

ПОВЫШЕНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНТОНИТА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД ПУТЕМ ЕГО АКТИВАЦИИ

Атаманова О. В., Тихомирова Е. И., Касымбеков Ж. К., Подоксенов А. А.

IMPROVING THE SORPTION ABILITY OF MODIFIED BENTONITE DURING WASTEWATER TREATMENT BY MEANS OF ITS ACTIVATION

Atamanova O. V., Tikhomirova E. I., Kassymbekov Zh. K., Podoksenov A. A.

Аннотация

Введение. Рассматривается проблема адсорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий. В качестве сорбционных материалов предлагаются глинистые материалы — бентониты, модифицированные включением в их структуру углеродных нанотрубок и глицерина. Изучение сорбционных материалов на основе модифицированного бентонита направлено на установление таких модификаций бентонита, которые позволили бы обеспечить максимально возможное извлечение из загрязненных производственных сточных вод нитро- и аминсоединений. **Методы и материалы.** Исследования сорбционной активности бентонитов проводились на модельных растворах *o*-фенилендиамин и *p*-динитробензола. Изучены возможные кислотная (HCl) и солевая (CaCl₂) активации модифицированного бентонита. Концентрации *o*-фенилендиамин и *p*-динитробензола в фильтрате определялись методом фотометрического анализа. Статистическая обработка результатов экспериментов проводилась с помощью пакета программ Statistica for Windows 6.0. **Результаты.** Установлено, что наилучшей сорбционной способностью в статических условиях по отношению к *p*-динитробензолу обладает бентонит, модифицированный углеродными нанотрубками после активации этого сорбента 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором CaCl₂, а лучшей сорбционной способностью по отношению к *o*-фенилендиамину обладает бентонит, модифицированный углеродными нанотрубками, но после активации этого сорбента 18 %-ным раствором HCl и 38 %-ным раствором CaCl₂. Величина адсорбции *o*-фенилендиамин бентонитом, модифицированным углеродными нанотрубками, значительно выше, чем сорбция *p*-динитробензола: $\Gamma_{\infty} = 66,9$ мг/г против $\Gamma_{\infty} = 2,41$ мг/г. Подобная картина наблюдается и при сравнении значений адсорбции бентонитом, модифицированным глицерином, однако здесь разница в значениях чуть меньше: $\Gamma_{\infty} = 64,8$ мг/г против $\Gamma_{\infty} = 1,95$ мг/г. Рекомендовано назначать параметры адсорбционных фильтров цилиндрической формы в составе станций очистки сточных вод от нитро- и аминсоединений исходя из соотношения высоты к диаметру адсорбционной колонны, равного $H/D = 1,4$.

Ключевые слова: адсорбция, модифицированный бентонит, глицерин, углеродные нанотрубки, *o*-фенилендиамин, *p*-динитробензол, эффективность водоочистки.

Abstract

Introduction. The article discusses the problem of industrial wastewater treatment using adsorption. Clay materials — bentonites modified with carbon nanotubes, glycerin — are proposed as sorption materials. Studies of sorption materials based on modified bentonite are aimed at finding such bentonite modifications that would ensure the maximum extraction of nitro and amino compounds from contaminated industrial wastewater. **Methods and materials.** The studies of the sorption activity of bentonites were carried out using simulated solutions of *o*-phenylenediamine and *p*-dinitrobenzene. The authors analyzed possible acid (HCl) and salt (CaCl₂) activations of modified bentonite. They determined the concentrations of *o*-phenylenediamine and *p*-dinitrobenzene in the filtrate using photometric analysis. Statistical processing of the experimental results was performed with the use of the Statistica for Windows 6.0 software package. **Results.** It was established that bentonite modified with carbon nanotubes after the activation of this sorbent with 9 % HCl and 30 % CaCl₂ has the best sorption ability under static conditions with respect to *p*-dinitrobenzene. Bentonite modified with carbon nanotubes has the best sorption ability with respect to *o*-phenylenediamine after the activation of this sorbent with 18 % HCl and 38 % CaCl₂. The adsorption of *o*-phenylenediamine by bentonite modified with carbon nanotubes is much higher than the adsorption of *p*-dinitrobenzene: $\Gamma_{\infty} = 66.9$ mg/g compared to $\Gamma_{\infty} = 2.41$ mg/g. A similar phenomenon is observed when comparing the adsorption values of *o*-phenylenediamine and *p*-dinitrobenzene with glycerin-modified bentonite, however, here the difference in values is slightly less: $\Gamma_{\infty} = 64.8$ mg/g compared to $\Gamma_{\infty} = 1.95$ mg/g. It is recommended to set the parameters of cylindrical adsorption filters for wastewater treatment from nitro and amino compounds based on the ratio of adsorption column height to diameter equal to $H/D = 1.4$.

Keywords: adsorption, modified bentonite, glycerin, carbon nanotubes, *o*-phenylenediamine, *p*-dinitrobenzene, water treatment efficiency.

Введение

Одна из актуальных экологических проблем в мире — загрязнение гидросферы производственными сточными водами. Поэтому очистка сточных вод от экотоксикантов — важный этап технологического процесса водоотведения любого промышленного предприятия.

Современные способы очистки производственных сточных вод и сооружений представляют целый комплекс механических, физико-химических, биологических и других методов [1, 2, 4–9, 25].

Среди наиболее известных на сегодня по праву признается адсорбционная очистка сточных вод, реализуемая чаще всего как один из этапов комплексного технологического процесса водоочистки [3, 14–16]. Эффективность адсорбционной очистки во многом определяется качеством используемого сорбционного материала [15, 19, 23].

В последнее время в качестве адсорбентов хорошо себя зарекомендовали природные глинистые материалы с большим содержанием монтмориллонита [16, 18]. Эти бентонитовые глины при дополнительной обработке разными модификаторами позволяют обеспечить высокую эффективность очистки загрязненных вод (80–99 %), что делает их предпочтительными по сравнению с большинством привычных адсорбентов [3, 24]. Способность извлекать из воды тяжелые металлы, поверхностно-активные вещества, органические вещества и другие токсиканты, в том числе биологически стойкие, не удаляемые другими методами, а также отсутствие вторичных загрязнений делают бентониты особенно ценными при использовании в системах очистки производственных сточных вод [21, 22].

При изучении состава стоков производств химической, фармацевтической, лакокрасочной и других видов промышленности [13], было установлено, что сточные воды этих производств содержат в значительном количестве органические соединения, в частности нитро- и аминокро- производные бензола. Указанные производные бензола обычно не нормируются водоканалами и другими экологическими службами. Поэтому их содержание в сточных водах промышленных предприятий чаще всего неизвестно. При этом установлено, что ароматические вещества — производные бен-

зола — высокотоксичные соединения, негативно влияющие на живые организмы.

Разработка и изучение сорбционных материалов на основе модифицированного бентонита были направлены на установление таких модификаций бентонита, которые позволили бы обеспечить максимально возможное извлечение из загрязненных производственных сточных вод нитро- и аминокро- соединений. При этом изучалось изменение сорбционной способности бентонитов разных модификаций. К исследованиям были приняты несколько модификаций бентонита: углеродными нанотрубками (УНТ) и глицерином. Ранее было установлено, что каждая из этих модификаций способствует увеличению, хотя и в разной степени, удельной поверхности сорбционного материала на основе бентонита [11, 20]. Поэтому работа, посвященная исследованию сорбционной активности бентонитов, модифицированных разными органическими составляющими при разных вариантах активации по отношению к нитро- и аминокро- производным бензола, является актуальной.

Методы и материалы

Цель работы — изучение сорбционной способности бентонита, модифицированного несколькими способами (углеродными нанотрубками и глицерином) при разных вариантах активации бентонита для улучшения его сорбционных свойств по отношению к нитро- и аминокро- соединениям.

Лабораторные исследования были выполнены на базе Научно-образовательного центра «Промышленная экология» кафедры экологии Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Для активации кислотой были выбраны два варианта модифицированного бентонита, показавшие наилучшие результаты эффективности адсорбции нитро- и аминокро- производных бензола в более ранних исследованиях. Это бентонит, модифицированный УНТ, и бентонит, модифицированный глицерином [3, 11].

Основные методы исследования — физическое моделирование процесса адсорбции и фотометрия с последующей статистической обработкой результатов эксперимента [10].

Исследования проводились с образцами бентонита, модифицированного УНТ, и бентонита,

модифицированного глицерином. Модификация образцов бентонита осуществлялась НПП «ЛИССКОН» (г. Саратов). Исходные образцы модифицированного бентонита включали:

- бентонит, модифицированный УНТ, после термической обработки (ТО) при 550 °С;
- бентонит, модифицированный глицерином, после ТО при 550 °С.

В качестве представителя аминопроизводных бензола выбран *o*-фенилендиамин, наиболее распространенный в сточных водах красильных, лакокрасочных, текстильных и других производств, а нитропроизводных бензола — *n*-динитробензол, встречающийся в сточных водах химических производств, производства взрывчатых веществ и др.

Варианты активации исходных вариантов модифицированного бентонита:

- 1) № 1 — активация 9 %-ным раствором соляной кислоты (HCl);
- 2) № 2 — активация 18 %-ным раствором соляной кислоты (HCl);
- 3) № 3 — активация 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором хлористого кальция CaCl₂;
- 4) № 4 — активация 18 %-ным раствором HCl и 38 %-ным раствором хлористого кальция CaCl₂.

При кислотной активации к навеске исходного сорбционного материала (60 г) добавлялось либо 10 мл 9 %-ного раствора HCl (в дальнейшем вариант активации № 1), либо 10 мл 18 %-ного раствора HCl (в дальнейшем вариант активации № 2), в зависимости от выбранного способа, после чего бентонитовые гранулы в растворе кислоты интенсивно перемешивались в течение часа и оставлялись на 6 часов в стакане с раствором кислоты. После выдерживания в кислоте раствор удалялся, а гранулы промывались до полной нейтрализации кислотности воды, получаемой после промывания, и оставлялись на воздухе для получения воздушно-сухой навески.

При смешанной активации этап кислотной активации аналогичен описанному выше, но после удаления кислоты, не получая воздушно-сухую навеску, полученный бентонит в течение часа выдерживали с периодическим перемешиванием в 40 мл либо 30 %-ного раствора CaCl₂ (в дальнейшем вариант активации № 3), либо 38 %-ного раствора CaCl₂ (в дальнейшем вариант активации № 4). Процедура активации раствором CaCl₂

повторялась трижды для достаточного замещения катионов в межслоевом пространстве. После промывания гранул от остатка раствора соли CaCl₂ проверялось наличие в промываемой воде ионов Ca²⁺ титрованием промытой воды раствором трилона Б по методике [12].

Определение концентраций *o*-фенилендиамина и *n*-динитробензола в фильтрате проводилось методом фотометрического анализа [10].

Статическая сорбция *n*-динитробензола осуществлялась при помощи модельных растворов концентраций: 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 55 и 60 мг/дм³. Определение статической сорбции *o*-фенилендиамина осуществлялось при помощи модельных растворов этого вещества следующих концентраций: 10, 30, 50, 100, 300, 500, 700, 900, 1500, 2000, 2500 и 3000 мг/дм³.

Сорбционная способность выбранных модификаций бентонита с разными способами активации оценивалась по отношению к *o*-фенилендиамину и *n*-динитробензолу сначала в статических условиях процесса сорбции.

Величина адсорбции производных бензола в статических условиях рассчитывалась по уравнению [10, 17]:

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

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).

Результаты исследования и обсуждение

Полученные в ходе исследования изотермы адсорбции *n*-динитробензола и *o*-фенилендиамина в статических условиях для разных вариантов активации выбранных модификаций бентонита показаны на рис. 1–4.

Обобщение и анализ приведенных изотерм показывают, что:

- бентонит, модифицированный УНТ, обеспечивает лучшую сорбцию *n*-динитробензола после активации этого сорбента 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором CaCl₂ (вариант активации № 3). При этом эффект сорбции превосходит ближайший по величине предельного значения сорбции бентонита (вариант активации № 4 — 18 %-ным раствором HCl и 38 %-ным CaCl₂) на 7,7 %;

– активация бентонита, модифицированного глицерином, с таким же составом используемых растворов позволяет обеспечивать сорбцию, превосходящую показатель варианта активации № 4 на 14,5 %;

– наихудший эффект сорбции *n*-динитробензола показывает бентонит обеих модификаций, не подвергавшийся активации. При этом по значениям предельной величины сорбции бентонит, модифицированный УНТ без активации, уступает ближайшему к нему бентониту с вариантом активации 9 %-ным раствором HCl (вариант активации № 1) на 6,6 %, а варианту с лучшими показателями — на 58 %. Бентонит, модифицированный глицерином без активации, уступает ближайшему к нему бентониту с вариантом активации 9 %-ным раствором HCl (вариант активации № 1) на 9,4 %, а варианту с лучшими показателями — на 52,3 %;

– дополнительная активация бентонита обеих модификаций при помощи CaCl₂ вызывает значительное увеличение предельной величины сорбции для варианта с активацией 9 %-ным раствором HCl и менее значительное для варианта с активацией 18 %-ным раствором HCl. Так, для бентонита, модифицированного УНТ, и для варианта активации № 1 увеличение предельной величины сорбции после дополнительной солевой активации CaCl₂ (вариант активации № 3) составляет 45,5 % или 0,75 мг/г в абсолютных величинах; для этой же модификации бентонита для

варианта активации № 2 увеличение предельной величины сорбции после дополнительной солевой активации CaCl₂ (вариант активации № 4) составляет 21,1 % или 0,4 мг/г. Для бентонита, модифицированного глицерином, и для варианта активации № 1 увеличение предельной величины сорбции после дополнительной солевой активации CaCl₂ (вариант активации № 3) составляет 39,3 % или 0,55 мг/г в абсолютных величинах; для варианта активации № 2 бентонита, модифицированного глицерином, после дополнительной обработки CaCl₂ увеличение показателей эффективности сорбции составило 22,7 % или 0,34 мг/г;

– активация модифицированного бентонита 18 %-ным раствором кислоты более успешна, чем активация 9 %-ным раствором. Однако при последующей активации раствором CaCl₂ наблюдается некоторое превосходство варианта активации 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором CaCl₂ (вариант активации № 3) по сравнению с другими вариантами.

Этот факт объясняется тем, что при кислотной активации в бентоните образуется множество макро- и микропор; макропоры появляются за счет вымывания из кристаллической решетки бентонита металлов, что способствует увеличению удельной поверхности сорбционного материала. При использовании высоких концентраций кислот может наблюдаться нарушение упорядоченности структуры бентонита.

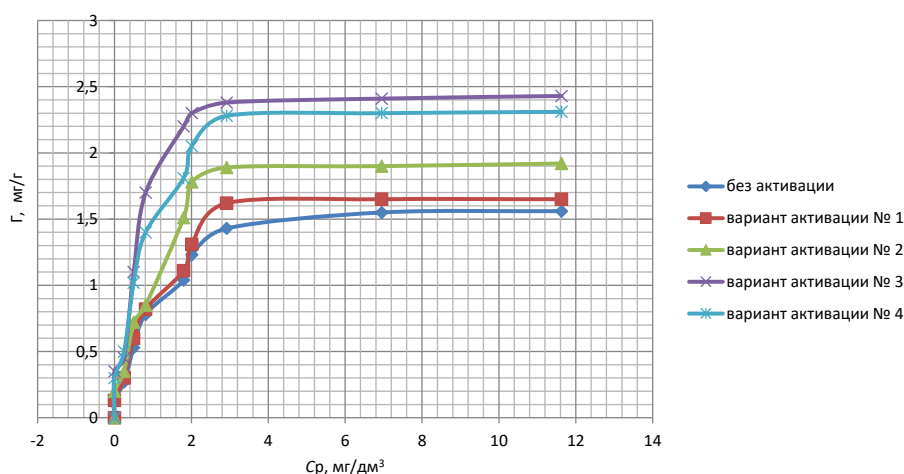


Рис. 1. Изотермы адсорбции *n*-динитробензола на бентоните, модифицированном УНТ в статических условиях

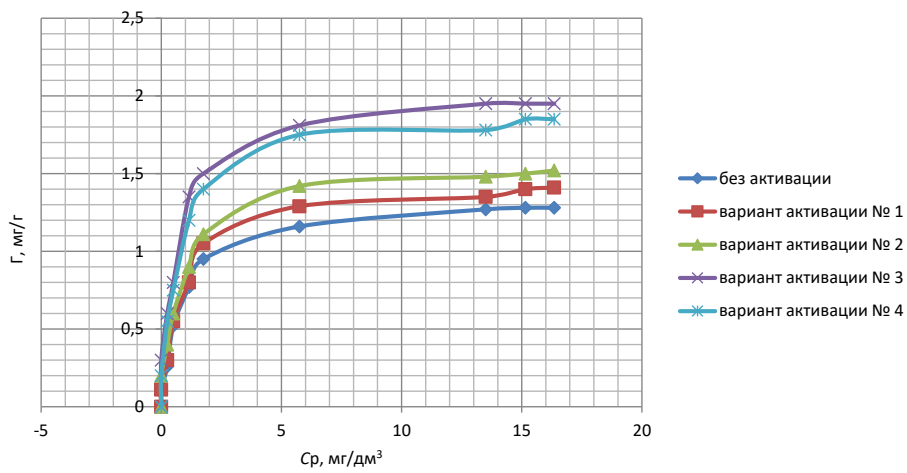


Рис. 2. Изотермы адсорбции *p*-динитробензола на бентоните, модифицированном глицерином в статических условиях

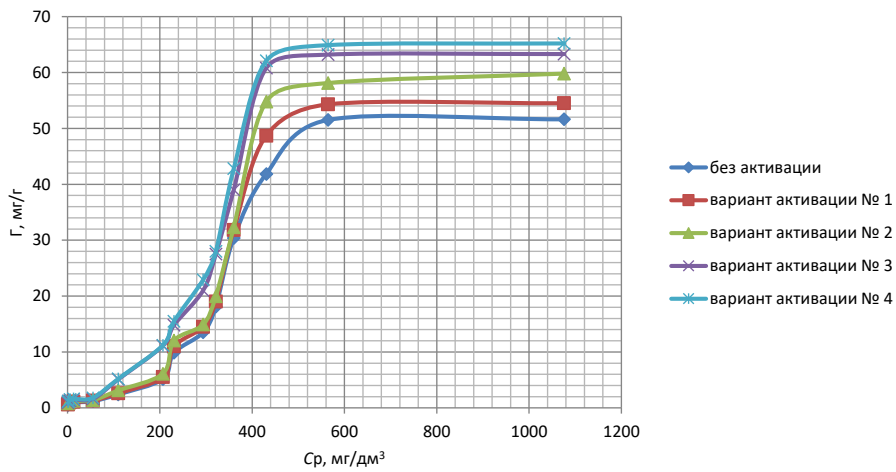


Рис. 3. Изотермы адсорбции *o*-фенилендиамина на бентоните, модифицированном УНТ в статических условиях

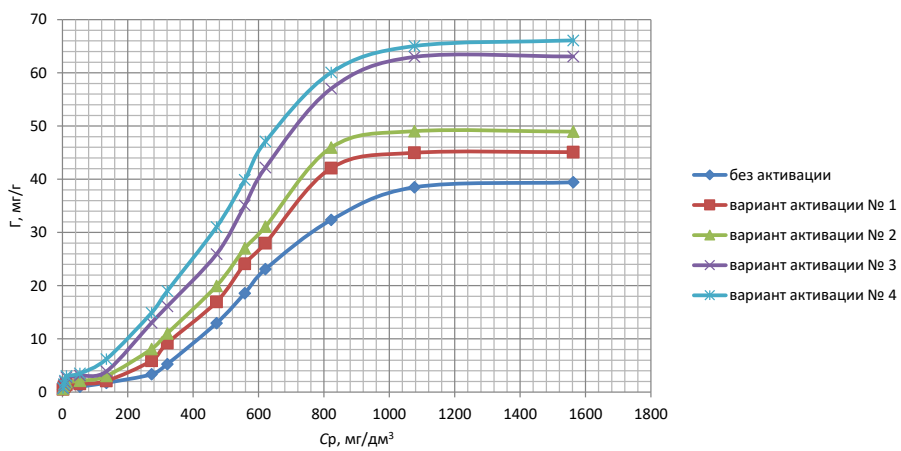


Рис. 4. Изотермы адсорбции *o*-фенилендиамина на бентоните, модифицированном глицерином в статических условиях

доченности слоев и их «обламывание», чем в случае активации более слабым раствором кислоты.

Как видно из изотерм адсорбции *o*-фенилендиамина бентонитом, модифицированным УНТ, а также бентонитом, модифицированным глицерином, тенденции их развития существенной разницы в сравнении с вышерассматриваемыми вариантами активизации не имеют. Некоторые отклонения по величине предельного значения сорбции при использовании растворов в тех же составах составляют в допустимых пределах.

Следующим этапом исследований являлась оценка сорбционной способности бентонита, модифицированного глицерином, а также бентонита, модифицированного УНТ по отношению к *n*-динитробензолу и *o*-фенилендиамину в динамических условиях при разных соотношениях диаметра и высоты загрузки сорбционного материала в делительной воронке. При этом вес воздушно-сухой навески сорбционного материала составлял 50 г. Модельные растворы *n*-динитробензола и *o*-фенилендиамина, приготовление которых описано выше, пропускались через адсорбент с одинаковой скоростью 0,17 см/мин или $2,8 \cdot 10^{-5}$ м/с. Измерения проводились после получения каждых 10 мл фильтрата.

При исследовании динамики процесса определялся важный параметр, требуемый в промышленности, — точка проскока (объем жидкости, пропущенный через загрузку сорбента, при котором сорбент теряет защитные свойства). Также определялось соотношение высоты *H* загрузки и ее диаметра *D*, при котором эффективность сорбционного материала будет наибольшей. Для сравнения использовались лучшие по показателям сорбции, определенные при испытаниях в статических условиях бентониты после вариантов активации № 3 и № 4, а также исходные бентониты, модифицированные УНТ и глицерином.

На основании априорного ранжирования было выбрано три соотношения высота/диаметр загрузки:

– *H* = 0,07 м, *D* = 0,03 м, соотношение *H/D* = 2,3;

– *H* = 0,055 м, *D* = 0,04 м, соотношение *H/D* = 1,4;

– *H* = 0,04 м, *D* = 0,05 м, соотношение *H/D* = 0,8.

Динамическая емкость (ДЕ) изучаемых сорбционных материалов рассчитывалась по формуле [4]:

$$ДЕ = \frac{V_{пр} \cdot C}{V_3}, \quad (2)$$

где $V_{пр}$ — объем раствора, прошедшего через фильтр до проскока, дм³; *C* — концентрация веществ в растворе, мг/дм³; V_3 — объем загрузки, дм³.

Результаты исследований адсорбции *n*-динитробензола с указанием объема раствора, пропущенного через загрузку бентонита, модифицированного как УНТ, так и глицерином, вариантов активации № 3 и № 4 при разных соотношениях *H/D* загрузки до проскока представлены в табл. 1 и 2.

Данные, приведенные в этих таблицах, показывают, что сорбционная способность бентонита, модифицированного глицерином, а также бентонита, модифицированного УНТ, по отношению к *n*-динитробензолу и *o*-фенилендиамину в динамических условиях зависит от рационального соотношения диаметра и высоты загрузки сорбционного материала в делительной воронке. Как видно из полученных материалов, наибольшее значение сорбционного показателя достигнуто при соотношении высоты к диаметру адсорбционной колонны, равном *H/D* = 1,4.

При испытании в динамических условиях наблюдается лучшая сорбционная способность по отношению к *n*-динитробензолу у бентонита обеих модификаций при его активации 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором хлористого кальция CaCl₂. Улучшение сорбционной способности у модифицированного бентонита по отношению к *o*-фенилендиамину в динамических условиях происходило при активации сорбента 18 %-ным раствором HCl и 38 %-ным раствором хлористого кальция CaCl₂.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие **выводы**:

Наилучшей сорбционной способностью в статических условиях по отношению к *n*-динитробензолу обладает бентонит, модифицированный УНТ, после активации его 9 %-ным раствором HCl и 30 %-ным раствором CaCl₂. При этом эффект сорбции в сравнении с состоянием сорбента до активации превышает в 1,6 раз, а бентонит, модифицированный глицерином, — в 1,8 раз.

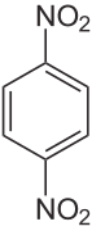
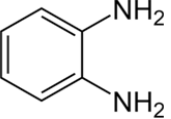
Таблица 1

Результаты определения точки проскока для различных вариантов параметров загрузки бентонита, модифицированного УНТ

Вещество	Вариант активации бентонита	Высота и диаметр загрузки, м	Объем раствора, пропущенного через загрузку до точки проскока, мл	Динамическая емкость до проскока, мг/дм ³
	Неактивированный модифицированный бентонит	$H = 0,07; D = 0,03$	65,0±5,4	2,1±0,1
		$H = 0,055; D = 0,04$	135,0±3,1	2,9±0,1
		$H = 0,04; D = 0,05$	100,0±0,0	2,5±0,2
	Вариант активации № 3	$H = 0,07; D = 0,03$	95,0±1,5	3,3±0,3
		$H = 0,055; D = 0,04$	220,0±8,5	3,9±0,2
		$H = 0,04; D = 0,05$	200,0±5,5	3,5±0,4
	Вариант активации № 4	$H = 0,07; D = 0,03$	95,0±5,4	2,5±0,1
		$H = 0,055; D = 0,04$	200,0±10,0	3,4±0,4
		$H = 0,04; D = 0,05$	170,0±7,5	3,1±0,3
	Неактивированный бентонит	$H = 0,07; D = 0,03$	75,0±2,2	29,1±1,0
		$H = 0,055; D = 0,04$	100,0±3,4	40,2±3,2
		$H = 0,04; D = 0,05$	90,0±3,2	39,1±2,1
	Вариант активации № 3	$H = 0,07; D = 0,03$	74,0±1,0	40,0±5,3
		$H = 0,055; D = 0,04$	150,0±1,3	55,4±3,1
		$H = 0,04; D = 0,05$	120,0±5,2	42,8±2,0
	Вариант активации № 4	$H = 0,07; D = 0,03$	100,0±5,5	45,0±4,1
		$H = 0,055; D = 0,04$	150,0±5,5	56,2±1,7
		$H = 0,04; D = 0,05$	142,0±8,2	49,1±3,1

Таблица 2

Результаты определения точки проскока для различных вариантов параметров загрузки бентонита, модифицированного глицерином

Вещество	Вариант активации бентонита	Высота и диаметр загрузки, м	Объем раствора, пропущенного через загрузку до точки проскока, мл	Динамическая емкость до проскока, мг/дм ³
	Неактивированный модифицированный бентонит	$H = 0,07; D = 0,03$	63,0±4,4	1,6±0,1
		$H = 0,055; D = 0,04$	123,0±6,0	2,2±0,2
		$H = 0,04; D = 0,05$	107,0±4,1	2,1±0,3
	Вариант активации № 3	$H = 0,07; D = 0,03$	93,0±7,5	2,2±0,1
		$H = 0,055; D = 0,04$	200,0±10,6	3,6±0,2
		$H = 0,04; D = 0,05$	170,0±9,0	3,4±0,1
	Вариант активации № 4	$H = 0,07; D = 0,03$	89,0±5,2	2,0±0,2
		$H = 0,055; D = 0,04$	190,0±10,0	3,0±0,1
		$H = 0,04; D = 0,05$	162,0±9,5	2,8±0,3
	Неактивированный бентонит	$H = 0,07; D = 0,03$	50,0±1,0	25,2±2,4
		$H = 0,055; D = 0,04$	100,0±4,0	37,4±4,0
		$H = 0,04; D = 0,05$	87,0±4,2	34,5±2,7
	Вариант активации № 3	$H = 0,07; D = 0,03$	73,0±3,0	37,0±3,3
		$H = 0,055; D = 0,04$	137,0±4,3	49,4±5,2
		$H = 0,04; D = 0,05$	110,0±10,3	43,8±0,0
	Вариант активации № 4	$H = 0,07; D = 0,03$	80,0±3,0	40,0±4,3
		$H = 0,055; D = 0,04$	140,0±6,3	53,4±4,7
		$H = 0,04; D = 0,05$	130,0±9,2	45,3±1,1

В условиях статики по отношению к *o*-фенилендиамину значительной сорбционной активностью обладает также бентонит, модифицированный УНТ. Это происходит более устойчиво после

активации 18 %-ным раствором HCl и 38 %-ным раствором CaCl₂. Уменьшение процентного соотношения растворов до 9 % HCl и 30 % CaCl₂ снижает эффект адсорбции (до 3,1–6,3 %).

В абсолютных значениях адсорбция вторичного ароматического амина (*o*-фенилендиамин) бентонитом значительно выше, чем сорбция вторичного нитросоединения (*n*-динитробензола): $\Gamma_{\infty} = 66,9$ мг/г против $\Gamma_{\infty} = 2,41$ мг/г. Аналогичная картина наблюдается также при адсорбции бентонитом, модифицированным глицерином.

Вторичный амин (*o*-фенилендиамин) насыщает каждый из изученных сорбционных материалов полностью лишь при очень высоких исходных концентрациях $C = 2000\text{--}2500$ мг/дм³ вещества в растворе, а у вторичного нитросоединения (*n*-динитробензола) полное насыщение происходит при исходных концентрациях $C = 55\text{--}60$ мг/дм³. Это объясняется отличиями в необходимых условиях для установления крепкой связи ароматического вещества с сорбентом.

При проектировании адсорбционных фильтров цилиндрической формы в составе станций очистки сточных вод от нитро- и аминосоединений предпочтение следует отдавать соотношению высоты к диаметру адсорбционной колонны, равному $H/D = 1,4$.

При наличии обеих соединений в сточной воде целесообразно применение многослойной фильтрующей загрузки из обоих вариантов бентонита.

Литература

1. Вахидова, И. М., Шайхиев, И. Г., Гильманов, Р. З., Вахидов, Р. М. и Мусин, Р. З. (2013). Очистка сточных вод производства калиевой соли 4,6-динитробензфуросана окислением. Вестник Казанского технологического университета, Т. 16, № 19, сс. 49–51.
2. Голованева, Н. В., Каграманов, Г. Г. и Фарносова, Е. Н. (2014). Наночистка воды от солей жесткости. Вода: химия и экология, № 5 (71), сс. 36–41.
3. Истрашкина, М. В., Атаманова, О. В. и Тихомирова, Е. И. (2016). Особенности адсорбции ароматических аминсоединений на различных вариантах модифицированного бентонита. Известия Самарского научного центра РАН, Т. 18, № 2-2, сс. 381–384.
4. Каграманов, Г. Г., Фарносова, Е. Н., Лин, М. М. и Бланко-Педрахон, А. М. (2018). Удаление тяжелых металлов из шахтных сточных вод. Химическая промышленность сегодня, № 1, с. 44.
5. Касымбеков, Ж. К. (2018). Вакуумная очистка канализационных колодцев с использованием энергии выхлопного газа трактора. Вода и экология: проблемы и решения, № 2 (74), сс. 25–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.2.25-31.
6. Касымбеков, Ж. К., Абирова, А. А. и Егизбаев, Д. А. (2012). Современные технологии очистки сточных вод

(аналитический обзор). Астана: АФ АО «Национальный центр научно-технической информации» МОН РК, 71 с.

7. Касымбеков, Ж. К., Ни, Н. П. и Ботантаева, Б. С. (2014). Испытание водопроводного воздухоотделителя-напорогасителя центробежного действия в лабораторных условиях. Вода и экология: проблемы и решения, № 2 (58), сс. 39–44.

8. Ким, А. Н. и Грун, Н. А. (2010). Исследование активированного угля, модифицированного фуллеренами, применяемого для кондиционирования водопроводной воды. Вестник гражданских инженеров, № 2 (23), сс. 146–150.

9. Ким, А. Н. и Грун, Н. А. (2013). Результаты по доочистке водопроводной воды на фильтрах с березовым активированным углем, модифицированным фуллеренами. Технологии мира, № 02 (50), сс. 37–39.

10. Коренман, И. М. (2012). Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений. М.: Книга по требованию, 342 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, № 3 (75), сс. 24–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.24-31.

12. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (2018). ГОСТ 31954-2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости. М.: Стандартинформ, 13 с.

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

14. Феофанов, Ю. А., Мишуков, Б. Г., Подпорин, А. В. и Феофанов, М. Ю. (2017). Оценка эффективности использования различных сорбционных материалов для очистки нефтесодержащих вод. Вода Magazine, № 5 (117), сс. 42–47.

15. Феофанов, Ю. А. и Ряховский, М. С. (2018). О применении природных сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов. Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, № 6 (126), сс. 32–38.

16. 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.

17. 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.

18. Ismadji, S., Soetaredjo, F. E. and Ayucitra, A. (2015). Modification of clay minerals for adsorption purpose. In: *Clay materials for environmental remediation*. Cham: Springer, pp. 39–56. DOI: 10.1007/978-3-319-16712-1_3.

19. 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.

20. Li, H., Teppen, B. J., Johnston, C. T. and Boyd, S. A. (2004). Thermodynamics of nitroaromatic compound adsorption from water by smectite clay. *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, Issue 20, pp. 5433–5442. DOI: 10.1021/es035054y.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Yang, H. and Zheng, Q. (2003). Structure stability of organic montmorillonite used for preparing polyethylene/montmorillonite nanocomposite. *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 22, Issue 20, pp. 1431–1433. DOI: 10.1023/A:1025715514900.
25. Zohra, M., Rose J. and Borschneck, D. (2014). Urban wastewater treatment by adsorption of organic matters on modified bentonite by (iron-aluminum). *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, Vol. 4, No. 3, pp. 71–79. DOI: 0.4236/jeas.2014.43008.
- References**
1. Vakhidova, I. M., Shaykhiyev, I. G., Gilmanov, R. Z., Vakhidov, R. M. and Musin, R. Z. (2013). Wastewater treatment by oxidation for the production of potassium salt of 4,6-dinitrobenzofuroxan. *Herald of Kazan Technological University*, Vol. 16, No. 19, pp. 49–51.
2. Golovaneva, N. V., Kagramanov, G. G., Farnosova, Ye. N. (2014). Nanofiltration water purging of hardness salts. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 5 (71), pp. 36–41.
3. Istrashkina, M. V., Atamanova, O. V. and Tikhomirova, E. I. (2016). Features of adsorption the aromatic amino compounds on various options of modified bentonite. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 18, No. 2-2, pp. 381–384.
4. Kagramanov, G. G., Farnosova, Ye. N., Lin, M. M., Blanko-Pedrekhon, A. M. (2018). Removal of heavy metals from mine wastewater. *Chemical Industry Today*, No. 1, p. 44.
5. Kassymbekov, Zh. K. (2018). Vacuum cleaning of sewerage wells using the exhaust gas energy of the tractor. *Water and Ecology*, No. 2 (74), pp. 25–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.2.25-31.
6. Kassymbekov, Zh. K., Abirov, A. A. and Egizbaev, D. A. (2012). Modern technologies for wastewater treatment (analytical review). Astana: Akmola Branch of JSC “National Center for Scientific and Technical Information” of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 71 p.
7. Kasymbekov, Zh. K., Ni, N. P. and Botantaeva, B. S. (2014). Testing of the water-pipe centrifugal vent valve-pressure damper in laboratory conditions. *Water and Ecology*, No. 2 (58), pp. 39–44.
8. Kim, A. N. and Grun, N. A. (2010). Research of the activated carbon modified by fullerenes applied for tap water conditioning. *Bulletin of Civil Engineers*, No. 2 (23), pp. 146–150.
9. Kim, A. N. and Grun, N. A. (2013). Results on tap water after purification using filters with birch activated carbon modified with fullerenes. *World Technologies*, No. 02 (50), pp. 37–39.
10. Korenman, I. M. (2012). Photometric analysis. Methods for the determination of organic compounds. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 342 p.
11. Kosarev, A. V., Atamanova, O. V., Tikhomirova, E. I. and Istrashkina, M. V. (2018). Kinetics of adsorption of 2-methylalinine by modified bentonite at sewage treatment. *Water and Ecology*, No. 3 (75), pp. 24–31. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.3.24-31.
12. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (2018). State Standard GOST 31954-2012. Drinking water. Methods of hardness determination. Moscow: Standartinform, 13 p.
13. Perevalov, V. P. and Koldobsky, G. I. (2018). Fine organic synthesis: design and equipment of production plants: study guide for higher educational institutions. Moscow: URAIT, 290 p.
14. Feofanov, Yu. A., Mishukov, B. G., Podporin, A. V. and Feofanov, M. Yu. (2017). Evaluation of the effectiveness of the use of various sorption materials for cleaning of oil-containing water. *Voda Magazine*, No. 5 (117), pp. 42–47.
15. Feofanov, Yu. A. and Ryakhovsky, M. S. (2018). On the use of natural sorbents for water purification from petroleum products. *Water Purification. Water Treatment. Water Supply*, No. 6 (126), pp. 32–38.
16. 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.
17. 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.
18. Ismadji, S., Soetaredjo, F. E. and Ayucitra, A. (2015). Modification of clay minerals for adsorption purpose. In: *Clay materials for environmental remediation*. Cham: Springer, pp. 39–56. DOI: 10.1007/978-3-319-16712-1_3.
19. Khenifi, A., Boubberka, 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.
20. Li, H., Teppen, B. J., Johnston, C. T. and Boyd, S. A. (2004). Thermodynamics of nitroaromatic compound adsorption from water by smectite clay. *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, Issue 20, pp. 5433–5442. DOI: 10.1021/es035054y.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Yang, H. and Zheng, Q. (2003). Structure stability of organic montmorillonite used for preparing polyethylene/montmorillonite

nanocomposite. *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 22, Issue 20, pp. 1431–1433. DOI: 10.1023/A:1025715514900.

25. Zohra, M., Rose J. and Borschneck, D. (2014). Urban wastewater treatment by adsorption of organic matters on modified bentonite by (iron-aluminum). *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, Vol. 4, No. 3, pp. 71–79. DOI: 0.4236/jeas.2014.43008.

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

Касымбеков Жузбай Кожабиевич, д-р техн. наук, профессор

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: jkk2004@mail.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

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

E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Kassymbekov Zhuzbay Kozhabaevich, Dr. of Engineering, Professor

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: jkk2004@mail.ru

Podoksenov Artyom Andreevich

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

E-mail: hosting-speech@yandex.ru