

Естественные науки. 2023. № 4 (13). С. 13–23.

*Yestestvennye nauki = Natural Sciences*. 2023; 4 (13): 13–23 (In Russ.)

Научная статья

УДК 544.723.212

doi 10.54398/1818507X\_2023\_4\_13

## **ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА СОРБЦИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА (III) ПРИРОДНЫМ СОРБЕНТОМ С ЦЕЛЬЮ ОЧИСТКИ ВОД**

*Реснянская Анна Станиславовна<sup>1✉</sup>, Джигола Людмила Александровна<sup>2</sup>, Васильев Владимир Анатольевич<sup>3</sup>*

<sup>1, 2</sup>Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева,  
г. Астрахань, Россия

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,  
Россия

resnyanskaya-as@yandex.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** В настоящее время в природных водах содержание ионов железа (III) увеличилось вследствие их поступления в водоёмы со сточными водами различных предприятий. Поэтому проблема повышенного содержания в воде ионов железа становится актуальной. Для очистки воды от ионов железа применяется большое количество методов, но наиболее распространёнными являются сорбционные и ионообменные методы. Данная работа посвящена исследованию процесса адсорбции ионов железа (III) на природном минеральном сырье — мергеле Баскунчакского месторождения Астраханской области. Экспериментальные результаты были описаны с использованием адсорбционных изотерм моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина – Радушкевича.

**Ключевые слова:** сточные воды, удаление железа, адсорбция, изотерма Ленгмюра, мергель, Баскунчакское месторождение, уравнение Фрейндлиха, Модель Темкина, минеральный сорбент

**Для цитирования:** Реснянская А. С., Джигола Л. А., Васильев В. А. Изучение закономерностей процесса сорбции ионов железа (III) природным сорбентом с целью очистки вод // Естественные науки. 2023. № 4 (13). С. 13–23. [https://doi.org/10.54398/1818507X\\_2023\\_4\\_13](https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_4_13).

## STUDY OF THE REGULARITIES OF THE SORPTION PROCESS OF IRON IONS (III) BY NATURAL SORBENT FOR THE WATER TREATMENT

Resnyanskaya Anna S.<sup>1✉</sup>, Dzhigola Lyudmila A.<sup>2</sup>, Vasiliev Vladimir A.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Russia

<sup>3</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

resnyanskaya-as@yandex.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** Currently, the content of iron (III) ions in natural waters has increased due to their entry into reservoirs with wastewater from various enterprises. Therefore, the problem of increased content of iron ions in water becomes relevant. A large number of methods are used to purify water from iron ions, but the most common are sorption and ion exchange methods. This work is devoted to the study of the adsorption process of iron (III) ions on natural mineral raw materials - marl from the Baskunchak deposit in the Astrakhan region. The experimental results were described using the adsorption isotherms of the Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich models.

**Keywords:** wastewater, iron removal, adsorption, Langmuir isotherm, marl, the Baskunchak deposit, Freundlich's equation, Temkin's model, mineral sorbent

**For citation:** Resnyanskaya A. S., Dzhigola L. A., Vasiliev V. A. Study of the regularities of the sorption process of iron ions (III) by natural sorbent for the water treatment. *Yestestvennye nauki = Natural Sciences*. 2023; 4(13): 13–23. [https://doi.org/10.54398/1818507X\\_2023\\_4\\_13](https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_4_13).

**Введение.** Железо является характерным элементом природных вод. Главными источниками соединений железа в поверхностных водах являются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением. Значительные количества железа поступают в водоёмы со сточными водами предприятий металлургической, металлообрабатывающей, текстильной, лакокрасочной промышленности и с сельскохозяйственными стоками. Поэтому проблема повышенного содержания в воде железа существует повсеместно, независимо от того, используется ли вода на хозяйственно-бытовые нужды или нужды производства.

В последнее время большинство нефтяных месторождений обводняются, т. е. увеличивается количество добываемой попутно с нефтью пластовой воды. Загрязнение призабойной зоны имеет значительное влияние на производительность газоконденсатных скважин. Железо, находящееся в любых природных водах в концентрации от 5 до 50 мг/дм<sup>3</sup>, может выделять хлопья размером от 1 до 3 мм, что приводит к опасности кольматации пласта [6].

Часто железо образует в воде сложные органическо-минеральные комплексы с природными органическими кислотами, что существенно усложняет процесс извлечения железа [3].

Фактором, ухудшающим качество питьевой воды, подаваемой населению, является её природный минеральный состав. В подземных водах присутствует в основном растворённое двухвалентное железо в виде ионов Fe<sup>2+</sup>. Трёхвалентное железо появляется после контакта воды с воздухом, а также после

направленного применения таких окислителей, как кислород воздуха, хлор, озон, перманганат калия. Однако даже после удаления образующейся гидроксида  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , концентрация железа (III) в подземной воде превышает концентрацию, установленную СанПиН для питьевой воды.

В Астраханской области отмечается низкое качество возвратных вод, сбрасываемых в открытые водоёмы предприятиями. В Волге отмечено превышение предельно допустимых концентраций железа, меди, цинка и других химических веществ, а уровень загрязнения нефтепродуктами стал критическим, согласно данным службы природопользования и охраны окружающей среды Астраханской области. Десятки токсичных веществ, сбрасываемых в водоёмы со сточными водами, оказывают отрицательное влияние на качество природных вод и состояние обитателей водоёмов [4]. Поэтому постоянно существует необходимость очистки природных и сточных вод от различных загрязнителей с применением наиболее эффективных сорбентов.

Существует большое количество методов очистки воды от ионов железа. Наиболее распространённые способы очистки вод от ионов тяжёлых металлов являются сорбционные и ионообменные методы. В связи с этим возрастает необходимость получения более дешёвых сорбентов с улучшенными физико-химическими и эксплуатационными характеристиками. Сорбенты, используемые в промышленности, в основном разрабатываются на основе активных углей [17]. Также интерес представляют сорбенты, изготовленные из вторсырья.

Для извлечения ионов железа используют разнообразные сорбенты, которые, наряду с хорошей поглотительной способностью и избирательностью, должны быть легко регенерируемыми, химически и механически устойчивыми. По способу получения сорбенты можно разделить на синтетические и природные.

Особое место среди сорбентов занимают активированные угли. В работе [8] показаны результаты исследования образцов дробленых активных углей (ДАУ). Установлено, что сорбционная ёмкость таких углей по отношению к ионам железа (общ.) и меди (II) в 1,7–2,0 раза выше по сравнению с активированными углями марки АГ-3.

Синтетические иониты используются для поглощения ионов металлов, в частности тяжёлых токсичных металлов (ТТМ). Для поглощения ТТМ используются различные катиониты (КБ-4, КБ4П-2, КУ-1, КУ-2-8). Они обладают большой ёмкостью по отношению к ионам железа, однако практически не поглощают органических соединений [5].

Актуальной задачей является получение новых сорбентов, обладающих высокой сорбционной ёмкостью с возможностью эффективной регенерации и обладающих значительной долговечностью. Для очистки воды от ионов тяжёлых металлов предложены синтезированные нанокompозитные сорбенты на основе высокопористого диоксида кремния, активированного угля с добавлением ионов серебра [10]. Исследуемые сорбенты по величине обменной ёмкости близки к синтетическим органическим ионообменникам, обменная

емкость которых составляет 5,3–5,5 ммоль-экв/г, что позволяет применять данные сорбенты для очистки воды от токсичных ионов тяжёлых металлов.

Применение адсорбентов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{TiOF}_2$ , изготовленных с уникальной морфологией, было предложено в качестве простой, недорогой, экологически чистая система очистки воды. Эти адсорбенты продемонстрировали отличную функциональность в улавливании токсинов  $\text{As}^{\text{V}}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  [14].

Был синтезирован новый эффективный синтетический клиноптилолит (SCP), и исследовано его потенциальное применение для одновременного удаления  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  из водного раствора [16]. Результаты подтвердили значительно более высокую адсорбционную способность, в частности 1992 мг г<sup>-1</sup> для  $\text{Fe}^{3+}$  при pH до 8.

Природные сорбенты находят широкое применение в процессах очистки природных и сточных вод. К природным сорбентам относят глины, туфы, трепелы, опоки, бокситы, диатомиты и другие породы, обладающие достаточно хорошими сорбционными свойствами [9]. Поглощительная способность природных сорбентов связана с их пористой структурой, обуславливающей высококоразвитую поверхность, и природой поверхности, на которой происходят процессы поглощения (адсорбции) и химического связывания (хемосорбции).

В работе [1] исследовался процесс сорбции на термически модифицированном шунгите Зажогинского месторождения (Карелия). Сорбционные свойства шунгитов объясняются поглощением сферическими фуллереновыми молекулами различных токсичных веществ. Модифицированный шунгит обладает большей адсорбционной способностью по соотношению к катионам железа (III) по сравнению с остальными природными сорбентами.

В качестве природного сорбента для исследования был взят и изучен сорбент, полученный из палыгорскитовых глин из бразильского штата Пиауи. Данный материал был применён в качестве экологически чистых адсорбентов для удаления ионов  $\text{Fe}^{3+}$  из водных растворов. Природные палыгорскиты (Palys) показали превосходными характеристиками по удалению  $\text{Fe}^{3+}$  из водных растворов (около 60 мг/г). Процесс адсорбции на данном сорбенте наилучшим образом описывается моделью Ленгмюра [13].

По отношению к ионам железа (III) применяются такие природные сорбенты, как монтмориллонит и каолинит. Были проведены исследования по извлечению ионов железа (III) из водных растворов в статических условиях с применением указанных сорбентов. В результате эксперимента было установлено, что природные сорбенты — каолинит и монтмориллонит — обладают сорбционными свойствами по отношению к ионам железа (III). Изотермы сорбции ионов железа (III) в широком интервале концентраций раствора хлорида железа подчиняются уравнению Ленгмюра [33].

Также исследовались природные минеральные сорбенты доломит и шунгит. Природный доломит — осадочная карбонатная горная порода, преимущественно состоящая из породообразующего минерала класса карбонатов — доломита  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ . На основе природного доломита изготавливают

фильтрующие материалы, которые обладают способностью корректировать pH очищаемой воды [7].

В последнее время в различных областях применения в качестве экологически чистой альтернативы повышенное внимание уделяется синтезу новых функциональных материалов, которые получают из возобновляемых источников. Одним из таких представителей является хитозан (CS). На основе хитозана получены композитные криогели [15], сорбционные свойства которых исследованы в отношении удаления двухвалентных ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ ) и трёхвалентных ( $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$ ) катионов из промышленных сточных вод.

Особый интерес представляет использование для сорбции ионов тяжёлых металлов природных минеральных сорбентов, обладающих рядом преимуществ: доступность, механическая и химическая стойкость, высокая сорбционная ёмкость [2].

В качестве таких материалов можно использовать минеральное сырьё, добываемое открытым способом, — мергель Баскунчакского месторождения и опоку Каменнаярского месторождения. Также проводились исследования сорбция ионов Fe (III) на поверхности песка [12]. Данные породы в десятки раз дешевле искусственных и синтетических сорбентов, могут обеспечивать достаточно высокую степень очистки сточных вод. Кроме того, такие сорбенты обладают значительной устойчивостью к радиационному излучению.

Целью данной работы являлось изучение возможности извлечения ионов железа (III) из водных растворов с использованием минерального сырья — мергеля Баскунчакского месторождения Астраханской области. Исследуемый образец имеет светлую окраску. Порода каменистая, плотная, мелоподобная. Текстура слоистая, однородная. Свойства слоя напрямую зависят от процента его влажности. Чем больше глины, тем ярче выражена эта связь. При большом содержании влаги, устойчивость глинистых слоёв мергеля значительно снижается.

Чтобы определить сорбционные характеристики мергеля по отношению к ионам  $\text{Fe}^{+3}$ , проводили эксперимент в статическом режиме, применяя метод ограниченного объёма. Содержание ионов  $\text{Fe}^{+3}$  до и после сорбции определяли с помощью ионоселективного электрода «ХС-Fe-001».

Полученные результаты процесса адсорбции ионов железа при температурах 293 и 308 К на исследуемом мергеле показаны в виде изотерм  $E = f(pC)$  на рисунке 1.

Судя по построенным изотермам, наблюдается зависимость процесса сорбции ионов железа (III) на мергеле от температуры, которая показывает эндотермический характер. Эти результаты позволяют сделать вывод о большом вкладе процесса хемосорбции железа на данном сорбенте.

Полученные данные процесса адсорбции на мергеле были описаны с использованием адсорбционных моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина – Радушкевича.

Были построены изотермы сорбции согласно уравнению Ленгмюра и графически найдены константы уравнения (Рисунок 2).

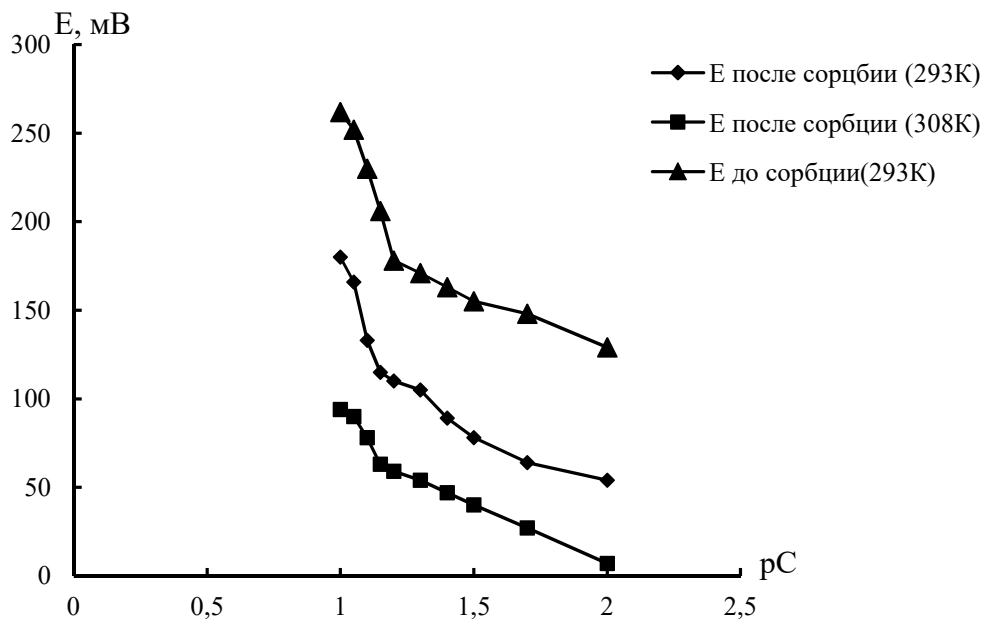


Рисунок 1 — Изотермы адсорбции системы «Fe<sup>3+</sup> – мергель»

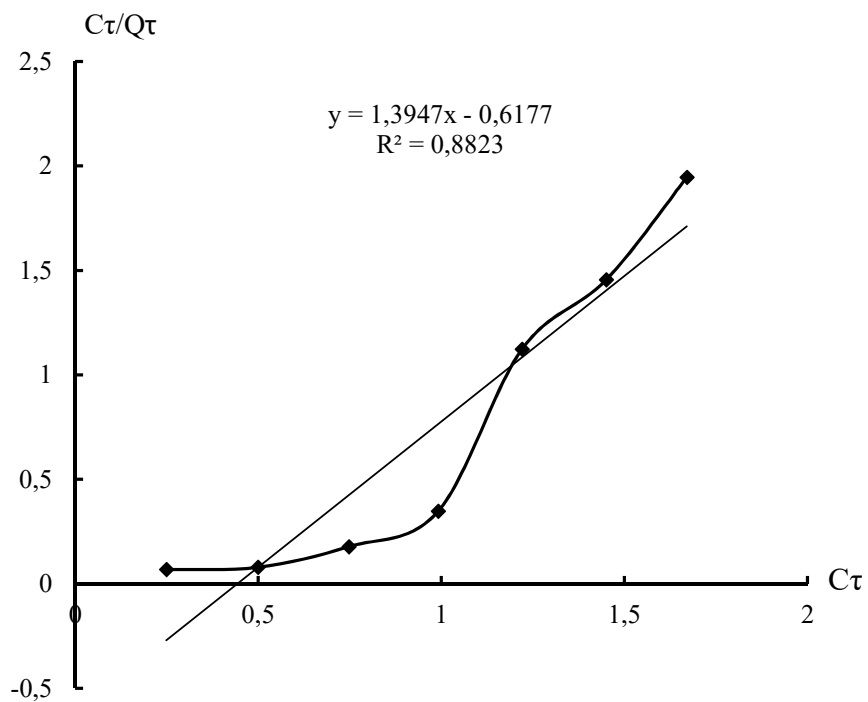


Рисунок 2 — Изотерма сорбции ионов железа (III) мергелем по модели Ленгмюра при 293К

На рисунке 3 представлена изотерма сорбции  $\text{Fe}^{+3}$  на мергеле в координатах уравнения Фрейндлиха в линейной форме « $\ln Q_\tau = f(\ln C_\tau)$ ».

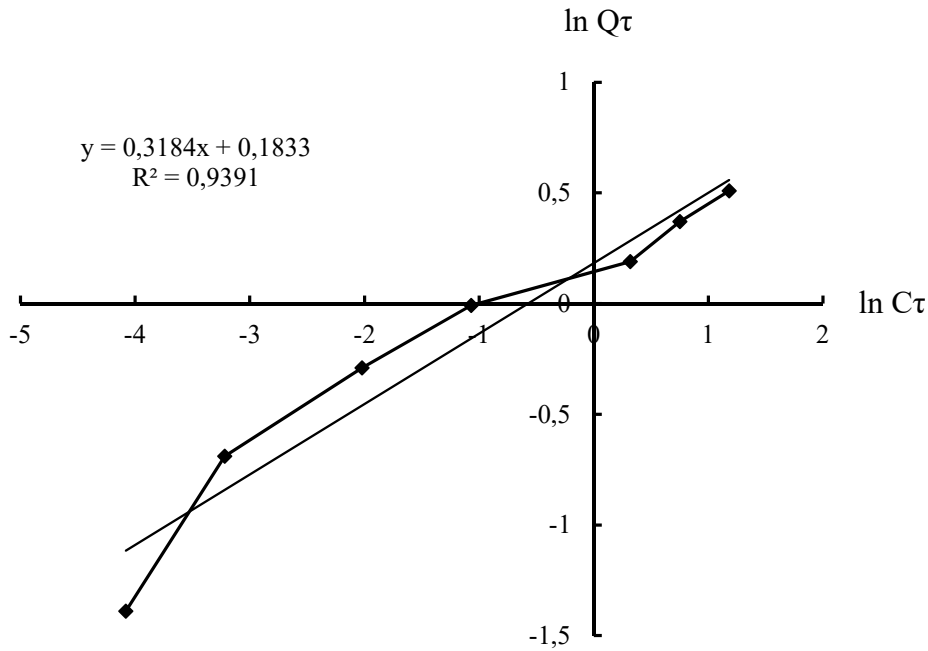


Рисунок 3 — Изотерма адсорбции ионов железа (III) мергелем по модели Фрейндлиха при 293К

Изотерма Фрейндлиха, в отличие от изотермы Ленгмюра, не даёт предельного значения адсорбции при насыщении.

На рисунке 4 показаны экспериментальные данные по результатам адсорбции  $\text{Fe}^{+3}$  на природном материале — мергеле — при заданной температуре в координатах уравнения Темкина.

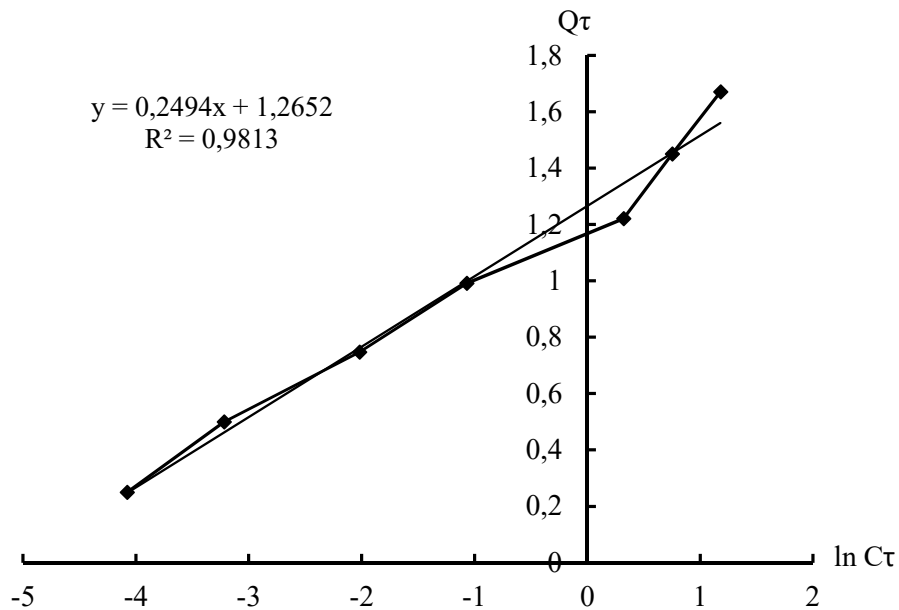


Рисунок 4 — Изотерма сорбции ионов железа (III) мергелем по модели Темкина при 293 К

По модели Темкина рассчитывается параметр  $K_T$ , учитывающий взаимодействие между ионами  $Fe^{3+}$  и адсорбционными центрами поверхности сорбента. Согласно модели Темкина, предполагается, что теплота процесса адсорбции в слое линейно уменьшается в процессе заполнения слоя вследствие отталкивания ионов железа.

Данные эксперимента по адсорбции ионов железа (III) на природном сорбенте — мергеле — в координатах уравнения Дубинина – Радушкевича « $\ln Q_t = f(\ln C_s/C_t)^2$ » показаны на рисунке 5.

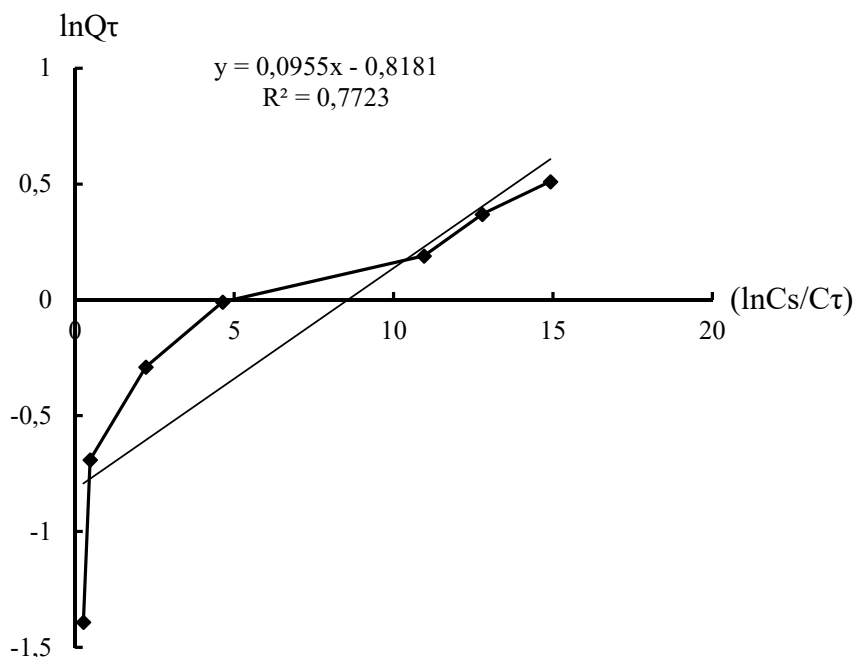


Рисунок 5 — Изотерма адсорбции ионов железа (III) на мергеле по модели Дубинина — Радушкевича при 293 К

В таблице представлены основные параметры адсорбционных моделей, найденные путём графического решения соответствующих линейных уравнений.

Таблица — Константы изотерм Фрейндлиха, Ленгмюра, Темкина и Дубинина – Радушкевича для ионов железа (III) на мергеле,  $T = 293 \pm 2$  К

Френдлих			Ленгмюр			Тёмкин			Дубинин – Радушкевич		
n	$K_F$	$R^2$	$Q_e$ , ммоль/г	$K_L$ , г/ммоль	$R^2$	$\infty$	$K_T$	$R^2$	$Q_{\infty}^{DR}$ , ммоль/г	E, кДж/моль	$R^2$
3,14	1,201	0,94	Не выходит на плато	2,257	0,88	4,01	159,7	0,98	2,27	2,74	0,77

При исследовании адсорбционного равновесия ионов железа (III) на минеральных сорбентах были получены результаты, которые были проанализированы по коэффициенту детерминации ( $R^2$ ; табл.). По данным результатам можно сделать вывод, что как уравнения для неоднородной поверхности (Френдлих, Темкин), так и уравнение Ленгмюра для однородной поверхности, а также уравнение теории заполнения микропор по Дубинину –



Радужкевичу могут быть формально применены при описании адсорбционного равновесия ионов железа (III) на минеральных сорбентах.

Для описания процесса сорбции  $\text{Fe}^{3+}$  на мергеле более предпочтительна изотерма Темкина. Установлено, что адсорбция ионов железа (III) мергелем — эндотермический процесс, т. к. повышение температуры приводит к увеличению поглощения сорбтива исследуемым сорбентом.

### Список литературы

1. Диденко, Т. А. Сорбционное извлечение ионов железа (III) из водных растворов / Т. А. Диденко, О. А. Веревкина. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbtsionnoe-izvlechenie-ionov-zheleza-iii-iz-vodnyh-rastvorov>.
2. Использование метода сорбционного концентрирования на примере некоторых ионов металлов с целью их последующего определения / Н. М. Алыков, А. С. Реснянская. — Астрахань : Астраханский инженерно-строит. ин-т, 2000. — 55 с.
3. Назаров, В. Д. Сооружения подготовки пресных вод для системы ППД нефтяных месторождений / В. Д. Назаров, М. В. Назаров // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2009. — № 6. — С. 7–12. — EDN KXRTBT.
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Астраханской области в 2021 году : Государственный доклад. — Астрахань : Управление Роспотребнадзора по Астраханской области, 2022. — 173 с.
5. Парамонова, А. Н. Использование синтетических катионитов для сорбции ионов железа (III) и железа (II) / А. Н. Парамонова, Л. Г. Смирнова // Современные проблемы медицины и естественных наук / Марийский гос. ун-т. — Йошкар-Ола : СТРИНГ, 2017. — Вып. 6. — С. 143–147. — EDN YOONVD.
6. Подготовка подтоварных вод для использования в системе ППД низкопроницаемых коллекторов нефти / В. Д. Назаров, М. В. Назаров, М. Е. Иванов [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2017. — № 6. — С. 35–56. — EDN ZXRACR.
7. Полещук, И. Н. Извлечение ионов железа (III) из водных растворов природными сорбентами / И. Н. Полещук, И. А. Пинигина, Е. С. Созыкина. — URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37443>.
8. Применение опытных образцов дробленых активных углей для очистки городских ливневых сточных вод / А. К. Шутова, Е. Е. Гарибзянова, А. В. Мясникова [и др.] // Химия. Экология. Урбанистика. — 2017. — Т. 2017. — С. 160–164. — EDN ZHKVLZ.
9. Сорбционная способность природных сорбентов / С. В. Беленова, В. И. Вигдорович, Н. В. Шель, Л. Е. Цыганкова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. — 2015. — Т. 20, № 2. — С. 388–396. — EDN TSVCUJ.
10. Сорбция ионов железа (III) на синтетических композитных сорбентах / В. В. Котов, Е. И. Горелова, И. С. Горелов, Г. Н. Данилова // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2014. — Т. 14, № 3. — С. 413–418. — EDN SIVVWT.
11. Фоменко А. И. Природные сорбенты для очистки питьевой воды от ионов железа / А. И. Фоменко. — URL: <https://apni.ru/article/2741-prirodnie-sorbenti-dlya-ochistki-pitevoj-vodi>.
12. Яковлева, А. А. О некоторых кинетических моделях сорбции ионов железа (III) на поверхности речного песка из Вьетнама / А. А. Яковлева, Ч. Т. Нгуен, Т. Х. Нгуен // Современные технологии и научно-технический прогресс. — 2020. — Т. 1, № 7. — С. 97–98. — doi 10.36629/2686-9896-2020-1-97-98. — EDN AJAQVY.
13. Middea, A. Removal of  $\text{Fe}^{3+}$  ions from aqueous solutions by adsorption on natural eco-friendly Brazilian palygorskites / Antonieta Middea, Luciana Spinelli Ferreira, Fernando Gomes de Souza Junior de Souza Junior et al. — URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3671831/v1>.
14. Goma, H. Highly-efficient removal of  $\text{As}^{\text{V}}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , and  $\text{Al}^{3+}$  pollutants from water using hierarchical, microscopic  $\text{TiO}_2$  and  $\text{TiOF}_2$  adsorbents through batch and fixed-bed columnar

techniques / Hassanien Gomaa, Mohamed A. Shenashen, Hitoshi Yamaguchi, Ahmad S. Alamoudi, Mohamed Abdelmottaleb, Mohamed F. Cheira, Tarek A. Seaf El-Naser, Sherif A. El-Safty. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.063>.

15. Humelnicu, D. A Comparative Study on  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , and  $\text{Cr}^{3+}$  Metal Ions Removal from Industrial Wastewaters by Chitosan-Based Composite Cryogels / D. Humelnicu, E. S. Dragan, M. Ignat, M. V. Dinu. — URL: <https://doi.org/10.3390/molecules25112664>.

16. Munir, Tallat. Interfacial Adsorption for Efficient Removal of Coexisting Heavy Cations ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ , and  $\text{Sr}^{2+}$ ) from Wastewater Using Synthetic Clinoptilolite Via Single-Treatment Approach / Munir Tallat, Zhou Jiawei, Liu Ming, Bai Shiyang, Sun Jihong. — URL: <https://ssrn.com/abstract=4656928>, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4656928>.

17. Petukhova, Yu. N. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов (51–54) / Yu. N. Petukhova, S. I. Ilyina, A. V. Fursenko, M. A. Nosyrev. — URL: <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254>.

### References

1. Didenko, T. A., Verevkina, O. A. *Sorbtsionnoe izvlechenie ionov zheleza (III) iz vodnykh rastvorov = Sorptive extraction of iron (III) ions from aqueous solutions*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbtsionnoe-izvlechenie-ionov-zheleza-iii-iz-vodnyh-rastvorov>.

2. Alykov, N. M., Resnyanskaya, A. S. *Ispolzovanie metoda sorbtsionnogo kontsentrirvaniya na primere nekotorykh ionov metallov s tselyu ikh posleduyushhego opredeleniya = Use sorption concentration on the example of some metal ions for subsequent determination*. Astrakhan: Astrakhan Civil Engineering Institute; 2000: 55.

3. Nazarov, V. D., Nazarov, M. V. Sooruzheniya podgotovki presnykh vod dlya sistemy PPD neftyanykh mestorozhdeniy. *Zashchita okruzhayushhey sredy v neftegazovom komplekse = Environmental protection in the oil and gas complex*. 2009; 6: 7–12.

4. *O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Astrahanskoy oblasti v 2021 godu: Gosudarstvennyy doklad = State report on the health and epidemiological well-being of the population in Astrakhan region in 2021: State report*. Astrakhan: Office of Rospotrebnadzor for the Astrakhan region; 2022: 173.

5. Paramonova, A. N., Smirnova, L. G. *Ispolzovanie sinteticheskikh kationitov dlja sorbcii ionov zheleza (III) i zheleza (II). Sovremennye problemy meditsiny i estestvennykh nauk = Modern problems of medicine and natural sciences*. Yoshkar-Ola: STRING; 2017; 6: 143–147. EDN YOONVD.

6. Nazarov V. D., Nazarov, M. V., Ivanov, M. E. [et al.] *Podgotovka podtovarnykh vod dlya ispolzovaniya v sisteme PPD nizekpronitsaemykh kollektorov nefti. Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2017; 6: 35–56. EDN ZXRACR.

7. Poleshchuk, I. N., Pinigina, I. A., Sozykina, E. S. *Izvlechenie ionov zheleza (III) iz vodnykh rastvorov prirodnyimi sorbentami = Extraction of iron ions (III) from aqueous solutions by natural sorbents*. Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37443>.

8. Shutova, A. K., Garibzyanova, Ye. Ye., Myasnikova, A. V. [et al.]. *Primenenie opytnykh obraztsov droblennykh aktivnykh ugley dlya ochistki gorodskikh livnevykh stochnykh vod. Khimiya. Ekologiya. Urbanistika = Chemistry. Ecology. Urbanism*. 2017; 2017: 160–164. EDN ZHKVLZ.

9. Belenova, S. V., Vigdorovich, V. I., Shel, N. V., Tsygankova, L. E. *Sorbtsionnaya sposobnost prirodnykh sorbentov. Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya "Yestestvennye i tekhnicheskie nauki" = Bulletin of Tambov University. Series "Natural and technical sciences"*. 2015; 20 (2): 388–396. EDN TSVCUJ.

10. Kotov, V. V., Gorelova, E. I., Gorelov, I. S., Danilova, G. N. *Sorbtsiya ionov zheleza (III) na sinteticheskikh kompozitnykh sorbentakh. Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy = Sorption and chromatographic processes*. 2014; 14(3): 413–418. EDN SIVVWT.

11. Fomenko, A. I. *Prirodnye sorbenty dlya ochistki pitevoy vody ot ionov zheleza = Natural sorbents for purification of drinking water from iron ions*. Available at: <https://apni.ru/article/2741-prirodnie-sorbenti-dlya-ochistki-pitevoj-vodi>.

12. Yakovleva, A. A., Nguen, Ch. T., Nguen, T. H. O nekotorykh kineticheskikh modelyakh sorbtsii ionov zheleza (III) na poverhnosti rechnogo peska iz Vyetnama. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress = Modern technologies and scientific and technological progress*. 2020; 1(7): 97–98. doi 10.36629/2686-9896-2020-1-97-98. EDN AJAQVY.

13. Middea, A., Spinelli Ferreira, L., Gomes de Souza Junior, F. et al. *Removal of Fe<sup>3+</sup> ions from aqueous solutions by adsorption on natural eco-friendly Brazilian palygorskites*. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3671831/v1>.

14. Hassanién, Gomaá, Mohamed A., Shenashen, Hitoshi, Yamaguchi, Ahmad S., Alamoudi, Mohamed, Abdelmottaleb, Mohamed F., Cheira, Tarek, A. Seaf El-Naser, Sherif A., El-Safty. *Highly-efficient removal of As<sup>V</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, and Al<sup>3+</sup> pollutants from water using hierarchical, microscopic TiO<sub>2</sub> and TiOF<sub>2</sub> adsorbents through batch and fixed-bed columnar techniques*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.063>.

15. Humelnicu, D., Dragan, E. S., Ignat, M., Dinu, M. V. A Comparative Study on Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, and Cr<sup>3+</sup> Metal Ions Removal from Industrial Wastewaters by Chitosan-Based Composite Cryogels. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules25112664>.

16. Munir, Tallat, Zhou, Jiawei, Liu, Ming, Bai, Shiyang, Sun, Jihong. *Interfacial Adsorption for Efficient Removal of Coexisting Heavy Cations (Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Sr<sup>2+</sup>) from Wastewater Using Synthetic Clinoptilolite Via Single-Treatment Approach*. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4656928> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4656928>

17. Petukhova, Yu. N., Ilyina, S. I., Fursenko, A. V., Nosyrev, M. A. *Ochistka stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov s pomoshchyu sorbentov (51–54) = Treatment of wastewater from heavy metal ions with sorbents (51–54)*. Available at: <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254>.

#### Информация об авторах

Реснянская А. С. — кандидат химических наук, доцент;

Джигола Л. А. — кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой;

Васильев В. А. — кандидат химических наук, доцент.

#### Information about the authors

Resnyanskaya A. S. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor;

Dzhigola L. A. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department;

Vasilyev V. A. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor.

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution of the authors

All authors have made equivalent contributions to publications.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for publication 20.11.2023.