

**Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды**

УДК 544.7

DOI: 10.25514/CHS.2021.1.19015

Адсорбция ПАВ на песках и их роль в экологических барьерах*А. А. Яковлева¹✉, Ч. Т. Нгуен¹*

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия,
e-mail: ayakovistu@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.04.2021 г.; после доработки: 26.04.2021 г.; принята в печать: 11.05.2021 г.

Аннотация – Загрязнение поверхностно-активными веществами является одной из актуальных проблем защиты окружающей среды. Почва, песок, глина играют важную роль в сохранении равновесия в природе. Для оценки экологической барьерной роли песков в работе исследованы поглотительные особенности песков по отношению к тетра- и гексадецилсульфатам натрия и олеату натрия. С использованием классических представлений и методик коллоидно-химических исследований изучены кинетика и условия равновесия при адсорбции ПАВ на песках, образцы песков отобраны в береговых зонах ряда рек Вьетнама, а также на берегу залива Бакбо. Полученные результаты показывают, что кварцевые пески хорошо удерживают на своей поверхности ПАВ. С повышением содержания корунда в песках их поглотительная способность снижается. В работе изучены влияние гидродинамического режима и высоты слоя песка при фильтрации на их удерживающую способность по отношению к ПАВ. Показано, что кроме соотношения Al_2O_3 и SiO_2 важными факторами, влияющими на адсорбционные особенности песков, являются средний размер зерен, толщина слоя при фильтрации и скорость потока. Для описания процесса адсорбции корректны модель Ленгмюра и уравнения псевдо-второго порядка. Доказано, что пески по своим природным качествам играют важную роль в защите прибрежных зон.

Ключевые слова: адсорбция, ПАВ, песок, экологические барьеры.

Monitoring soil, air, water status

UDC 544.7

DOI: 10.25514/CHS.2021.1.19014

Adsorption of surfactants on sands and their role in environmental barriers*Ariadna A. Yakovleva¹✉, and Chung T. Nguyen¹*

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,
e-mail: ayakovistu@mail.ru

Received: April 5, 2021; Revised: April 26, 2021; Accepted: May 11, 2021

Abstract – Surfactant contamination poses many environmental challenges. Soil, sand, clay play an important role in the preservation of the ecosystem, due to their natural characteristics. To assess

the ecological barrier role of sands, in this work, we investigated the absorption characteristics of sands in relation to sodium tetra- and hexadecyl sulfates and sodium oleate. The kinetics and equilibrium conditions for the adsorption of surfactants on quartz and quartz-corundum sands have been studied. Sand samples were taken in the coastal zones of a number of rivers in Vietnam, as well as on the shores of Bacbo Bay. The results obtained show that quartz sands well retain surfactants on their surface. With an increase in the content of corundum in the sands, their absorption capacity decreases. The paper studies the influence of the hydrodynamic Reynolds criterion and the height of the sand layer during filtration on the retention capacity of sands in relation to surfactants. It is shown that, in addition to the ratio of Al_2O_3 and SiO_2 , important factors affecting the adsorption characteristics of sands are the average size of sand grains, layer thickness during filtration, and flow rate. To describe the adsorption process, the Langmuir model and pseudo-second order kinetic equations are correct. It has been proven that sands, by their natural qualities, play an important role in the protection of coastal zones in relation to such pollutants as surfactants.

Keywords: adsorption, surfactant, sand, ecological barriers.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире производится большое количество химических веществ, в том числе поверхностно-активных (ПАВ), неблагоприятно влияющих на окружающую среду. ПАВ относят к загрязнителям воды третьей группы дисперсности (диаметр частиц от 1 до 10 нм) [1]. Разнообразные ПАВ широко используются в химической, нефтяной и нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, фармацевтической промышленности и других производствах. Эти вещества неизбежно попадают в промывные и сточные воды. При попадании ПАВ в воду на поверхности образуется слой пены, который затрудняет тепло- и массообмен с атмосферой, снижается поступление кислорода из воздуха в воду на 15–20%, замедляются осаждение и разложение взвесей, минерализация органических веществ, и тем самым ухудшаются процессы самоочищения. Кроме того, многие ПАВ усиливают воздействие загрязняющих веществ и тормозят процесс их естественной переработки [2–6].

В данной работе рассмотрена адсорбция ПАВ на песках с целью оценки их роли в задачах защиты окружающей среды от агрессивных поллютантов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе рассмотрены образцы песков из Вьетнама, отобранные на берегах рек Хонгха (песок А), Тхубон (песок Б), Тхачхан (песок К) и залива Бакбо (песок Г). Используемые пески имеют различные геохимические характеристики, изученные ранее [7]. Гранулометрические характеристики песков получены с помощью ситового анализа. Адсорбционные исследования проведены с фракциями, соответствующими максимумам на кривых распределения. Некоторые минеральные и гранулометрические показатели песков представлены в таблице 1.

Для имитации бытовых стоков были выбраны органические соли натрия, которые широко используются во многих детергентах – тетрадецилсульфат натрия, гексадецилсульфат натрия и олеат натрия. Использование ПАВ в виде индивидуальных препаратов позволяет выявлять особенности механизмов

поверхностных явлений. В работе использовали типовую методику, применяемую в адсорбционных исследованиях [7]. Растворы ПАВ готовили из навесок препаратов марки «ч», полученные растворы имели концентрацию от $0,39 \cdot 10^{-3}$ М до $12,5 \cdot 10^{-3}$ М.

Таблица 1. Геохимические и гранулометрические характеристики исследуемых песков
Table 1. Geochemical and granulometric characteristics of the studied sands

Песок	Содержание минералов, масс. %		Гранулометрические характеристики	
	$\alpha\text{-SiO}_2$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Средний размер, мм	Однородность, %
А	98,38	1,62	0,294	53,125
Б	89,93	10,07	0,429	72,240
Г	98,99	1,01	0,241	66,919
К	89,11	10,89	0,849	61,367

В динамических условиях способность песков удерживать загрязняющие вещества оценивали, пропуская раствор ПАВ через слой песка в колонке диаметром 1 см. В колонку помещали известные навески песка, высоту слоя песка определяли линейкой. С помощью специального зажима-регулятора контролировали скорость стока исследуемого раствора через слой песка.

При оценке способности песков к адсорбции в статических условиях наливали определённый объем раствора известной концентрации в конические колбы, где находились навески песка. Сорбцию проводили на перемешивающем устройстве типа водяной бани Water bath shaker type 357 (скорость 200 ± 50 об/мин) при температуре $25 \pm 1^\circ\text{C}$. После перемешивания суспензию оставляли для осаждения частиц песка до тех пор, пока надосадочная жидкость не становилась прозрачной.

Одним из факторов, влияющих на эффективность адсорбции в динамических условиях, является скорость потока, связанная с критерием Рейнольдса (Re), который рассчитывали по формуле:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu},$$

в которой w – линейная скорость потока, мм/с; D – внутренний диаметр бюретки, мм; ν – кинематическая вязкость раствора, $\text{мм}^2/\text{с}$ [8, 9].

Для количественных оценок в сериях экспериментов определяли вязкость ν , поверхностное натяжение σ , удельную электрическую проводимость (κ или УЭП). Поверхностное натяжение определяли методом максимального давления при образовании пузырьков (метод Ребиндера). Для измерения УЭП использовали кондуктометр «Эксперт-002». Для построения градуировочных кривых использовали исходные растворы. Концентрацию ПАВ после адсорбции $c_{равн}$ определяли сравнением изотерм поверхностного натяжения и УЭП до и после сорбции (рис. 1).

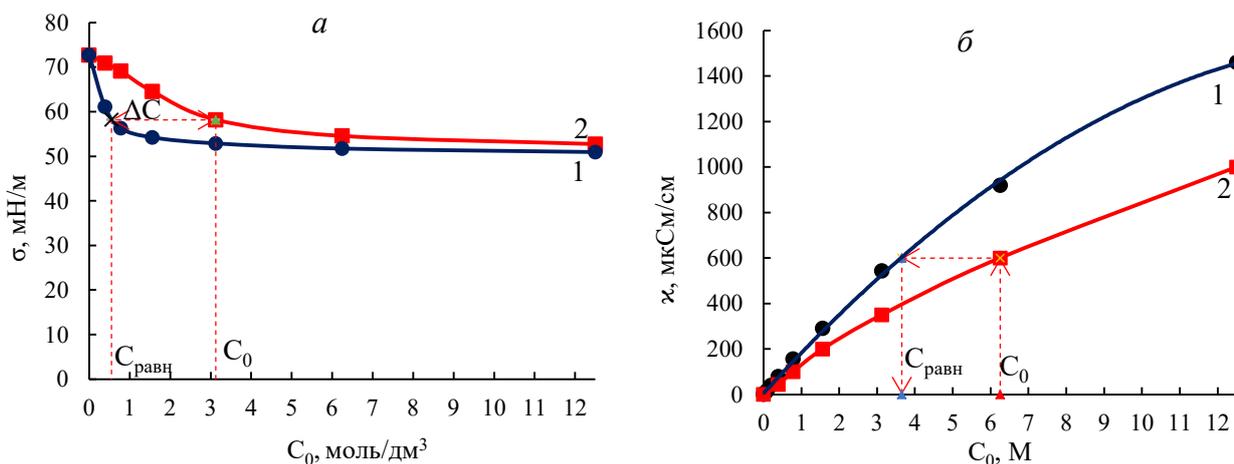


Рис. 1. Определение равновесной концентрации после адсорбции по изменению поверхностного натяжения (а) и удельной электрической проводимости (б):

1 – градуировка; 2 – кривая после адсорбции

Fig. 1. Determination of the equilibrium concentration of surfactants after adsorption by changing the surface tension (a) and the specific electrical conductivity (b):

1 – calibration; 2 – curve after adsorption

Величину адсорбции A рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{V(c_0 - c_{равн})}{m},$$

где V – объем раствора, из которого идет адсорбция, дм³; c_0 – исходная концентрация раствора, моль/дм³; m – масса песка в колонке, г.

Для описания эффективности удаления R вещества из раствора при фильтрации использовали формулу:

$$R = \frac{c_0 - c_k}{c_0},$$

где c_k – концентрация раствора после прохождения через слой песка, моль/дм³.

Для описания изотерм использовали модель мономолекулярной адсорбции:

$$A = A_\infty \frac{K_L c}{1 + K_L c},$$

где K_L – константа уравнения Ленгмюра; A_∞ – величина предельной адсорбции (моль/г).

Для оценки кинетических особенностей взаимодействия использовали модели псевдо-первого или псевдо-второго порядка [10-11]:

$$k_1 = \frac{1}{\tau} \ln \frac{A_\infty}{A_\infty - A} \quad \text{и} \quad \frac{\tau}{A} = \frac{\tau}{A_\infty} + \frac{1}{k_2 A_\infty^2}.$$

где k_1 – константа скорости реакции первого порядка, мин⁻¹; k_2 – константа скорости реакции второго порядка, г·моль⁻¹·мин⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерения концентрации растворов ПАВ до и после адсорбции получены изотермы (рис. 2).

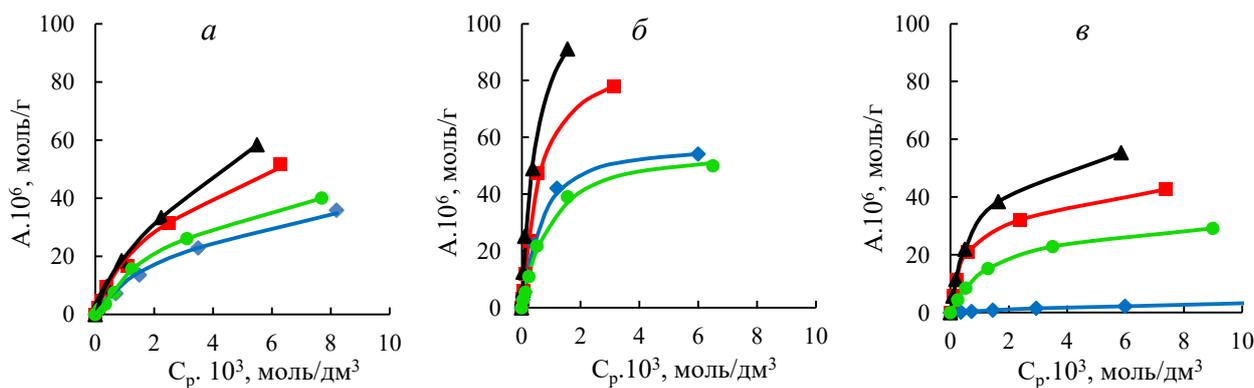


Рис. 2. Изотермы адсорбции $C_{14}H_{29}SO_4Na$ – (а); $C_{16}H_{33}SO_4Na$ – (б); $C_{17}H_{33}COONa$ – (в) на песках: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

Fig. 2. Isotherm of adsorption $C_{14}H_{29}SO_4Na$ – (а); $C_{16}H_{33}SO_4Na$ – (б); $C_{17}H_{33}COONa$ – (в) on the sands: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

В рассмотренном диапазоне концентраций изученные изотермы адсорбции ПАВ для всех песков имеют ленгмюровский характер с высокими коэффициентами R^2 . В таблице 2 для наглядности показаны уравнения Ленгмюра для песков А и Б.

Таблица 2. Параметры изотерм Ленгмюра

Table 2. Parameters of the Langmuir isotherm

Песок	Вид уравнения Ленгмюра	R^2
Тетрадецилсульфат натрия $C_{14}H_{29}SO_4Na$		
А	$A=71,9 \cdot 10^{-6} \frac{0,35 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+0,35 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9980
Б	$A=55,6 \cdot 10^{-6} \frac{0,23 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+0,23 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9934
Гексадецилсульфат натрия $C_{16}H_{33}SO_4Na$		
А	$A=111,5 \cdot 10^{-6} \frac{0,90 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+0,90 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9942
Б	$A=61,0 \cdot 10^{-6} \frac{1,07 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+1,07 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9913
Олеат натрия $C_{17}H_{33}COONa$		
А	$A=45,1 \cdot 10^{-6} \frac{1,47 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+1,47 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9986
Б	$A=6,2 \cdot 10^{-6} \frac{0,10 \cdot 10^{-3} \cdot c}{1+0,10 \cdot 10^{-3} \cdot c}$	0,9989

Известно, что наиболее значимыми функциональными группами на поверхности зерен песка являются силанольные группы на кристаллических гранях. Судя по таблице 1 в изучаемых песках их количественное присутствие

в общем виде можно представить соотношением $\Gamma > A > K > B$. Практически во всех случаях величина предельной адсорбции снижается в той же последовательности (исключение составляют пески Б и К с $C_{16}H_{33}SO_4Na$). По коэффициентам полученных уравнений видно, что для гомологов тетра- и гексадецилсульфатов натрия соблюдается правило Траубе, и с повышением длины углеводородной цепи закономерно увеличиваются значения предельной адсорбции на всех песках. Олеат натрия, как соль карбоновой кислоты с иной структурой углеводородного радикала, имеет более низкую адсорбционную способность. В песках Б и К присутствие оксида алюминия не может не сказываться на рельефе поверхности и ее адсорбционных способностях. Очевидно, что поверхность частиц песка представлена фрагментами кристаллических решеток минералов с различными характеристиками, определяющими мозаичность рельефа, поскольку структура кварца представляет собой каркас сцепленных друг с другом тетраэдров, в котором четыре аниона кислорода окружают ион Si^{4+} , в то время как в решетке корунда они располагаются слоями $Al-O$ в плотнейшей гексагональной ячейке. Очевидно, отношение SiO_2/Al_2O_3 в песке влияет на формирование пленок ПАВ на поверхности.

В динамических условиях удерживание ПАВ существенно зависит от скорости потока. В пределах $R^2 = 0,88 \div 0,98$ эффективность удаления изменяется линейно с ростом числа Рейнольдса (рис. 3).

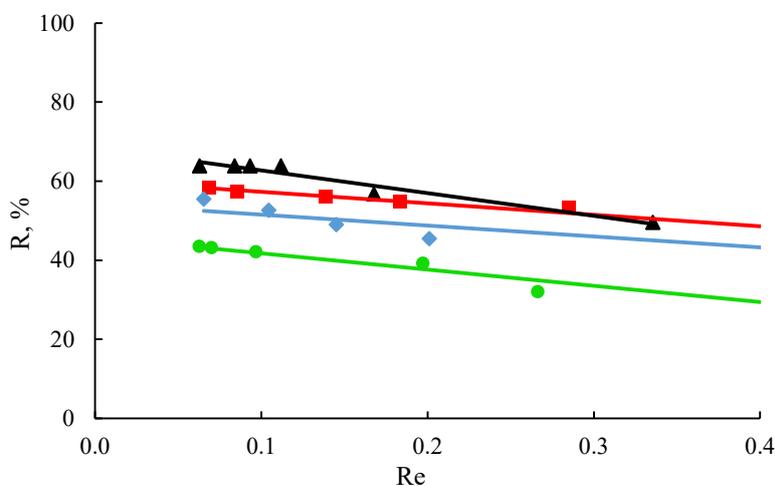


Рис. 3. Влияние скорости потока на адсорбцию $C_{14}H_{29}SO_4Na$ на песках: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

Fig. 3. Effect of the flow rate on sorption $C_{14}H_{29}SO_4Na$ on sands: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

Эффективность удаления ПАВ из раствора с увеличением скорости потока через слой песка снижается, поскольку сокращается время контакта между сорбентами и молекулами ПАВ, процесс массопереноса протекает быстро и даже сопровождается вымыванием сорбированных молекул [12, 13].

На рисунке 4 представлены зависимости высоты слоя песков на удерживание ПАВ. Из рисунка видно, что, по-видимому, существуют некоторые предельные значения.

Во всех случаях в пределах высоты до 5 см эффективность удерживания ПАВ увеличивается с высотой слоя песка. Эффективность повышается заметнее для гексадецилсульфата натрия на песках Б и К; на песках А и Г сопоставима с олеатом натрия. Это может быть связано с гранулометрическими характеристиками зерен песков – средний размер частиц у песков А и Г меньше.

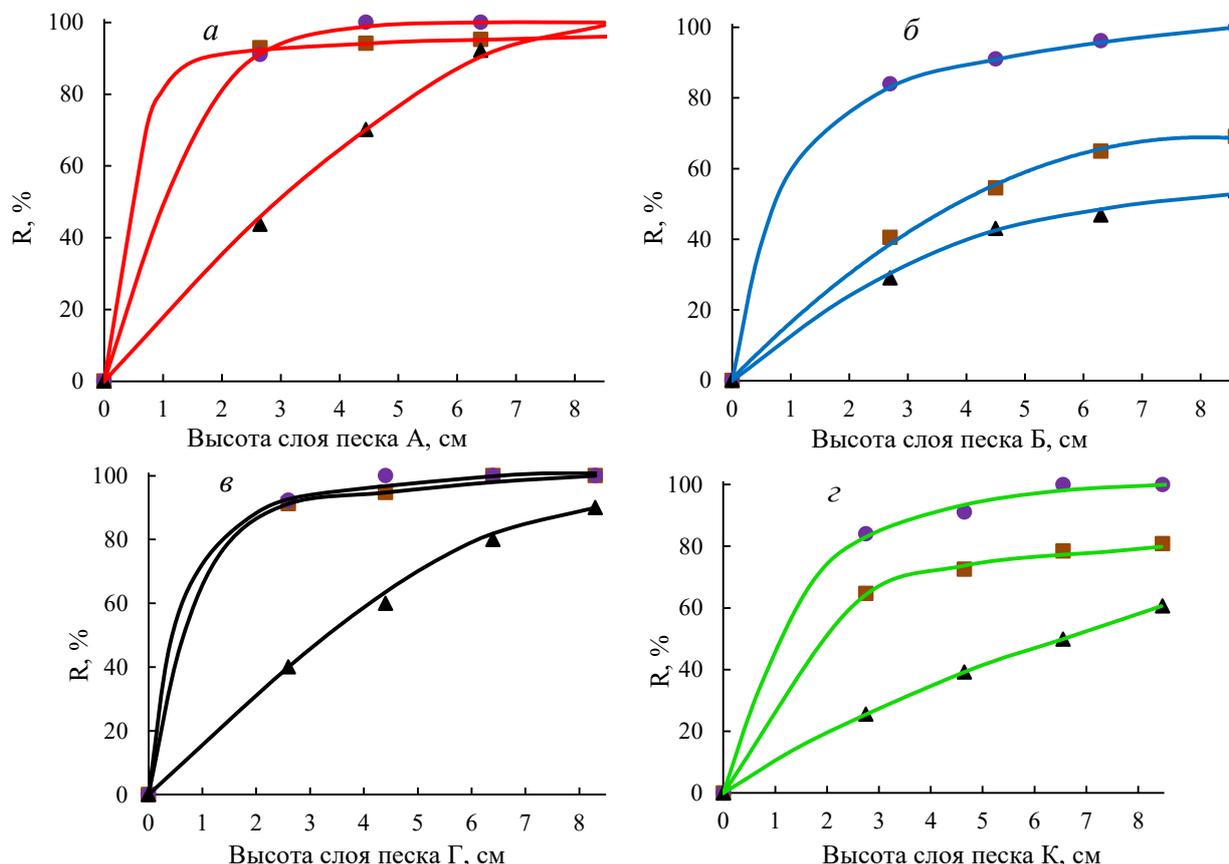


Рис. 4. Влияние высоты слоя песка А (а); Б (б); Г (в); К (г) на адсорбцию поверхностно-активного вещества: $C_{14}H_{29}SO_4Na$ – ▲; $C_{16}H_{33}SO_4Na$ – ●; $C_{17}H_{33}COONa$ – ■.

Fig. 4. Influence of the height of the sand layer А (a); В (b); Г (v); К (g) on the adsorption of surfactants: $C_{14}H_{29}SO_4Na$ – ▲; $C_{16}H_{33}SO_4Na$ – ●; $C_{17}H_{33}COONa$ – ■.

На рисунке 5 представлена эволюция адсорбции ПАВ на используемых песках.

Видно, что адсорбция активно протекает в течение первых 20-ти минут. Затем величина адсорбции постепенно запределивается, время достижения равновесного состояния составляет около 50–60 мин. Для расчета констант скорости использовали начальные участки кинетических кривых (табл. 4). В таблице представлены величины предельной адсорбции, рассчитанные по кинетическим уравнениям.

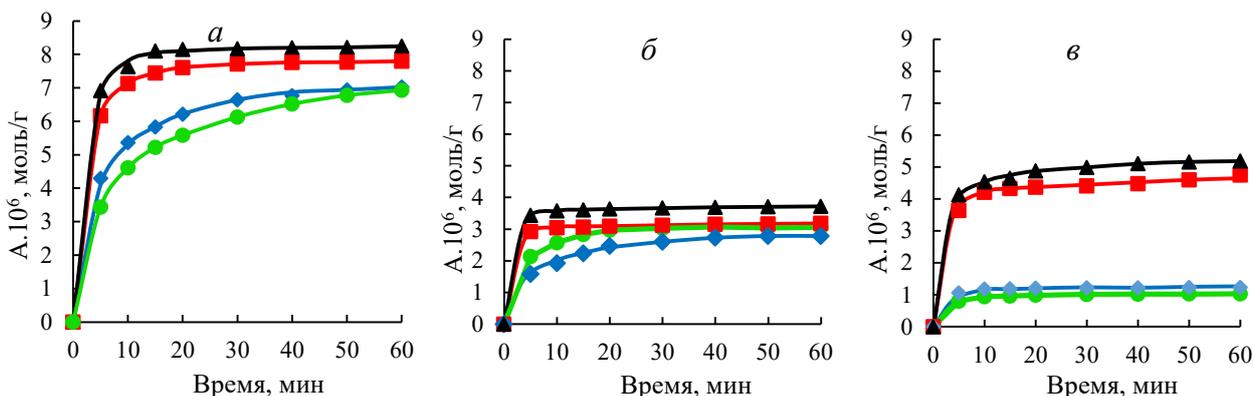


Рис. 5. Кинетические кривые адсорбции поверхностно-активных веществ: а – $C_{14}H_{29}SO_4Na$; б – $C_{16}H_{33}SO_4Na$; в – $C_{17}H_{33}COONa$ на песках: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

Fig. 5. Curves of the kinetics of surfactant adsorption: а – $C_{14}H_{29}SO_4Na$; б – $C_{16}H_{33}SO_4Na$; в – $C_{17}H_{33}COONa$ on sands: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К.

Таблица 4. Кинетические параметры адсорбции

Table 4. Kinetic parameters of adsorption

Песок	$A_{\infty} \cdot 10^6$, моль/г Эксперимент	Псевдо-первый порядок			Псевдо-второй порядок		
		k_1 , мин ⁻¹	$A_{\infty} \cdot 10^6$, моль/г	R^2	k_2 , г/(моль·мин)	$A_{\infty} \cdot 10^6$, моль/г	R^2
Тетрадецилсульфат натрия $C_{14}H_{29}SO_4Na$							
А	7,797	0,1045	2,6931	0,9092	0,083	8,087	0,983
Б	7,022	0,0800	4,5600	0,9727	0,037	7,386	0,997
Г	8,244	0,0970	1,8545	0,7868	0,109	8,479	0,963
К	6,932	0,0672	5,2869	0,9754	0,026	7,282	0,990
Гексадецилсульфат натрия $C_{16}H_{33}SO_4Na$							
А	3,179	0,0833	0,6590	0,7958	0,688	3,181	0,970
Б	2,782	0,0907	2,2341	0,9844	0,072	2,988	0,980
Г	3,718	0,0856	0,7159	0,7887	0,622	3,726	0,983
К	3,053	0,1544	2,3567	0,9860	0,117	3,262	0,986
Олеат натрия $C_{17}H_{33}COONa$							
А	4,747	0,0513	1,5799	0,725	0,145	4,724	0,9573
Б	1,226	0,1166	0,3471	0,839	0,902	1,254	0,9533
Г	5,182	0,0893	2,3666	0,900	0,138	5,234	0,9642
К	1,031	0,0910	0,3912	0,917	0,633	1,063	0,9872

Коэффициенты корреляции R^2 модели псевдо-второго порядка оказываются более высокими, более высокой оказывается и сходимость рассчитанных A_{∞} с экспериментально найденными. Это позволяет считать, что рассматриваемый процесс протекает по механизму псевдо-второго порядка. Такой механизм предполагает химическую обменную реакцию на поверхности зерен песка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной статье представлены результаты исследования адсорбции некоторых ПАВ на песках из Вьетнама. Оценка удерживаемости ПАВ песками проведена в динамическом режиме. Установлено, что удерживающая способность песков по отношению к ПАВ неодинакова и зависит от соотношения оксидов алюминия и кремния в составе песка. Пески с высоким содержанием кварца способны к удерживанию большего количества ПАВ на своей поверхности. Кроме того, длина и масса молекул ПАВ тоже влияют на способность песков к адсорбции. Результаты доказывают, что гексадецилсульфат натрия и олеат натрия активнее адсорбируются, чем тетрадецилсульфат натрия. Установлено, что для описания равновесной адсорбции может быть использована модель Ленгмюра; для описания кинетических закономерностей предпочтительно применять модель псевдо-второго порядка.

Обобщая полученные результаты, необходимо отметить, что изучаемые пески являются неплохими адсорбентами. По своим природным качествам они способны к удерживанию ПАВ и могут служить защитными барьерами для нижележащих почв и подземных вод.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы

1. Когановский А.М., Клименко Н.А. (1980). *Физико-химические основы извлечения поверхностно-активных веществ из водных растворов и сточных вод*. Киев: Наукова думка.
2. Румак В.С., Умнова Н.В. (2020). Биомониторинг состояния загрязненной диоксинами среды в окрестностях свалки: к минимизации риска для здоровья населения. *Химическая безопасность*, 4(2). 68–79. <https://doi.org/10.25514/CHS.2020.2.18005> .
3. Ладыгина Ю.Ш., Мец Е.А., Колесников А.В. (2017). Адсорбция анионных поверхностно-активных веществ на свежеформированном осадке гидроксида металла. *Успехи в химии и химической технологии*, 31(6). 46–48.
4. Спиридонов А.М., Апросимова Е.В., Заболоцкий В.И., Федосеева В.И., Соколова М.Д., Охлопкова А.А. (2019). Адсорбция цетилтриметиламмоний бромида на поверхности цеолита. *Журнал физической химии*, 93(5). 722–729. <https://doi.org/10.1134/S0044453719050285> .
5. Стрельцова Е.А., Гросул А.А. (2014). Адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и Твинов из водных растворов на парафине. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 14(1). 129–137.
6. Харитоновна Т.В., Иванова Н.И., Сумм Б.Д. (2005). Адсорбции катионного и неионогенного ПАВ на поверхности SiO₂ из водных растворов. 1. Адсорбция бромида додецилпиридиния и тритона X–100 из индивидуальных растворов. *Коллоидный журнал*, 67(2). 274–280.

7. Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т. (2020). К вопросу о барьерных качествах песков Северного и Центрального Вьетнама. Сорбция ионов железа (III). *Российский химический журнал*, 64(2), 80–84. <https://doi.org/10.6060/rcj.2020642.12>.
8. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. (1982) *Свойства газов и жидкостей*. Л.: Химия.
9. Леонтьев Н.Е. (2017). *Основы теории фильтрации*. М.: Макс Пресс.
10. Травин С.О., Скурлатов Ю.И. (2019). Аналитическое уравнение для кривых выхода загрязнителя из колонки при динамической адсорбции. *Химическая безопасность*, 3(2), 8–19. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16001>.
11. Tien C. (1994). *Adsorption Calculations and Modelling*. Boston: Butterworth–Heinemann.
12. Товбин Ю.К. (2017). Деформируемость адсорбентов при адсорбции и основы термодинамики твердофазных систем. *Журнал физической химии*, 91(9), 1453–1467. <https://doi.org/10.7868/S0044453717090333>.
13. Лисичкин Г.В., Фадеев А.Ю., Сердан А.А., Нестеренко П.Н. (2003) *Химия привитых поверхностных соединений*. М.: Физматлит.

References:

1. Koganovsky A.M. & Klimenko N.A. (1980). *Physico-chemical bases for the extraction of surfactants from aqueous solutions and wastewater*. Kiev: Naukova dumka (in Russ.).
2. Rumak V.S. & Umnova N.V. (2020). Biomonitoring of the state of the environment contaminated with dioxins in the vicinity of the landfill: to minimize the risk to public health. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical Safety Science*, 4(2), 68–79 (in Russ.).
3. Ladygina Yu. Sh., Metz E. A., & Kolesnikov A.V. (2017). Adsorption of anionic surfactants on a freshly formed metal hydroxide precipitate. *Advances in chemistry and chemical technology*, 31(6), 46–48 (in Russ.).
4. Spiridonov A.M., Aprosimoва E.V., Zabolotsky V.I., Fedoseeva V.I., Sokolova M.D., & Okhlopkoва A.A. (2019) Adsorption of Cetyltrimethylammonium Bromide on Zeolite Surface *Russian Journal of Physical Chemistry* 93(5), 722–729 <https://doi.org/10.1134/S0036024419050285>.
5. Streltsova E. A. & Grosul A.A. (2014). Adsorption of sodium dodecyl sulfate, dodecylammonium chloride and Tween from aqueous solutions on paraffin. *Sorption and chromatographic processes*, 14(1), 129–137 (in Russ.).
6. Kharitonova T.V., Ivanova N.I., & Summa B.D. (2005) Adsorption of cationic and nonionic surfactants on a SiO₂ surface from aqueous solutions: 2. Adsorption of dodecylpyridinium bromide and Triton X–100 from mixed solutions *Colloid Journal* 67(2) 249–255 <https://doi.org/10.1007/s10595-005-0088-2>.
7. Yakovleva A.A., Nguyen Ch.T. (2020). On the barrier qualities of the sands of Northern and Central Vietnam. Sorption of iron (III) ions. *Russian Chemical Journal*, 64(2), 80–84 (in Russ.).
8. Reed, R., Prausnitz, J., & Sherwood, T. (1977) *Properties of gases and liquids*. N.Y.: McGraw–Hill Inc.
9. Leontiev N. E. (2017). *Fundamentals of filtration theory*. Moscow: Max Press (in Russ.).
10. Travin S. O., Skurlatov Yu. I. (2019). Analytical equation for the curves of the pollutant output from the column during dynamic adsorption. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical Safety Science*, 3(2), 8–19.
11. Tien C. (1994). *Adsorption Calculations and Modelling*. Boston: Butterworth–Heinemann.
12. Tovbin Yu.K. Deformability of adsorbents during adsorption and principles of the thermodynamics of solid–phase systems *Russian Journal of Physical Chemistry A* volume 91 <https://doi.org/10.1134/S0036024417090308/>.
13. Lisichkin G.V., Fadeev A.Yu., Serdan A.A., & Nesterenko P.N. (2003) *Chemistry of grafted surface compounds*. М.: Fizmatlit (in Russ.).