

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА АДсорбЦИИ *p*-ДИНИТРОБЕНЗОЛА МОДИФИЦИРОВАННЫМИ БЕНТОНИТАМИ ПРИ ВОДООЧИСТКЕ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Атаманова О. В., Тихомирова Е. И., Истрашкина М. В., Подоксенов А. А.

STUDY OF MECHANISM OF *p*-DINITROBENZENE ADSORPTION BY MODIFIED BENTONITES WHEN WATER PURIFICATION IN STATIC CONDITIONS

Atamanova O. V., Tikhomirova E. I., Istrashkina M. V., Podoksenov A. A.

Аннотация

Введение. Обосновывается целесообразность модифицирования бентонита органическими веществами для повышения его адсорбционной способности. Изучение механизма адсорбции *p*-динитробензола на бентоните, модифицированном разными способами, направлено на установление таких модификаций бентонита, которые позволили бы обеспечить максимально возможное извлечение из производственных сточных вод этого токсичного нитросоединения. **Методы.** К исследованиям приняты четыре варианта бентонитового адсорбента: бентонит немодифицированный гранулированный; бентонит, модифицированный углеродными нанотрубками (УНТ), после термической обработки (ТО) при температуре 550 °С; бентонит, модифицированный глицерином, ТО при 550 °С; бентонит, модифицированный глицерином и УНТ, ТО при 550 °С. Для определения вида адсорбции *p*-динитробензола на изучаемых сорбционных материалах применялся подход Дубинина–Радушкевича. **Результаты.** Экспериментально получены основные адсорбционные характеристики четырех указанных модификаций бентонита по отношению к *p*-динитробензолу в статических условиях. Наилучшие адсорбционные характеристики показал бентонит, модифицированный УНТ: $COE = 1,56$ мг-экв/г; $K_d = 0,14$ мг/дм³; $S = 83,57$ %. Построенные изотермы адсорбции *p*-динитробензола на модифицированном и немодифицированном бентонитах в статических условиях подтвердили наилучшую адсорбционную способность из всех исследованных у бентонита, модифицированного УНТ, после ТО при температуре 550 °С. Наихудшую адсорбционную способность показал немодифицированный бентонит. Полученные уравнения адсорбции показали, что наиболее точно данный процесс описывается в рамках изотермы Ленгмюра. Значения средней свободной энергии E адсорбции *p*-динитробензола при изменении температуры экспериментов от 20 до 60 °С варьируются в диапазоне 11–20 кДж/моль. Таким образом, в процессе адсорбции *p*-динитробензола изучаемыми сорбционными материалами присутствует хемосорбция.

Ключевые слова: адсорбция, модифицированный бентонит, немодифицированный бентонит, *p*-динитробензол, эффективность водоочистки.

Abstract

Introduction. The paper provides a rationale for bentonite modification with organic substances to increase its adsorption capacity. The purpose of studying the adsorption mechanism of *p*-dinitrobenzene on bentonite modified by various methods is to determine such modifications of bentonite that allow for the most efficient removal of this toxic nitro compound from industrial wastewater. **Methods.** The authors analyzed four variants of bentonite adsorbent: unmodified granular bentonite; carbon nanotube (CNT) modified bentonite after heat treatment at 550 °C; glycerin modified bentonite after heat treatment at 550 °C; glycerin and CNT modified bentonite after heat treatment at 550 °C. To determine the type of adsorption of *p*-dinitrobenzene on the studied sorption materials, the Dubinin–Radushkevich method was used. **Results.** Basic adsorption characteristics of the four indicated modifications of bentonite with respect to *p*-dinitrobenzene under static conditions were experimentally obtained. CNT modified bentonite showed the best adsorption characteristics: $COE = 1.56$ mEq/g; $K_d = 0.14$ mg/dm³; $S = 83.57$ %. The constructed isotherms for adsorption of *p*-dinitrobenzene on modified and unmodified bentonites under static conditions confirmed that CNT modified bentonite after heat treatment at 550 °C has the best adsorption capacity. Unmodified bentonite showed the weakest adsorption capacity. The derived adsorption equations demonstrated that this process can be most accurately described by the Langmuir isotherm. With changes in the experimental temperature from 20 to 60 °C, the values of mean free energy E of adsorption of *p*-dinitrobenzene vary in the range of 11–20 kJ/mol. Thus, chemisorption is present in the process of adsorption of *p*-dinitrobenzene by the studied sorption materials.

Keywords: adsorption, modified bentonite, unmodified bentonite, *p*-dinitrobenzene, water treatment efficiency.

Введение

Сточные воды промышленных предприятий разных видов индустрий часто содержат в значительном количестве экотоксиканты и нуждаются в качественной очистке перед их сбросом в природные водоемы или городскую канализацию. Так, сточные воды ряда предприятий химической и фармацевтической индустрий содержат в своем составе органические вещества, в частности ароматические соединения. Поэтому проблема очистки производственных стоков от ароматических соединений на современном этапе развития этих видов промышленности приобретает все большую значимость. Мониторинг состояния водных объектов Саратовской области в местах сброса сточных вод предприятий перечисленных видов производств показал наличие в воде ароматических соединений, преимущественно нитропроизводных бензола, одним из которых является *n*-динитробензол [8].

В настоящее время существует широкий спектр различных методов очистки воды, но каждый из них имеет свои недостатки, сужающие границы его применимости. Многие методы достаточно эффективны, однако связаны со значительными затратами или образованием вторичных загрязнений [2, 6]; применение некоторых методов ограничивается строгими требованиями к составу воды [12, 13] и т. д.

Рядом преимуществ перед другими существующими методами очистки воды обладают адсорбционные методы [21, 24]. Они характеризуются достаточной простотой аппаратного исполнения, способностью извлекать из воды многие органические вещества, в том числе биологически стойкие, не удаляемые другими методами, а также отсутствием вторичных загрязнений [22, 23]. На основании вышеизложенного особую актуальность приобретают работы, направленные на совершенствование технологий адсорбционной очистки сточных вод, содержащих ароматические соединения, для минимизации их антропогенного воздействия на окружающую среду.

Перечисленные причины служат предпосылкой к созданию методов и средств сорбционной очистки, которые позволяли бы эффективно извлекать нитропроизводные бензола из сточных вод предприятий различного профиля. Востребованным в практике является использование

новых адсорбционных материалов на основе модифицированных разными способами бентонитов. В данном направлении имеется ряд публикаций отечественных и зарубежных авторов [3, 17, 18 и др.], однако информация по созданию адсорбционных фильтров с загрузками из модифицированных разными способами бентонитов для очистки производственных сточных вод от нитропроизводных бензола в литературе отсутствует. Тем не менее химическая модификация бентонитов органическими веществами, такими как углеродные нанотрубки, глицерин и др., способствует увеличению удельной поверхности бентонитового адсорбента, повышая тем самым его адсорбционную способность [11, 20]. В этой связи работа, посвященная исследованию сорбционных свойств бентонитов, модифицированных разными органическими составляющими, для установления их адсорбционных характеристик и выявления наибольшей адсорбционной активности по отношению к *n*-динитробензолу как представителю нитропроизводных бензола, является важной и нужной.

Цель работы — изучение механизма адсорбции *n*-динитробензола модифицированными бентонитами в статических условиях. Представитель нитропроизводных бензола *n*-динитробензол чаще всего поступает в природную водную среду вместе со сточными водами красильной промышленности, производства взрывчатых веществ и органического синтеза, а также в составе стоков фарминдустрии, обладает высокой токсичностью. Ввиду этого актуальна задача поиска эффективных сорбционных материалов на основе бентонита для очистки сточных вод предприятий от данного соединения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение процесса адсорбции *n*-динитробензола бентонитовыми сорбционными материалами в статических условиях;
- установление вида адсорбции *n*-динитробензола на немодифицированном и модифицированном бентонитах;
- выбор варианта модифицированного бентонита для наиболее эффективной очистки сточных вод от *n*-динитробензола.

Методы и материалы

Исследования выполнены на базе Научно-образовательного центра «Промышленная экология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Основными методами исследования стали физическое моделирование процесса адсорбции и фотометрия с последующей статистической обработкой результатов эксперимента [9].

Для исследований были выбраны образцы немодифицированного и модифицированного органическими составляющими гранулированных бентонитов, являющихся авторской разработкой НПП «ЛИССКОН» (г. Саратов):

- № 1 — бентонит, немодифицированный гранулированный;
- № 2 — бентонит, модифицированный углеродными нанотрубками (УНТ), после термической обработки (ТО) при температуре 550 °С;
- № 3 — бентонит, модифицированный глицерином, ТО при температуре 550 °С;
- № 4 — бентонит, модифицированный глицерином и УНТ, ТО при температуре 550 °С.

Для модифицирования и дальнейших исследований был выбран бентонит Саригюхского глиняного месторождения, который в больших количествах импортируется в Россию из Армении и обладает хорошими адсорбционными свойствами. Содержание в нем монтмориллонита составляет почти 90 %. Промышленные запасы этого месторождения в настоящее время составляют более 70 млн т. Приблизительный химический состав Саригюхского бентонита [1] приведен в табл. 1.

Предварительно проведенный анализ химического состава и свойств указанного бентонита позволил выделить его в качестве объекта исследований.

Результаты исследования и обсуждение

1. Обоснование адсорбционной способности немодифицированного и модифицированных бентонитов предполагает изучение их характеристик адсорбции в лабораторных условиях.

Оценка параметров эффективности сорбции проводилась путем установления равновесных концентраций C_p органических веществ. В каждом эксперименте C_p *n*-динитробензола определялась по установившимся значениям концентрации изучаемого вещества во времени.

Величина адсорбции определялась по зависимости [16, 19]

$$\Gamma_i = \frac{(C_{0i} - C_{pi}) \cdot V}{m}, \text{ мг/г}, \quad (1)$$

где C_{0i} — исходная концентрация ароматического вещества в растворе; C_{pi} — равновесная концентрация ароматического вещества в растворе, мг/дм³; V — объем раствора, л; m — масса навески бентонита, г.

Статическая обменная емкость (СОЕ) (мг-экв/г) в соответствии с [4, 5] равна $COE = \Gamma_{\infty}$, Γ_{∞} — предельное значение величины адсорбции, выраженное в мг-экв/г.

Для определения коэффициента межфазного распределения K_d (мг/дм³) *n*-динитробензола между фазой сорбционного материала и водной фазой необходимо было использовать формулу [15]:

$$K_d = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{C_p m}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим

$$K_d = \frac{COE}{C_p}. \quad (3)$$

Степень адсорбционного извлечения S (%) *n*-динитробензола на изучаемых сорбционных материалах определялась по формуле [14]

$$S = \frac{C_0 - C_p}{C_0} 100 \%. \quad (4)$$

Характеристики эффективности изучаемых сорбционных материалов по отношению к *n*-динитробензолу приведены в табл. 2.

Исследования механизма взаимодействия *n*-динитробензола с изучаемыми сорбционными материалами осуществлялись в соответствии

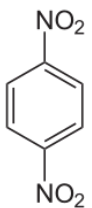
Таблица 1

Химический состав Саригюхского бентонита

Химическое соединение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	FeO	MnO
Доля, %	65,86	9,98	7,57	2,32	1,75	0,91	0,49	0,46	0,43	0,04

Таблица 2

Адсорбционные характеристики сорбентов по отношению к *p*-динитробензолу

Вещество	Вид модификации бентонита	СОЕ, мг-экв/г	K_d , мг/дм ³	S , %
	Немодифицированный бентонит	1,120±0,120	0,040±0,010	60,00±6,43
	Бентонит, модифицированный УНТ	1,560±0,150	0,141±0,080	83,57±8,35
	Бентонит, модифицированный глицерином	1,340±0,230	0,082±0,009	76,64±2,41
	Бентонит, модифицированный глицерином и УНТ	1,270±0,199	0,058±0,012	68,43±2,18

с моделями сорбции Ленгмюра, Фрейндлиха и Бронауэра–Эммета–Тейлера.

Изотермы адсорбции *p*-динитробензола на немодифицированном и модифицированном бентонитах показаны на рис. 1, на изучаемых сорбционных материалах в линейаризованной по Ленгмюру форме — на рис. 2, а в линейаризованной по Фрейндлиху форме — на рис. 3.

Расчетные данные по моделям адсорбции *p*-динитробензола на немодифицированном и модифицированных бентонитах в рамках моделей Ленгмюра и Фрейндлиха приведены в табл. 3. Построение изотерм адсорбции *p*-динитробензола, линейаризованных в соответствии с моделью БЭТ, показало нецелесообразность описания этих адсорбционных процессов данной моделью ($R^2 = 0,11$).

Представленные в табл. 3 уравнения адсорбции показывают, что наиболее точно данный процесс описывается в рамках изотермы Ленгмюра, а наибольшая эффективность адсорбции *p*-динитробензола из водного раствора имеет место при использовании бентонита, модифицированного УНТ.

2. Для определения вида адсорбции *p*-динитробензола на изучаемых сорбционных материалах применялся подход Дубинина–Радушкевича.

Значения C_p определялись экспериментально при температурах 20–60 °С, что позволило рассчитать значения потенциала Поляни ϵ . При расчете величины средней свободной энергии адсорбции в качестве начальной концентрации выбрали максимальную исследованную концентрацию *p*-динитробензола в растворе $C_0 = 0,000413$ моль/дм³.

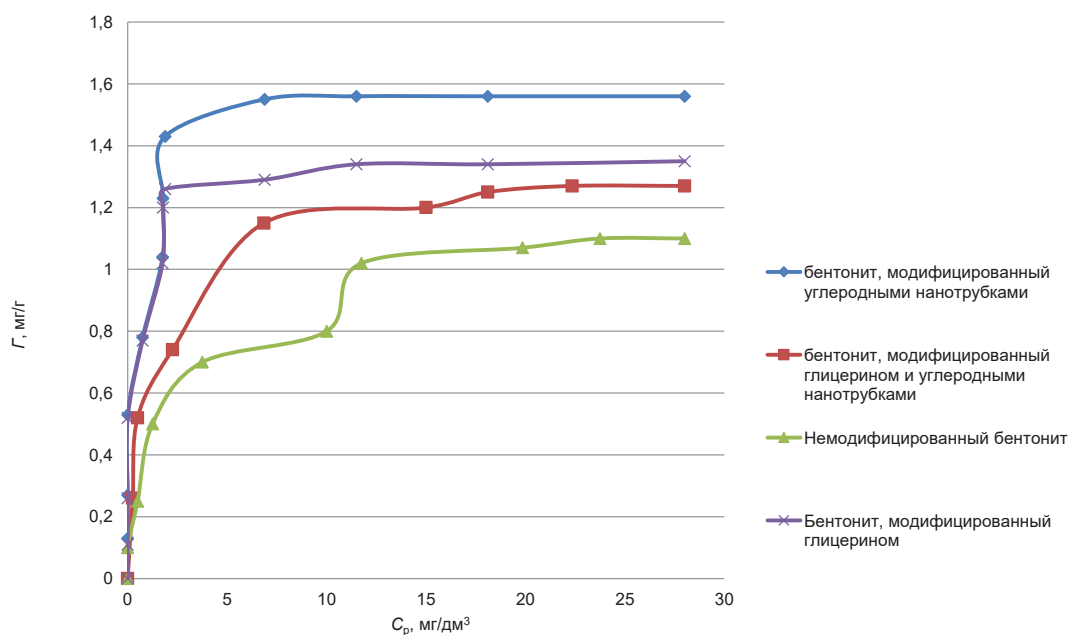


Рис. 1. Изотермы адсорбции *p*-динитробензола на модифицированном и немодифицированном бентонитах в статических условиях

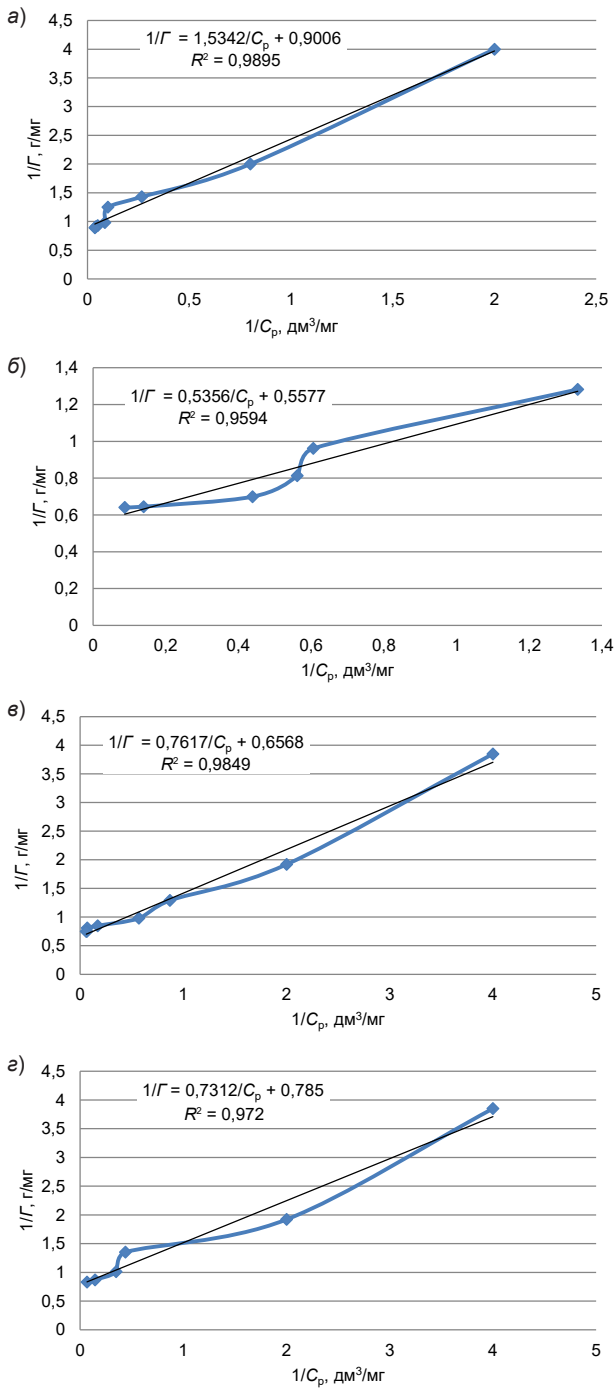


Рис. 2. Линеаризованные по Ленгмюру изотермы адсорбции *p*-динитробензола на бентоните: а — немодифицированном; б — модифицированном УНТ; в — модифицированном глицерином; г — модифицированном УНТ и глицерином

Изменения параметра $\ln \Gamma$ в функции величины ε^2 для *p*-динитробензола приведены на рис. 4.

В выбранном интервале температур зависимости параметра адсорбции от величины ε^2 для *p*-динитробензола позволили в соответствии с ли-

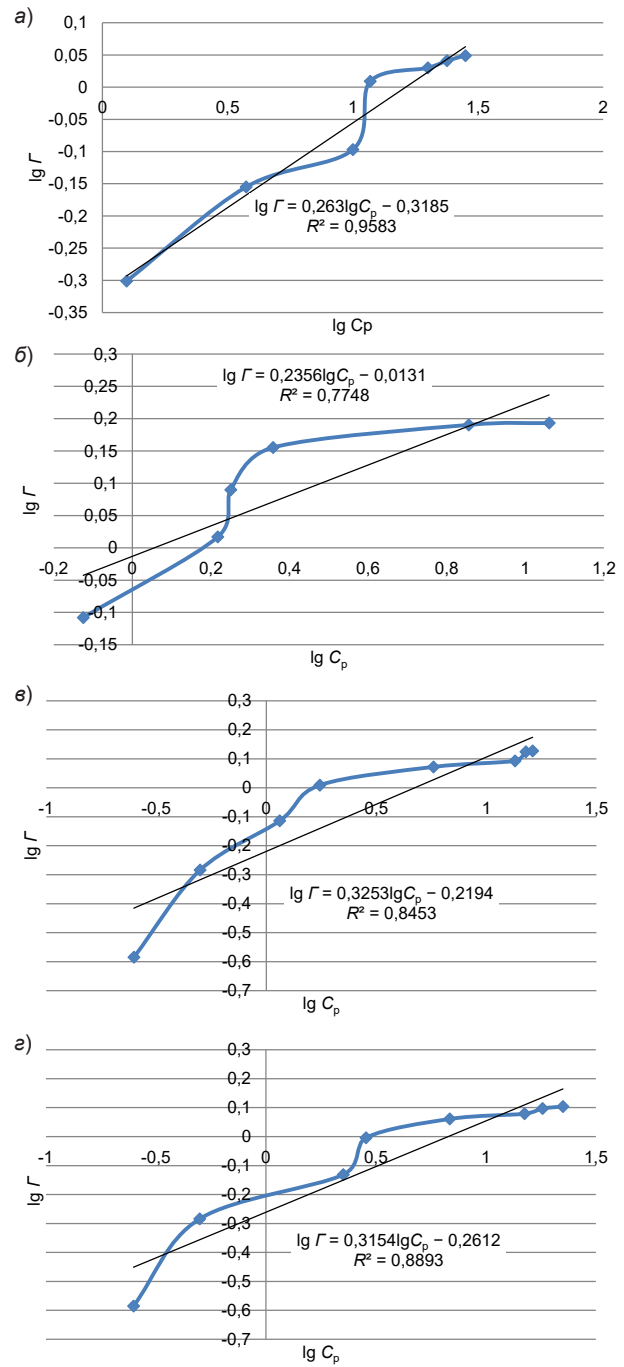


Рис. 3. Линеаризованные по Фрейндлиху изотермы адсорбции *p*-динитробензола на бентоните:

а — немодифицированном; б — модифицированном УНТ; в — модифицированном глицерином; г — модифицированном УНТ и глицерином

тературой [7] установить значения коэффициента (константы) k . Модель Дубинина–Радушкевича указывает на природу адсорбции адсорбата на адсорбенте и позволяет рассчитать среднюю свободную энергию адсорбции по формуле [7]

Таблица 3

Данные по адсорбции *n*-динитробензола

Изотермы Ленгмюра				
Адсорбент	Уравнение	K_L , л/мг	Γ_∞ , мг/г	R^2
Немодифицированный бентонит	$1/\Gamma = 1,513/C_p + 0,932$	0,616	1,073	0,989
Бентонит, модифицированный УНТ	$1/\Gamma = 0,536/C_p + 0,558$	1,041	1,792	0,959
Бентонит, модифицированный глицерином	$1/\Gamma = 0,762/C_p + 0,657$	0,862	1,522	0,985
Бентонит, модифицированный глицерином и УНТ	$1/\Gamma = 0,731/C_p + 0,785$	1,074	1,274	0,972
Изотермы Фрейндлиха				
Адсорбент	Уравнение	K_{Fr} (мг/г)·(л/мг) ^{1/n}	n	R^2
Немодифицированный бентонит	$\lg \Gamma = 0,263 \lg C_p - 0,319$	0,480	3,802	0,958
Бентонит, модифицированный УНТ	$\lg \Gamma = 0,236 \lg C_p - 0,013$	0,971	4,237	0,775
Бентонит, модифицированный глицерином	$\lg \Gamma = 0,325 \lg C_p - 0,219$	0,604	3,077	0,845
Бентонит, модифицированный глицерином и УНТ	$\lg \Gamma = 0,315 \lg C_p - 0,261$	0,549	3,175	0,889

$$E = (-2k)^{-0,5}, \quad (5)$$

где k — константа (моль²/кДж²), связанная с энергией адсорбции.

Полученные значения средней свободной энергии адсорбции E приведены в табл. 4.

Проведенные исследования показывают, что значение средней свободной энергии E адсорбции *n*-динитробензола при изменении температуры экспериментов от 20 до 60 °С изменяются

в диапазоне 11–20 кДж/моль. Это указывает на то, что в процессе адсорбции *n*-динитробензола изучаемыми сорбционными материалами на основе бентонита имеет место не только физическая адсорбция, но и хемосорбция [7, 10].

Заключение

Выполненные исследования позволили установить адсорбционные характеристики сорбционных материалов на основе бентонита, моди-

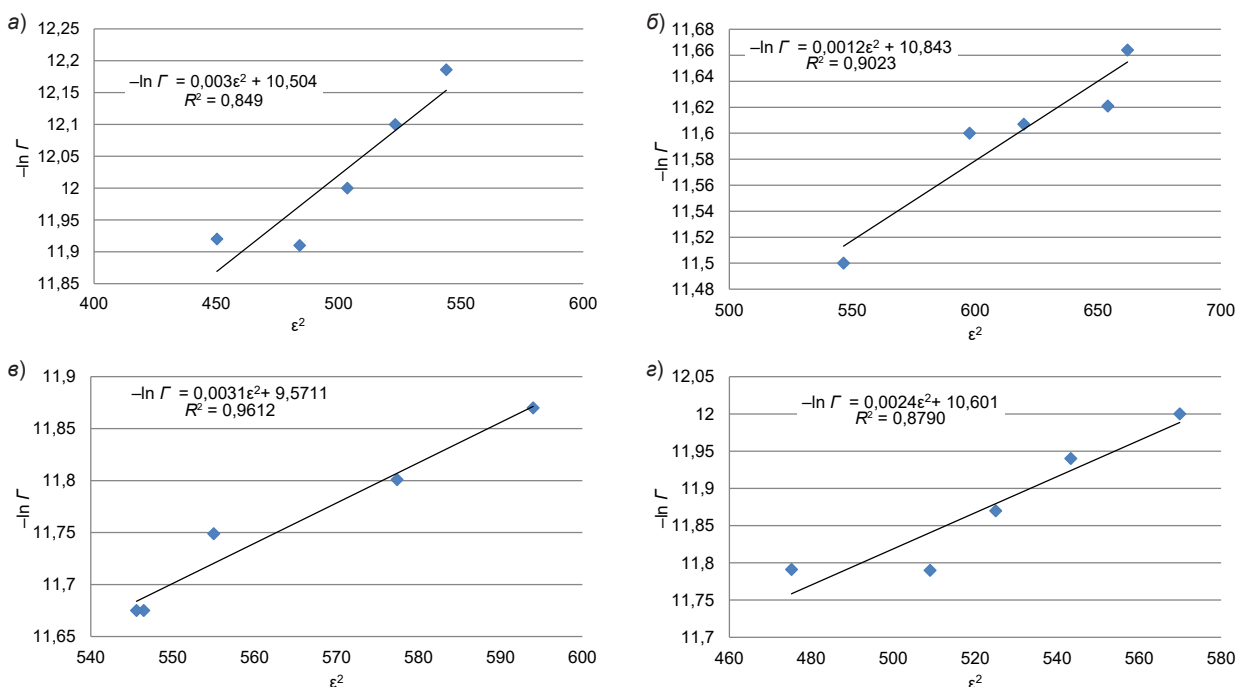
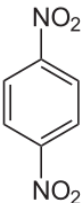


Рис. 4. Зависимость параметра адсорбции от значения ϵ^2 для адсорбции *n*-динитробензола в статических условиях на бентоните: а — немодифицированном; б — модифицированном УНТ; е — модифицированном глицерином; e — модифицированном УНТ и глицерином

Таблица 4

Значения средней свободной энергии адсорбции E (кДж/моль)

Органическое вещество	Вид модификации бентонита	Коэффициент k , ммоль ² /кДж ²	E , кДж/моль
	Немодифицированный бентонит	-0,0030	13,16±0,94
	Бентонит, модифицированный УНТ	-0,0010	20,41±2,01
	Бентонит, модифицированный глицерином	-0,0030	11,36±0,83
	Бентонит, модифицированный глицерином и УНТ	-0,0020	14,49±1,13

фицированного органическими составляющими, и немодифицированного по отношению к *n*-динитробензолу как одному из типичных представителей нитропроизводных бензола.

Анализ изотерм адсорбции *n*-динитробензола на модифицированных и немодифицированном бентонитах в статических условиях показал, что наиболее точно процесс описывается в рамках изотермы Ленгмюра. В данном случае формируются мономолекулярные слои адсорбата на поверхности адсорбента. При этом энергия равномерно распределена вдоль поверхности «адсорбент-адсорбат». Таким образом, исследования адсорбции *n*-динитробензола показали наилучший результат адсорбции на бентоните, модифицированном УНТ (после термической обработки при 550 °С). Наихудший результат адсорбции из всех исследованных адсорбентов показал немодифицированный бентонит. Добавки глицерина к бентониту, модифицированному УНТ, несколько снижают эффективность взаимодействия адсорбата с алюмосиликатом и УНТ, что можно объяснить собственной адсорбцией глицерина на компонентах сорбционного материала и сокращением количества адсорбционных центров.

Значения средней свободной энергии адсорбции *n*-динитробензола при изменении температуры от 20 до 60 °С варьируются в диапазоне 11–20 кДж/моль, что указывает на наличие хемосорбции.

Полученные результаты позволяют повысить эффективность адсорбционной очистки промышленных сточных вод от *n*-динитробензола путем применения сорбционного материала на основе бентонита, модифицированного УНТ.

Данная работа является результатом выполнения НИР в рамках гранта для победителей кон-

курсного отбора проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (Госзадание Минобрнауки РФ, проект 5.3922.2017/ПЧ).

Литература

1. Авакян, Т. А., Князян, Н. Б. и Арутюнян Н. М. (2011). Новое минеральное сырье Воротан-Горисского диатомитового бассейна и перспективы его использования. Известия НАН РА. Науки о Земле, Т. 64, № 2, сс. 43–53.
2. Ананьева, В. Л., Ананьев, В. А., Кононов, И. И. и Рябых, С. М. (2003). Озонирование как метод окисления 2-меркаптобензтиозола на стадии предочистки. Химия и химическая технология, Т. 46, № 6, сс. 122–125.
3. Бадмаева, С. В. и Ханхасаева, С. Ц. (2014). Оценка эффективности сорбции ионов железа на бентонитовой глине Мухорталинского месторождения. Вода: химия и экология, № 5 (71), сс. 110–115.
4. Белов, П. С., Голубева, И. А. и Низова, С. А. (1991). Экология производства химических продуктов из углеводородов нефти и газа: учеб. для вузов. М.: Химия, 256 с.
5. Волков, В. А. (2015). Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. 2-е изд. СПб: Лань, 672 с.
6. Жалсанова, Д. Б., Батоева, А. А., Рязанцев, А. А. и Цыденова, О. В. (1999). Изучение возможностей метода гальванокоагуляции для очистки сточных вод красильных производств. В: Устойчивое развитие: проблемы охраняемых территорий и традиционное природопользование в Байкальском регионе. Улан-Удэ, Байкальский институт природопользования СО РАН, сс. 201–202.
7. Зеленцов, В. И. и Дацко, Т. Я. (2012). Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия-фтор. Электронная обработка материалов, Т. 48, № 6, сс. 65–73.
8. Истрашкина, М. В. и Атаманова, О. В. (2019). Результаты мониторинга открытых водоемов Саратовской области. В: Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. трудов по материалам 9-й Международной научно-практической конференции. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю. А., сс. 138–141.

9. Коренман, И. М. (2012). Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений. М.: Книга по требованию, 342 с.

10. Краснов, К. С. (ред.) (1995). Физическая химия: учебник для вузов. Т. 2. 2-е изд. М.: Высшая школа, 319 с.

11. Косарев, А. В., Атаманова, О. В., Тихомирова, Е. И. и Истрашкина, М. В. (2018). Кинетика адсорбции 2-метиланилина модифицированным бентонитом при очистке сточных вод. Вода и экология: проблемы и решения, Т. 3 (75), сс. 24–31. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.3.24–31.

12. Перевалов, В. П. и Колдобский, Г. И. (2018). Тонкий органический синтез: проектирование и оборудование производств: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Юрайт, 290 с.

13. Полетаева, М. А. и Свириденко, Г. Н. (2002). Совершенствование технологии очистки воды в производстве диафена с целью снижения нагрузки на водные экосистемы. В: Тезисы докладов IX Всероссийской СК «Экология и проблемы защиты окружающей среды». Красноярск, Красноярский государственный университет, сс. 242–243.

14. Рубцов, М. В. и Байчилов, А. Г. (1971). Синтетические химико-фармацевтические препараты: справ. М.: Медицина, 328 с.

15. Смирнов, А. Д. (1982). Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 168 с.

16. Швердяев, О. Н., Бобров, А. П., Корнев, А. Е., Швердяева, Н. В., Черник, Г. Г. и Крынкина, В. Н. (2007). Влияние высокодисперсных порошков шунгита и «термина» на свойства резиновых смесей и резин на основе бутадиен-нитрильного каучука. Каучук и резина, № 3, сс. 13–14.

17. Cheraghian, G. (2017). Evaluation of clay and fumed silica nanoparticles on adsorption of surfactant polymer during enhanced oil recovery. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, Vol. 60, Issue 2, pp. 85–94. DOI: 10.1627/jpi.60.85.

18. Foo, K. Y. and Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 156, Issue 1, pp. 2–10. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.

19. Hanaor, D. A. H., Ghadiri, M., Chrzanowski, W. and Gan, Y. (2014). Scalable surface area characterization by electrokinetic analysis of complex anion adsorption. *Langmuir*, Vol. 30, Issue 50, pp. 15143–15152. DOI: 10.1021/la503581e.

20. Ismadji, S. (2015). Modification of clay minerals for adsorption purpose. In: Ismadji, S., Soetaredjo, F. E. and Ayucitra, A. Clay materials for environmental remediation. Cham: Springer International Publishing, pp. 39–56.

21. Khenifi, A., Bouberka, Z., Sekrane, F., Kameche, M. and Derriche, Z. (2007). Adsorption study of an industrial dye by an organic clay. *Adsorption*, Vol. 13, Issue 2, pp. 149–158. DOI: 10.1007/s10450-007-9016-6.

22. Ma, J., Xu, H., Ren, J.-H., Yu, Z.-Z. and Mai, Y.-W. (2003). A new approach to polymer/montmorillonite nanocomposites. *Polymer*, Vol. 44, Issue 16, pp. 4619–4624. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00362-8.

23. Maramis, S. V., Kurniawan, A., Ayucitra, A., Sunarso, J. and Ismadji, S. (2012). Removal of copper ions from aqueous solution by adsorption using LABORATORIES-modified bentonite (organo-bentonite). *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, Vol. 6, Issue 1, pp. 58–66. DOI: 10.1007/s11705-011-1160-6.

24. Miyamoto, N., Kawai, R., Kuroda, K. and Ogawa, M. (2000). Adsorption and aggregation of a cationic cyanine dye on layered clay minerals. *Applied Clay Science*, Vol. 16, Issues 3–4, pp. 161–170. DOI: 10.1016/S0169-1317(99)00051-4.

References

1. Avagyan, T. A., Kniazian, N. B. and Harutiunyan, N. M. (2011). New mineral raw materials Vorotan-Goris diatomite-bearing basin and prospects of its use. Proceedings of NAS of RA. Earth Sciences, Vol. 64, No. 2, pp. 43–53.

2. Ananyeva, V. L., Ananyev, V. A., Kononov, I. I. and Ryabykh, S. M. (2003). Ozonation as a method of 2-mercaptobenzothiazole oxidation at the pre-treatment stage. *Chemistry and Chemical Technology*, Vol. 46, No. 6, pp. 122–125.

3. Badmaeva, S. V., Hanhasaeva, S. Ts. (2014). Evaluation of efficiency of iron ions sorption based on bentonitic clay of the Mukhortala deposit. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 5 (71), pp. 110–115.

4. Belov, P. S., Golubeva, I. A. and Nizova, S. A. (1991). Ecology of producing chemical products from oil and gas hydrocarbons: textbook for higher educational institutions. Moscow: Khimiya, 256 p.

5. Volkov, V. A. (2015). Colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems. 2nd edition. Saint Petersburg: Lan, 672 p.

6. Zhalsanova, D. B., Batoeva, A. A., Ryazantsev, A. A. and Tsydenova, O. V. (1999). Studying the capabilities of galvanic coagulation for wastewater treatment at dyeing enterprises. In: Sustainable development: issues of protected areas and traditional nature management in the Baikal region. Ulan-Ude, BINM SB RAS, pp. 201–202.

7. Zelentsov, V. I. and Datsko, T. Ya. (2012). The use of adsorption models for description of equilibrium in the aluminum oxyhydroxide fluorine system. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, Vol. 48, No. 6, pp. 65–73.

8. Istrashkina, M. V. and Atamanova, O. V. (2019). Results of monitoring of Saratov Region water bars. In: Environmental problems of industrial cities: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, pp. 138–141.

9. Korenman, I. M. (2012). Photometric analysis. Methods for the determination of organic compounds. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 342 p.

10. Krasnov, K. S. (ed.) (1995). Physical chemistry: textbook for higher educational institutions. Vol. 2. 2nd edition. Moscow: Vysshaya Shkola, 319 p.

11. Kosarev, A. V., Atamanova, O. V., Tikhomirova, E. I. and Istrashkina, M. V. (2018). Kinetics of adsorption of 2-methylaliline by modified bentonite at sewage treatment. *Water and Ecology*, Vol. 3 (75), pp. 24–31. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.3.24–31.

12. Perevalov, V. P. and Koldobsky, G. I. (2018). Fine organic synthesis: design and equipment of production plants: study guide for higher educational institutions. 2nd edition. Moscow: URAIT, 290 p.

13. Poletaeva, M. A. and Sviridenko, G. N. (2002). Improving the technology of water purification in the production of diaphene to reduce the load on aquatic ecosystems. In: Proceedings of the 9th All-Russian Student Conference “Ecology and environmental problems”. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University, pp. 242–243.

14. Rubtsov, M. V. and Baychikov, A. G. (1971). Synthetic chemical-pharmaceutical preparations: reference book. Moscow: Meditsina, 328 p.

15. Smirnov, A. D. (1982). Sorption water purification. Leningrad: Knimiya, 168 p.

16. Sheverdyayev, O. N., Bobrov, A. P., Kornev, A. E., Sheverdyeva, N. V., Chernik, G. G. and Krynkina, V. N. (2007). Effect of high-dispersing powders of shungit and termin on properties of rubber compounds based on butadiene acrylonitrile rubbers. *Kauchuk i Rezina*, No. 3, pp. 13–14.

17. Cheraghian, G. (2017). Evaluation of clay and fumed silica nanoparticles on adsorption of surfactant polymer during enhanced oil recovery. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, Vol. 60, Issue 2, pp. 85–94. DOI: 10.1627/jpi.60.85.

18. Foo, K. Y. and Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 156, Issue 1, pp. 2–10. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.013.

19. Hanaor, D. A. H., Ghadiri, M., Chrzanowski, W. and Gan, Y. (2014). Scalable surface area characterization by electrokinetic analysis of complex anion adsorption. *Langmuir*, Vol. 30, Issue 50, pp. 15143–15152. DOI: 10.1021/la503581e.

20. Ismadji, S. (2015). Modification of clay minerals for adsorption purpose. In: Ismadji, S., Soetaredjo, F. E. and Ayucitra, A. Clay materials for environmental remediation. Cham: Springer International Publishing, pp. 39–56.

21. Khenifi, A., Bouberka, Z. Sekrane, F., Kameche, M. and Derriche, Z. (2007). Adsorption study of an industrial dye by an organic clay. *Adsorption*, Vol. 13, Issue 2, pp. 149–158. DOI: 10.1007/s10450-007-9016-6.

22. Ma, J., Xu, H., Ren, J.-H., Yu, Z.-Z. and Mai, Y.-W. (2003). A new approach to polymer/montmorillonite nanocomposites. *Polymer*, Vol. 44, Issue 16, pp. 4619–4624. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00362-8.

23. Maramis, S. V., Kurniawan, A., Ayucitra, A., Sunarso, J. and Ismadji, S. (2012). Removal of copper ions from aqueous solution by adsorption using LABORATORIES-modified bentonite (organo-bentonite). *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, Vol. 6, Issue 1, pp. 58–66. DOI: 10.1007/s11705-011-1160-6.

24. Miyamoto, N., Kawai, R., Kuroda, K. and Ogawa, M. (2000). Adsorption and aggregation of a cationic cyanine dye on layered clay minerals. *Applied Clay Science*, Vol. 16, Issues 3–4, pp. 161–170. DOI: 10.1016/S0169-1317(99)00051-4.

Авторы

Атаманова Ольга Викторовна, д-р техн. наук, профессор

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

E-mail: O_V_Atamanova@mail.ru

Тихомирова Елена Ивановна, д-р биол. наук, профессор

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Истрашкина Мария Викторовна, канд. техн. наук

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

E-mail: marietta.2011@yandex.ru

Подоксенов Артем Андреевич

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, Россия

E-mail: hosting-speech@yandex.ru

Authors

Atamanova Olga Victorovna, Dr. of Engineering, Professor
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

E-mail: O_V_Atamanova@mail.ru

Tichomirova Elena Ivanovna, Dr. of Biology, Professor
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Istrashkina Maria Victorovna, PhD in Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

E-mail: marietta.2011@yandex.ru

Podoxenov Artyom Andreevich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

E-mail: hosting-speech@yandex.ru