, отход, диатомит, сорбент

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-215-222

EDN: HYUXKQ

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Получение новых сорбционных материалов, особенно на основе отходов промышленности, является актуальной задачей современности. Для успешного их использования в водоочистке необходимо исследовать особенности сорбционных взаимодействий в водных средах, протекающих в ходе извлечения загрязнителей.

Использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) в быту и промышленности увеличилось в результате экономического роста, что приводит к возрастанию их количества в сточных водах. Лаурилсульфат натрия (рисунок 1), одно из самых известных анионных ПАВ, является распространенным загрязнителем водных объектов [1].

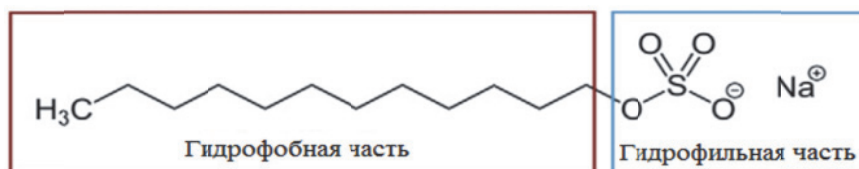


Рис. 1. Структурная формула лаурилсульфата натрия

Удаление ПАВ из водных сред является одной из основных задач, стоящих перед предприятиями, занимающимися водоочисткой. Это довольно непростой процесс, учитывая широкий ассортимент современных детергентов и их негативное влияние на установки биологической очистки [2].

Святченко Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии. E-mail: sv.anastasiaa@mail.ru

Сапронова Жанна Ануаровна, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленной экологии. E-mail: sapronova.2016@yandex.ru

Мурзаханов Ян Артурович, аспирант кафедры промышленной экологии. E-mail: murzahanov94@mail.ru

ПАВ обычно состоят из двух частей: полярной головной группы (заряженной или незаряженной), которая хорошо растворяется в воде, и углеводородного хвоста, который плохо растворим в полярных растворителях. Таким образом, ПАВ сочетают в себе гидрофобные и гидрофильные свойства в одной молекуле. ПАВ в широком смысле могут быть определены как соединения, которые изменяют энергетические отношения на границах раздела фаз. Когда ПАВ присутствуют в низких концентрациях, они уменьшают количество межфазной свободной энергии и способствуют расширению одной из границ раздела в системе, тем самым влияя на эффективность многих процессов [2-4].

Использование ПАВ чрезвычайно распространено и неуклонно возрастает в последние десятилетия. Согласно прогнозам на территории РФ в ближайшие 3 года объем производства ПАВ составит более 2,4 млн т [5]. Они находят широкое применение в быту, в производстве фармацевтических препаратов и средств личной гигиены, красок и лаков, пищевых продуктов, пластмасс и пестицидов, а также в фармацевтической, горнодобывающей, нефтедобывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. Более того, в последние десятилетия они все чаще используются в высокотехнологичных секторах, таких как биотехнология и микроэлектроника [2, 4].

Обычно ПАВ можно разделить на четыре типа: анионные, неионогенные, катионные и амфотерные [3].

Анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) состоят из преимущественно линейной алифатической углеводородной цепи (длина от C_8 до C_{18}) с полярной сульфатной или сульфонатной группой, нейтрализованной противоионом (например, Na^{2+} , K^+ , NH_4^+). Многие АПАВ представляют собой вещества, состоящие из нескольких гомологов. Было подсчитано, что АПАВ составляют около 60% ПАВ, производимых в мире [1, 6].

Существует множество публикаций о негативном влиянии ПАВ на окружающую среду, дикую природу и людей. Эти соединения обладают токсическим и канцерогенным воздействием, способны к биоаккумуляции и могут передаваться по пищевым цепям, повреждают жабры и слизистые оболочки, убивают икру и вызывают эндокринные нарушения у рыб [2, 7].

ПАВ могут увеличивать количество органических углеводородных соединений, которые растворяются в водных источниках или сорбируются в почве и отложениях, где они потенциально могут стать вредными для сельскохозяйственных культур, а также влияют на разложение гидрофобных органических соединений [2].

Хотя очистные сооружения имеют высокую эффективность удаления ПАВ (95-99%), эти вещества можно найти в водных экосистемах в различных концентрациях. Ими также могут быть загрязнены и почвы [1, 6].

Большое количество ПАВ плохо поддается биологическому разложению. Они вызывают нарушение функции и структуры бактериальных мембран за счет увеличения их проницаемости. В микроорганизмах адсорбция ПАВ вызывает деполаризацию клеточных мембран и, как следствие, влияет на метаболизм [8]. Чтобы улучшить работу биологических очистных сооружений, необходимо разработать методы предварительной обработки сточных вод с ПАВ.

Адсорбция - популярный физико-химический метод удаления ПАВ из стоков [7, 9]. В настоящее время активированный уголь стал наиболее широко используемым адсорбентом для очистки от различных загрязнителей. Тем не менее, из-за высокой стоимости его широкое использование для очистки сточных вод часто ограничено.

За последние годы широкий спектр недорогих адсорбентов был протестирован на их способность устранять загрязняющие вещества из сточных вод. В качестве сорбентов были использованы сельскохозяйственные и бытовые отходы, побочные продукты производств, отходы морепродуктов, почва и минеральные компоненты и др., но по-прежнему необходимы дальнейшие работы по поиску недорогого и эффективного адсорбента для крупномасштабного удаления ПАВ [9-10].

Для лучшего понимания механизма сорбционных процессов используются математические модели Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера) и другие, которые позволяют получить информацию о взаимодействии между поверхностью адсорбента и адсорбатом.

Эта работа посвящена изучению сорбционных процессов при очистке модельных вод от ПАВ при помощи органоминеральных сорбционных материалов, полученных на основе карбонатсодержащего отхода сахарной промышленности и диатомитового шлама пивоваренной промышленности. Особенности состава и физико-химических трансформаций в процессе модификации материалов изложены в работах [11-12].

Целью исследования являлось определение оптимального способа модификации исследуемых органоминеральных отходов для получения эффективного в отношении лаурилсульфата натрия сорбционного материала, а также изучение особенностей коллоидно-химических взаимодействий, возникающих в ходе очистки модельных растворов.

Основными задачами были выбраны следующие:

- получение органоминеральных сорбционных материалов различных модификаций;
- выявление наиболее эффективного в текущих условиях эксперимента сорбционного материала;
- исследование особенностей сорбционного процесса на примере полученного сорбционного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья сорбционных материалов были использованы карбонатсодержащий отход сахарной промышленности – сатурационный осадок и диатомитовый шлам пивоваренной промышленности. Модификацию отходов проводили путем обработки в муфельной печи (LOIP LF-7/13) при различных температурах в течение 60 мин.

Обозначения полученных сорбционных материалов и их комбинаций представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сорбционные материалы, используемые в работе

Обозначение	Исходное сырье	Модификация
СО ₆₀₀	сатурационный осадок	600 °С
ДШ ₄₅₀	диатомитовый шлам	450°С
ДШ ₅₅₀	диатомитовый шлам	550°С
СОДШ ₆₀₀	сатурационный осадок и диатомитовый шлам (1:1)	600 °С
СО ₆₀₀ :ДШ ₅₅₀	СО ₆₀₀ : ДШ ₅₅₀ (5:1)	-
СО _{600Г}	СО ₆₀₀	гидрофобизованный стеариновой кислотой в соотношении (1:0,005)
ДШ _{450Г}	ДШ ₄₅₀	гидрофобизованный стеариновой кислотой в соотношении (1:0,005)
ДШ _{550Г}	ДШ ₅₅₀	гидрофобизованный стеариновой кислотой в соотношении (1:0,005)

В эксперименте использовали модельные растворы, содержащие лаирисульфат натрия в концентрации 0,1 г/дм³.

Очистка была проведена в статических условиях, путем добавления навесок сорбционного материала к модельному раствору. Содержимое колб перемешивали в течение 20 минут при температуре 25 °С, затем отфильтровывали через бумажный фильтр «синяя лента».

Концентрацию загрязняющего вещества до и после очистки определяли фотометрическим методом [13]. Все эксперименты проводились в трехкратной повторности.

По полученным значениям, начальных и конечных концентраций в растворе определялась сорбционная емкость (А, ммоль/г) по формуле [14]:

$$A = \frac{(C_n - C_p) \cdot 100}{m \cdot 1000}, \quad (1)$$

где C_n – начальная концентрация, ммоль/дм³; C_k – равновесная концентрация, ммоль/дм³; m – масса сорбционного материала, г.

Изотерма адсорбции строилась по полученным значениям сорбционной емкости (А) материала и равновесным концентрациям.

Эффективность очистки (Э, %) растворов определяли по формуле:

$$\text{Э} = \frac{(C_n - C_k)}{C_n} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где C_n – начальная концентрация вещества в растворе, мг/дм³; C_k – конечная концентрация вещества в растворе, мг/дм³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения исследования по очистке модельных растворов при помощи различных сорбционных материалов, были получены следующие данные (рисунок 2). Наиболее эффективным в данной серии экспериментов показал себя ДШ_{450Г}, немногим уступили ему СО_{600Г} и ДШ_{550Г}. Сорбционные материалы ДШ₄₅₀, ДШ₅₅₀ и СО₆₀₀ также показывают высокую эффективность извлечения лаурилсульфата натрия. Комбинирование сорбционных материалов в данном случае имело негативный эффект на процесс водоочистки, хотя в экспериментах с другими загрязнителями отмечалось повышение эффективности при совместном использовании СО₆₀₀ и ДШ₄₅₀ для очистки модельных вод от красителей [15].

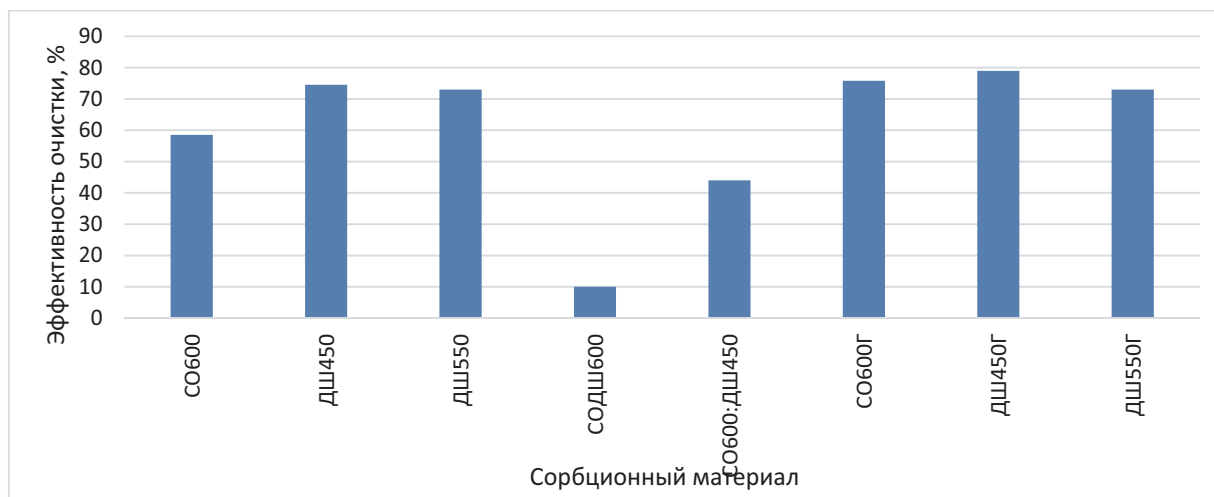


Рис. 2. Эффективность очистки модельных растворов сорбционными материалами

Поскольку наибольшая эффективность очистки была получена при использовании ДШ_{450Г}, была построена изотерма адсорбции для этого материала (рисунок 3).

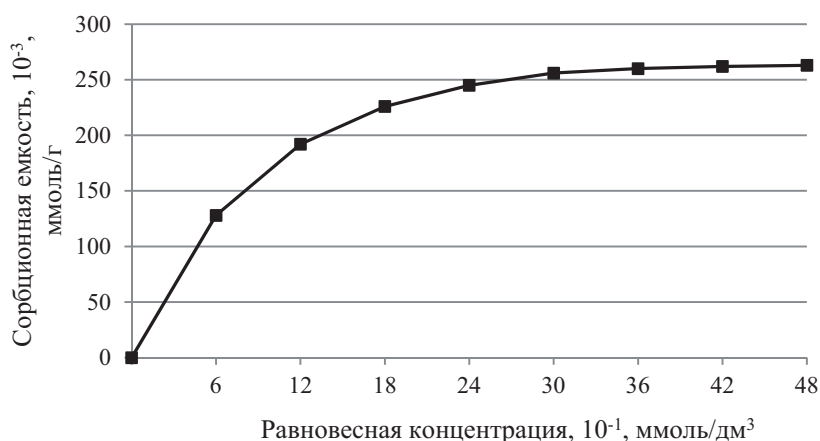


Рис. 3. Изотерма адсорбции и десорбции ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) лаурилсульфата натрия на поверхности ДШ_{450Г}

Полученная изотерма относится к I типу по классификации, принятой международным союзом теоретической и прикладной химии, что указывает на микропористую структуру сорбционного материала [16]. Для уточнения механизма сорбции была применена обработка данных с использованием математических моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ, ТОЗМ, Дубинина-Радushкевича, Темкина [17-19].

Модель Ленгмюра описывает процесс мономолекулярной адсорбции на поверхности твердого тела, активные центры которого энергетически равнозначны, с учетом уравнивания относительных скоростей адсорбции и десорбции.

Модель Фрейндлиха предполагает, что поверхность сорбента неоднородна и в первую очередь происходит заполнение активных сорбционных положений с максимальной энергией.

Модель БЭТ предусматривает многослойное присоединение молекул сорбата на поверхность адсорбента, активные центры которого энергетически равноценны.

Теория объемного заполнения микропор, или ТОЗМ, описывает объемное заполнение микропор на микропористых сорбентах, где поры сопоставимы по размеру с молекулами сорбата, поэтому взаимодействие протекает не на поверхности материала, а во всем объеме микропоры, в так называемом «сорбционном поле». В этом случае извлечение вещества может рассматриваться как вариант абсорбции, где сорбат растворяется в сорбенте, поскольку весь объем внутреннего порового пространства представляет собой объем эффективно действующего сорбционного поля.

Модель Дубинина-Радushкевича обычно применяется для выражения механизма многослойной адсорбции с гауссовым распределением энергии на неоднородных поверхностях.

Модель Темкина относится к случаю мономолекулярной адсорбции на неоднородной поверхности адсорбента; при этом что теплота адсорбции всех молекул в слое линейно снижается по мере

заполнения слоя из-за взаимного отталкивания молекул сорбата и что адсорбция происходит с равномерным распределением максимальной энергии связывания [20-21].

Полученные зависимости отображены на рисунке 4, уравнения и коэффициенты корреляции представлены в таблице 2.

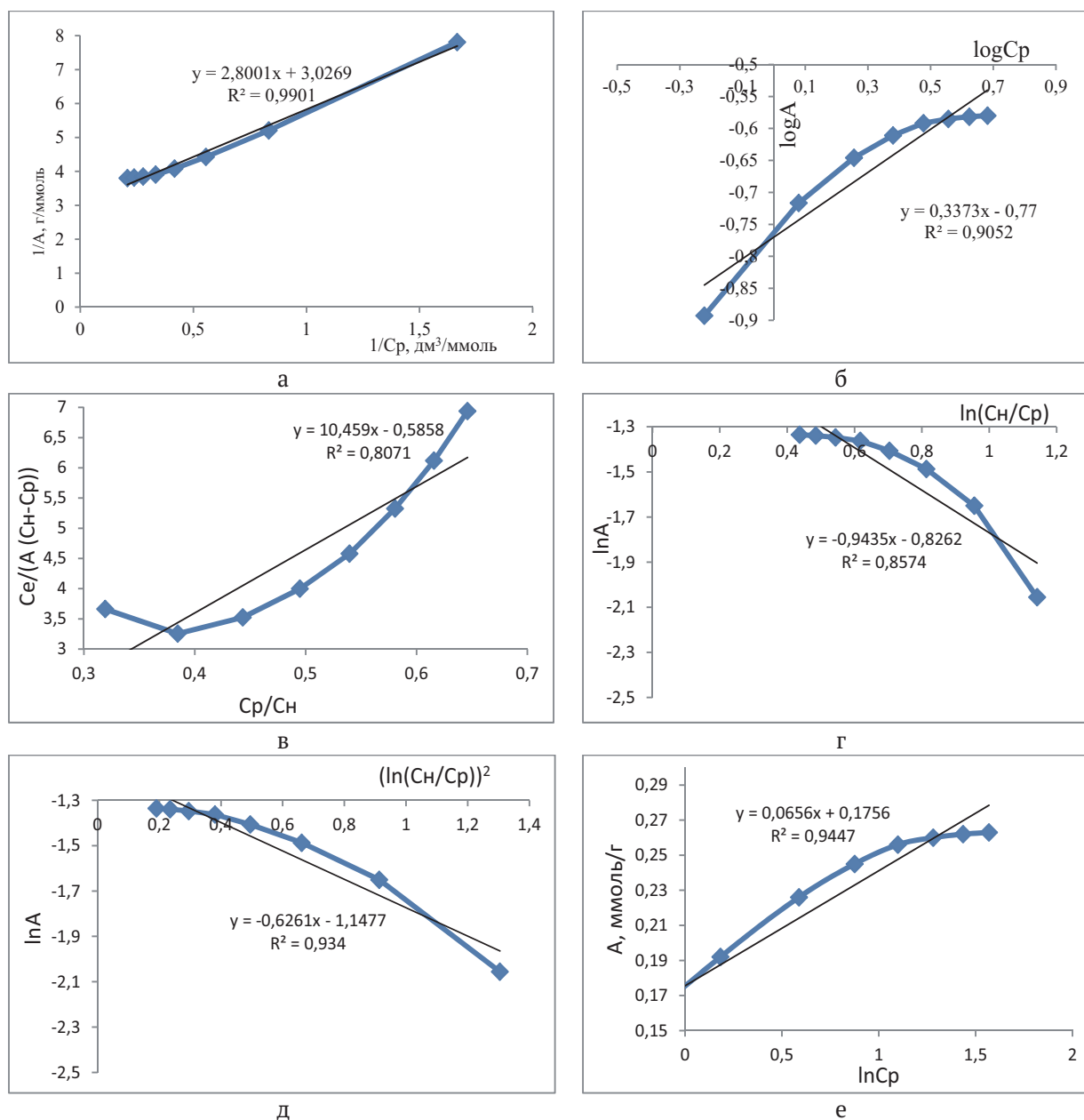


Рис. 4. Изотермы адсорбции, построенные с использованием моделей:
а – Ленгмюра, б – Фрейндлиха, в – БЭТ, г – ТОЗМ, д – Дубинина-Радушкевича, е – Темкина

Таблица 2 – Результаты обработки изотерм адсорбции

Математическая модель	Уравнение	Коэффициент корреляции
Ленгмюра	$1/A = 1/A_{\infty} + 1/(KLA_{\infty}C_p)$	0,99504
Фрейндлиха	$\log A = \log KF + 1/n \log C_p$	0,95144
БЭТ	$C_e/(A(C_n - C_p)) = 1/(A_{\infty}K_{БЭТ}) + (K_{БЭТ} - 1)/(A_{\infty}K_{БЭТ})(C_p/C_n)$	0,898396
ТОЗМ	$\ln A = \ln A_{\infty} - (R^*T/E)^* \ln(C_n - C_p)$	-0,92594
Дубинина-Радушкевича	$\ln A = \ln A_{\infty} - (R^*T/E)^{2*} (\ln(C_n/C_p))^2$	-0,96645
Темкина	$A = (R \cdot T) / b_{TE} \cdot \ln a_{TE} + (R \cdot T) / b_{TE} \cdot \ln C_p$	0,97198

Из приведенных расчетов видно, что ближе всего к единице коэффициент корреляции, полученный с использованием модели Ленгмюра, что указывает на наиболее полное совпадение полученных в ходе исследований экспериментальных данных указанной аналитической модели [17–19, 21].

Изотерма адсорбции Ленгмюра является одной из наиболее часто используемых моделей адсорбции для количественной оценки связывания адсорбата с поверхностью адсорбента [22–24].

Многие ученые сообщают, что примененный в данной работе метод линеаризации изотермы Ленгмюра адекватно описывает экспериментальные данные по применению сорбентов [25].

В то же время, поскольку поверхности большинства природных адсорбентов неоднородны, при использовании упомянутой модели имеются погрешности, не позволяющие четко объяснить механизм адсорбции. Эта модель применима к описанию процессов только при определенных условиях и в большинстве случаев не может быть использована для механизмов адсорбции в многокомпонентных сточных водах [22]. Кроме того, константа равновесия Ленгмюра не подходит для расчета термодинамических параметров адсорбции [23]. Следовательно, в будущих исследованиях, направленных на моделирование изотерм адсорбции из жидкой фазы, следует учитывать особенности используемых моделей и условий экспериментов при описании механизмов сорбционного взаимодействия.

ВЫВОД

Проведенные исследования по использованию сорбционных материалов, полученных термической модификацией сатурационного осадка, диатомитового шлама, их смесей и применение дополнительной гидрофобизации стеариновой кислотой позволили установить, что наиболее эффективным в данной серии экспериментов является материал ДШ_{450Г}. Высокую эффективность извлечения лаурилсульфата натрия также продемонстрировали СО_{600Г} и ДШ_{550Г}, сорбционные материалы ДШ₄₅₀, ДШ₅₅₀ и СО₆₀₀ немногим им уступают.

Изотерма адсорбции для ДШ_{450Г} соответствует материалу с микропористой структурой, применение математических моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ, ТОЗМ, Дубинина-Радushkevicha, Темкина позволили установить, что сорбция лучше всего описывается моделью Ленгмюра, т.е. мономолекулярной адсорбции на поверхности твердого тела, активные центры которого энергетически равнозначны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nam W., Woo K., & Han G. Photooxidation of anionic surfactant (sodium lauryl sulfate) in a three-phase fluidized bed reactor using TiO₂/SiO₂ photocatalyst // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2009. Vol. 15. P. 348–353.
2. Palmer M., & Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // Water Research. 2018. Vol. 147. P. 60–72.
3. Removal characteristic of surfactants in typical industrial and domestic wastewater treatment plants in Northeast China / Fu-Jie Zhu, Wan-Li Ma, Tie-Fu Xu, Yi Ding, Xue Zhao, Wen-Long Li, Li-Yan Liu, Wei-Wei Song, Yi-Fan Li, & Zi-Feng Zhang // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 153. P. 84–90.
4. Occurrence and potential environmental risk of surfactants and their transformation products discharged by wastewater treatment plants / F. Finnian, A. A. Nikiforos, P. C. von der Ohe, P. S., Jaroslav, P. Oswald, et al. // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 681. P. 475–487.
5. Маркетинговое исследование рынка ПАВ (кроме мыла) в России 2017–2025 гг. Прогноз на 2025–2029 гг. Февраль 2025. – URL: <https://marketing.rbc.ru/research/48344/?ysclid=manrdfgpm581797707> (дата обращения 14.05.2025).
6. Characteristics and environmental fate of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate (SLES) used as the main component in foaming agents for mechanized tunneling / A. B. Caracciolo, M. Cardoni, T. Pescatore, L. Patrolecco // Environmental Pollution. 2017. Vol. 226. P. 94–103.
7. Water recovery and on-site reuse of laundry wastewater by a facile and cost-effective system: Combined biological and advanced oxidation process / K. Z. Benis, A. Behnami, E. Aghayani, S. Farabi, M. Pourakbar // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 789. (148068) – 13 p.
8. Fathi Aloui, S., Kchaou S., & Sayadi S. Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 164. P. 353–359.
9. Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies for sorption of 2,4-dichlorophenol onto surfactant modified fuller's earth / J. Shah, Jan M. Rasul, M. Zeeshan, & M. Imran // Applied Clay Science. 2017. Vol. 143. P. 227–233.
10. Senthil R.B., & Senthil K.P. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater // Environmental Pollution. 2021. Vol. 280. (116995) – 19 p.
11. Evaluating the properties of organic and mineral sludge as a raw material for the production of sorption material / Zh A. Sapronova, Yu L. Makridina, I V. Starostina, M N. Spirin & E V. Fomina // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 624. No. 012211. P. 7.
12. Сапронова, Ж.А. Сравнение сорбционных свойств органоминеральных отходов различных модификаций при очистке модельных вод от СПАВ // // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: Материалы Всероссийской науч. конф. / Ж.А. Сапронова, А.В. Святченко. – Белгород, 2021. – С. 302–306.
13. ПНД Ф 14.1:2.4.15–95 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ в питьевых, поверхностных и сточных водах экстракционно-фотометрическим методом. – ФБУ ФЦАО. – 2011

14. Святченко, А.В. Анализ особенностей очистки модельных вод от ионов меди и никеля термообработанным целлюлозосодержащим материалом / А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 6(116). – С. 174–180.
15. Saproнова Zh. A., Starostina I. V., & Bomba I. V. Purification of Model Waters from the Congo Red Dye with Organomineral Sorption Material Based on Sludge Waste // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. P. 273–278.
16. Commission on Colloid and Surface Chemistry Including Catalysis Reporting Physisorption Data For Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity / K. S. W. Sing, D. H. Everett, R. A. Haul, L. Moscou, I. J. Pierott, R. A. Rouquerol, T. Siemieniewska // Pure & App. Chem. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619.
17. Свергузова, С.В. Использование биомассы абрикосовых косточек в качестве материала для извлечения метиленового голубого из водных сред / С.В. Свергузова, Ю.А. Винограденко, И.Г. Шайхиев, Р.З. Галимова, Е.С. Антюфеева, Р.Р. Гафаров // Экология и Промышленность России. – 2020. – Т. 24. – № 11. – С. 36–40.
18. Галимова, Р.З. Адсорбция ионов меди (II) на модифицированной коре акации ушковидной (*Acacia Auriculiformis*) / Р.З. Галимова, И.Г. Шайхиев, Т.К.Т. Нгуен // Экологическая химия. – 2020. – Т. 29. – № 4. – С. 196–200.
19. Галимова, Р.З. Влияние pH среды на протекание процессов адсорбции ионов меди, никеля и цинка иглоками лиственницы сибирской (*LARIX SIBIRICA*) / Р.З. Галимова, И.Г. Шайхиев, Н.А. Камалова, С.В. Свергузова // Сорбционные и хроматографические процессы, 2020. – № 20(3). – С. 400–407.
20. Nimibofa A., Augustus N. E., Donbebe W. H. Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms // Journal of Chemistry. 2017. Article 3039817. – 11 p.
21. Алексеева, А.А. Применение листового опада в качестве основы сорбционного материала при ликвидации аварийных разливов нефти с поверхности воды: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Алексеева. – Казань, 2017. – 159 с.
22. Quantification of the limitation of Langmuir model used in adsorption research on sediments via site energy heterogeneity / Q. Jin, L. Huang, A. Li et al. // Chemosphere. 2017. Vol. 185. P. 518–528.
23. Aziziana S., Erisa S., & Lee D. Re-evaluation of the century-old Langmuir isotherm for modeling adsorption phenomena in solution // Wilson Chemical Physics. 2018. Vol. 513. P. 99–104.
24. Latour R.A. The Langmuir isotherm: A commonly applied but misleading approach for the analysis of protein adsorption behavior // Journal of Biomedical Materials Research. 2015. Vol. 103A. P. 949–958.
25. Guo X., & Wang J. Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 296. Article 111850.

FEATURES OF THE SORPTION PROCESS OF WATER PURIFICATION FROM SURFACTANTS USING ORGANOMINERAL SORPTION MATERIALS

© 2025 A.V. Svyatchenko, Zh.A. Saproнова, Y.A. Murzahanov

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

The sorption purification method is widely used to extract various pollutants, including surfactants. The paper considers the features of the sorption process in the purification of model waters from anionic surfactants. Sodium lauryl sulfate was used as a surfactant. Sorption materials were obtained from carbonate-containing waste from the sugar industry and diatomaceous sludge from the brewing industry by thermal modification. The studies used both individual sorption materials and their mixtures in various proportions. In the process of model water purification, it was found that the highest efficiency of surfactant extraction is achieved by using diatomaceous sludge, heat-treated at 450 °C and hydrophobized with stearic acid. High efficiency values were also obtained using hydrophobized carbonate-containing sludge, heat-treated at 450 °C. and hydrophobized diatomaceous sludge, heat-treated at 550 °C. For a better understanding of sorption processes, a sorption isotherm was constructed for diatomaceous sludge heat-treated at 450 °C and hydrophobized with stearic acid. According to the classification of the International Union of Pure and Applied Chemistry, the resulting curve can be attributed to type I isotherms. The calculations performed using the mathematical models of Langmuir, Freundlich, BET, TOSM, Dubinin-Radostkevich, Temkin showed that the mechanism of sorption interaction is best described by the Langmuir model. This suggests that the adsorption process proceeds according to the monomolecular type, with the distribution of sorbate between energetically equivalent active centers.

Key words: purification, waste, diatomite, sorbent

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-215-222

EDN: HYUXKQ

REFERENCES

1. Nam W., Woo K., & Han G. Photooxidation of anionic surfactant (sodium lauryl sulfate) in a three-phase fluidized bed reactor using TiO₂/SiO₂ photocatalyst // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2009. Vol. 15. P. 348–353.
2. Palmer M., & Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // Water Research. 2018. Vol. 147. P. 60–72.
3. Removal characteristic of surfactants in typical industrial and domestic wastewater treatment plants in Northeast China / Fu-Jie Zhu, Wan-Li Ma, Tie-Fu Xu, Yi Ding, Xue Zhao, Wen-Long Li, Li-Yan Liu, Wei-Wei Song, Yi-Fan Li, & Zi-Feng Zhang // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 153. P. 84–90.
4. Occurrence and potential environmental risk of surfactants and their transformation products discharged by wastewater treatment plants / F. Finnian, A. A. Nikiforos, P. C. von der Ohe, P. S., Jaroslav, P. Oswald, et al. // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 681. P. 475–487.
5. Marketingovoe issledovanie rynka PAV (krome myla) v Rossii 2017–2025 gg. Prognoz na 2025–2029 gg. Fevral' 2025. – URL: <https://marketing.rbc.ru/research/48344/?ysclid=manrfdgpm581797707> (data obrashcheniya 14.05.2025).
6. Characteristics and environmental fate of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate (SLES) used as the main component in foaming agents for mechanized tunneling / A. B. Caracciolo, M. Cardoni, T. Pescatore, L. Patrolecco // Environmental Pollution. 2017. Vol. 226. P. 94–103.

7. Water recovery and on-site reuse of laundry wastewater by a facile and cost-effective system: Combined biological and advanced oxidation process / K. Z. Benis, A. Behnami, E. Aghayani, S. Farabi, M. Pourakbar // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 789. (148068) – 13 p.
8. *Fathi Aloui, S., Kchaou S., & Sayadi S.* Physicochemical treatments of anionic surfactants wastewater: Effect on aerobic biodegradability // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 164. P. 353–359.
9. Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies for sorption of 2,4-dichlorophenol onto surfactant modified fuller's earth / J. Shah, Jan M. Rasul, M. Zeeshan, & M. Imran // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 143. P. 227–233.
10. *Senthil R.B., & Senthil K.P.* Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 280. (116995) – 19 p.
11. Evaluating the properties of organic and mineral sludge as a raw material for the production of sorption material / Zh. A. Saponova, Yu. L. Makridina, I. V. Starostina, M. N. Spirin & E. V. Fomina // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 624. No. 012211. P. 7.
12. *Saponova, Zh.A.* Srovnání sorbčních vlastností organominerálních odtoků různých modifikací při очистке model'nyh vod ot SPAV / // Bezopasnost', zashchita i ohrana okruzhayushchej prirodnoj sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Materialy Vserossijskoj akademii nauk. konf. / Zh.A. Saponova, A.V. Svyatchenko. – Belgorod, 2021. – S. 302-306.
13. PND F 14.1.2:4.15-95 Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika izmerenij massovoj koncentracii anionnyh poverhnostno-aktivnyh veshchestv v pit'evykh, poverhnostnykh i stochnykh vodah ekstrakcionno-fotometricheskimi metodami. – FBU FCAO. – 2011
14. *Svyatchenko, A.V.* Analiz osobennostej ochistki model'nyh vod ot ionov medi i nikelya termooobrabotannym cellyulozoderzhashchim materialom / A.V. Svyatchenko, Zh.A. Saponova, S.V. Sverguzova // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2023. – T. 25. – № 6(116). – S. 174-180.
15. *Saponova Zh.A., Starostina I. V., & Bomba I. V.* Purification of Model Waters from the Congo Red Dye with Organomineral Sorption Material Based on Sludge Waste // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 147. P. 273-278.
16. Commission on Colloid and Surface Chemistry Including Catalysis Reporting Physisorption Data For Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity / K. S. W. Sing, D. H. Everett, R. A. Haul, L. Moscou, I. J. Pierott, R. A. Rouquerol, T. Siemieniewska // *Pure & App. Chem*. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619.
17. *Sverguzova, S.V.* Ispol'zovanie biomassy abrikosovykh kostochek v kachestve materiala dlya izvlecheniya metilenovogo golubogo iz vodnykh sred / S.V. Sverguzova, Yu.A. Vinogradenko, I.G. Shajhiev, R.Z. Galimova, E.S. Antyufeeva, R.R. Gafarov // *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii*. – 2020. – T. 24. – № 11. – S. 36-40.
18. *Galimova, R.Z.* Adsorbciya ionov medi (II) na modifitsirovannoj kore akacii ushkovidnoj (*Acacia Auriculiformis*) / R.Z. Galimova, I.G. Shajhiev, T.K.T. Nguen // *Ekologicheskaya himiya*. – 2020. – T. 29. – № 4. – S. 196-200.
19. *Galimova, R.Z.* Vliyaniye rN sredy na protekanie processov adsorbicii ionov medi, nikelya i cinka igolkami listvennic sibirskoj (LARIX SIBIRICA) / R.Z. Galimova, I.G. Shajhiev, N.A. Kamalova, S.V. Sverguzova // *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*, 2020. – № 20(3). – S. 400-407.
20. *Nimibofa A., Augustus N. E., Donbebe W. H.* Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms // *Journal of Chemistry*. 2017. Article 3039817. – 11 p.
21. *Alekseeva, A.A.* Primenenie listovogo opada v kachestve osnovy sorbcionnogo materiala pri likvidacii avariynykh razlivov nefi s poverhnosti vody: dis. ... kand. tekhn. nauk / A.A. Alekseeva. – Kazan', 2017. – 159 s.
22. Quantification of the limitation of Langmuir model used in adsorption research on sediments via site energy heterogeneity / Q. Jin, L. Huang, A. Li et al. // *Chemosphere*. 2017. Vol. 185. P. 518–528.
23. *Aziziana S., Erisa S., & Lee D.* Re-evaluation of the century-old Langmuir isotherm for modeling adsorption phenomena in solution // *Wilson Chemical Physics*. 2018. Vol. 513. P. 99–104.
24. *Latour R.A.* The Langmuir isotherm: A commonly applied but misleading approach for the analysis of protein adsorption behavior // *Journal of Biomedical Materials Research*. 2015. Vol. 103A. P. 949–958.
25. *Guo X., & Wang J.* Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 296. Article 111850.

Anastasia Svyatchenko, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor at the Industrial Ecology Department.

E-mail: sv.anastasiaa@mail.ru

Zhanna Saponova, Doctor of Sciences in Technology, Associate Professor, Head at the Industrial Ecology Department.

E-mail: saponova.2016@yandex.ru

Yan Murzahanov, Postgraduate Student, Industrial Ecology Department. E-mail: murzahanov94@mail.ru

Известия Самарского научного центра Российской академии наук

Учредитель: федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре, свидетельство ПИ № ФС77-61347 от 07.04.2015

Главный редактор: академик РАН Ф.В. Гречников

Том 27, номер 4 (126), 29.08.2025

Индекс: 36622. Распространяется бесплатно

Адрес учредителя, издателя и редакции – 443001, Самарская область,

г. Самара, Студенческий пер., 3а. Тел. 8 (846) 340-06-20

Издание не маркируется

Сдано в набор 16.08.2025 г.

Подписано к печати 29.08.2025 г.

Формат бумаги А4

Офсетная печать

Усл. печ. л. 25,808

Тираж 200 экз.

Зак. 40

Отпечатано в типографии ООО "Инсома-пресс."

Адрес типографии: 443080, Самарская обл., г. Самара, ул. Санфириковой, 110А, офис 22А. Тел. 8 (846) 222- 92 -40