

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-235-249>

## Изотермы сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> отходами промышленных предприятий из водных растворов

А. В. Лысенко<sup>1</sup> ✉, Т. А. Молокоедова<sup>1</sup>, Ю. В. Соколова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НПО Лавочкина»  
ул. Ленинградская, д. 24, г. Химки 141402, Российская Федерация

✉ e-mail: bgalav@mail.ru

### Резюме

**Целью** настоящей работы являлось изучение изотерм процесса сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> отходами промышленных предприятий из водных растворов.

**Методы.** В качестве сорбента использовались техногенные отходы сахарного производства (дефекационная грязь АО «Сахарный комбинат Львовский»), кожевенного производства (хромовая стружка Курский кожевенный завод ООО «Курская кожа») и предприятия авиационного приборостроения (гальванический шлам АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова).

В качестве сорбатов выбраны ионы Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, поскольку проблема обезжелезивания является особенно актуальной для Курской области из-за условий образования и особенностей формирования природных и сточных вод.

В качестве научного основания для изучения сорбции предложен термодинамический подход, согласно которому сорбционные свойства можно оценить по величине максимальной рабочей ценности переноса вещества из раствора на поверхности сорбентов. Для описания изотерм сорбции использовались математические модели Ленгмюра и Фрейндлиха. Для определения остаточного содержания ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> построены калибровочные графики зависимости оптической плотности от концентрации ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> в водных растворах сульфосалицилатным фотометрическим методом.

**Результаты.** По уравнениям изотерм сорбции Фрейндлиха и Ленгмюра обработаны и проанализированы изотермы сорбции и определены параметры процесса сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> отходами производства из водных растворов. Установлена самопроизвольность протекания данного процесса.

**Заключение.** Полученные результаты показали пригодность отходов производства в качестве недорогого сорбента для эффективного удаления ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> из водных растворов в диапазоне от 0,8636 до 8,636 г/дм<sup>3</sup>. Установлено, что сорбция ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> на отходах производства происходит в виде монослойной сорбции на поверхности, которая является однородной по сорбционному сродству и описывается изотермами Ленгмюра, что подтверждено высоким значением величины доверительной аппроксимации ( $R^2 = 0,9909-0,9955$ ).

В ходе работы установлено, что наибольшую сорбционную способность проявляет гальванический шлам и дефекат.

**Ключевые слова:** сорбция; изотермы; термодинамика; уравнение Ленгмюра; уравнение Фрейндлиха; отходы производства; гальванический шлам; дефекат.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Лысенко А. В., Молокоедова Т. А., Соколова Ю. В., 2023

**Для цитирования:** Лысенко А. В., Молокоедова Т. А., Соколова Ю. В. Изотермы сорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  отходами промышленных предприятий из водных растворов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 235–249. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-235-249>

Поступила в редакцию 18.02.2023

Подписана в печать 14.04.2023

Опубликована 30.05.2023

## Isotherms of the Sorption of $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ Ions by Industrial Waste from Aqueous Solutions

Anna V. Lysenko<sup>1</sup> ✉, Tatyana A. Molokoedova<sup>1</sup>, Yuliya V. Sokolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: bgalav@mail.ru

### Abstract

**The purpose** of this work was to study the isotherms of the process of sorption of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions by industrial waste from aqueous solutions.

**Methods.** As a sorbent, technogenic wastes from sugar production (defecation mud of Lgovsky Sugar Plant JSC), leather industry (chrome shavings from the Kursk Tannery OOO Kursk Kozha) and aviation instrumentation enterprises (galvanic sludge from Aviaavtomatika JSC named after V.V. Tarasova").

$\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions were chosen as sorbates, since the problem of iron removal is especially relevant for the Kursk region, due to the conditions of formation and the peculiarities of the formation of natural and waste waters.

As a scientific basis for the study of sorption, thermodynamic approaches are proposed, according to which sorption properties can be estimated by the value of the maximum working value of the transfer of a substance from a solution to the surface of sorbents. The mathematical models of Langmuir and Freundlich were used to describe the sorption isotherms. To determine the residual content of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions, calibration plots of the dependence of optical density on the concentration of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions in aqueous solutions were constructed using the sulfosalicylate photometric method.

**Results.** According to the equations of Freundlich and Langmuir sorption isotherms, the sorption isotherms were processed and analyzed, and the parameters of the process of sorption of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions by production waste from aqueous solutions were determined. The spontaneity of this process is established.

**Conclusion.** The results obtained showed the suitability of production waste as an inexpensive sorbent for the effective removal of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions from aqueous solutions in the range from 0.8636 to 8.636 g/dm<sup>3</sup>.

It has been established that the sorption of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions on production waste occurs in the form of monolayer sorption on the surface, which is homogeneous in sorption affinity and is described by Langmuir isotherms, which is confirmed by a high value of the confidence approximation ( $R^2 = 0.9909-0.9955$ ).

In the course of the work, it was found that galvanic sludge and defecation exhibit the greatest sorption capacity.

**Keywords:** sorption; isotherms; thermodynamics; Langmuir equation; Freundlich equation; production waste; galvanic sludge, defecation.

**Conflict of interest:** The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Lysenko A. V., Molokoedova T. A., Sokolova Y. V. Isotherms of the Sorption of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  Ions by Industrial Waste from Aqueous Solutions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023; 13(2): 235–249. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-235-249>

Received 18.02.2023

Accepted 14.04.2023

Published 30.05.2023

\*\*\*

## Введение

Железо является одним из наиболее встречающихся элементов в природной воде. Говоря о ее качестве, неудивительно, что вопрос присутствия железа в природной воде является наиболее актуальным [1]. Рассмотрим особенности состава воды Курской области, которые можно объяснить условиями её формирования.

Данная территория полна полезными ископаемыми. В особенности г. Железногорск Курской области, который занимает центральную часть железорудной провинции Курской магнитной аномалии (КМА), что объясняет крупные залежи железной руды на ее территории [2].

Минеральные ресурсы области представлены также тугоплавкими глинами, карбонатными породами, легкоплавкими глинами и суглинками, трепелами и другими материалами, содержащими большое количество железистых соединений [3]. Все вышеперечисленные полезные ископаемые благоприятствуют накоплению железа в природных водных объектах, с которыми вода контактирует в ходе своей миграции.

Большое содержание железа и его соединений попадает в водные объекты из стоков агропромышленных, металлургических, машиностроительных и других комплексов [4].

В питьевой воде ионы  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  также могут присутствовать из-за процессов коррозии чугунных или стальных водопроводных канализационных труб. Присутствие в воде железа в концентрациях, превышающих ПДК, ведет к образованию характерных железистых отложений на сантехнике, нагревательных элементах бытовых приборов, промышленных установках и т. д.

Железистая вода негативно влияет и на здоровье человека и животных. Избыточное содержание железа крайне отрицательно сказывается на репродуктивной функции человека, а также приводит к дефициту такого важного микроэлемента, как цинк. Повышенная концентрация железа может стать причиной развития дерматитов и аллергических заболеваний. Соединения кислорода и железа имеют канцерогенные свойства. Они являются причиной изменения ДНК-клеток и перерождения их в раковые. Железо подпитывает их, ведет к их росту.

В обычном состоянии в крови циркулирует очень мало свободного железа, поскольку оно плотно связано с белками. При накоплении в клетках оно катализирует вредные процессы. Ускоряется окисление жиров, из-за этого образуются свободные радикалы. Они представляют собой атомы кислорода, имеющие высокую окислительную способность, повреждающую органеллы (постоянные элементы клеток, необходимые для ее существования) клеток и их стенки. Ранние симптомы отравления железом могут включать боль в животе, тошноту и рвоту. Постепенно избыток минерала накапливается во внутренних органах, вызывая серьезные повреждения мозга и печени.

Таким образом, вода, содержащая повышенную концентрацию железа, становится практически непригодной для хозяйственно-бытового и промышленного использования, именно поэтому проблема обезжелезивания воды для Курской области является наиболее актуальной.

На территории Курской области находится огромное количество промышленных предприятий: АО «Энерготекс», ООО «Проммонтаж», ООО ПО «Вагонмаш», АО «КЭАЗ», АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова, ОАО «Львовский завод «Электроцит», ЗАО «Счетмаш», АО «Электроагрегат», АО «Рудоавтоматика им. В. В. Сафошина», ООО «Свободинский ЭМЗ», АО «СКАРД-Электроникс»,

АО «Корневский завод НВА», ООО «КАЗ» и др., которые загрязняют окружающую среду минеральными веществами, солями тяжелых металлов и пр.

В настоящее время успешно осуществляется очистка сточных вод с использованием сорбентов на основе отходов производства [5–8], которые, как и природные сорбционные материалы, показывают высокую эффективность очистки. Данный подход решает сразу несколько задач: это и вторичное использование сырья, что делает производство малоотходным или безотходным; экономия финансов и, конечно же, природных ресурсов, поскольку питьевой воды становится все меньше, а ее запасы трудно восполнить [9–11].

В силу этого целью данной работы было изучение сорбционных свойств промышленных отходов предприятий Курской области при извлечении ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  из водных растворов.

Рассмотрим подробнее состав отходов производства, которые были использованы в работе в качестве сорбентов:

- дефекаат (АО «Сахарный комбинат Льговский»);
- хромовая стружка (ранее Курский кожевенный завод ООО «Курская кожа»);
- гальванический шлам (АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова»).

Дефекаат (дефекационная грязь) является отходом одной из стадий сахарного производства. Дефекаат относится к V классу опасности (безвредный) по степени негативного воздействия на окружающую природную среду согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО). В сухом состоянии дефекаат содержит 60–70% углекислой извести со смесью едких щелочей, примерно 10–15% органических соединений, 0,5–1% К (в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$ ), 0,2–0,9% Р (в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), 0,2–0,7% N, а также следовые количества Mg, S и микроэлементов [12–14].

Продукт реагентной очистки сточных вод – гальванический шлам является отходом II класса опасности (высокоопасный) и представляет собой суспензию труднорастворимых гидроксидов, карбонатов, иногда сульфидов тяжелых цветных металлов, соединений кальция и магния, а также железа. Состав шлама непостоянен и зависит от растворов, используемых в гальваническом цехе, и химических реагентов, применяемых в очистных сооружениях. Ориентировочный состав гальванического шлама: минеральные примеси извести около 50%; хлориды, нитриты сульфаты порядка примерно 3–5%; гидроксиды тяжелых металлов (Pb, Zn, Fe, Ni, Sn, Cu, Kd,  $\text{Cr}^{3+}$ , Al, Bi) около 45–47% [15–16].

Кожевенная (хромовая) стружка – чешуйчатый отход производства кожевенной продукции, негорючий материал из остатков шкур, кожи, полуфабрикатов, материалов, образующихся в процессе переработки исходного материала. Данный вид отходов относится к IV классу опасности (малоопасный). Мы использовали стружку от серых до голубовато-зеленых оттенков размером от 0,2 до 2,0 мм [17–21].

## Материалы и методы

Термодинамические подходы к проблеме сорбции являются самыми широкими, и сорбционные свойства можно оценить по величине максимальной рабочей ценности переноса вещества из раствора на поверхности [22]. В области средних равновесных концентраций (при малых изменениях концентрации сорбента) корреляцию сорбции от концентрации можно описать уравнением Фрейндлиха, в основе которого лежит предположение, что изотерма сорбции представляет собой параболу [8]:

$$\Gamma = K \cdot C^{1/n}, \quad (1)$$

где  $1/n$  и  $K$  – константы.

Степень  $1/n$  обусловлена природой и температурой сорбата и является подходящей дробью, характеризующей степень сходимости изотермы к прямой линии и интенсивность сорбции. Константа  $K$  зависит от природы сорбата и сорбента и весьма изменчива. Она показывает сорбцию при равновесной концентрации сорбата 1 моль/дм<sup>3</sup> [23].

Уравнение Фрейндлиха в логарифмированной форме является прямой линией [24–25]:

$$\lg \Gamma = \lg K + \frac{1}{n} \lg C. \quad (2)$$

Отрезок линии, отсеченной на оси ординат, равен  $\lg K$ , а тангенс наклона линии к оси абсцисс равен  $1/n$ .

Уравнение Ленгмюра, которое обычно используется для аналитического описания изотермы мономолекулярной сорбции, при этом имеет вид

$$\Gamma = \Gamma_{\text{пр}} \frac{K}{1 + KC}, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – удельная сорбция, ммоль/г;  $\Gamma_{\text{пр}}$  – предельная сорбция, ммоль/г;  $C$  – равновесная концентрация сорбата, ммоль/л;  $K$  – сорбционная константа.

Уравнение Ленгмюра описывает изотерму сорбции во всех диапазонах равновесных концентраций. При низких концентрациях, когда  $C \ll 1/k$ , формула упрощается до следующего вида:

$$\Gamma = \Gamma_{\text{пр}} k C. \quad (4)$$

При условии, когда  $C \gg 1/k$ , формула (3) дает независимость сорбции от концентрации:

$$\Gamma = \Gamma_{\text{пр}} \frac{KC}{KC} = \Gamma_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) можно преобразовать в линейную форму, умножив его на  $(1 + kC)$ , а затем разделив  $\Gamma \Gamma_{\text{пр}} k$ , в результате чего уравнение принимает вид

$$\frac{C}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{\text{пр}}} C + \frac{1}{\Gamma_{\text{пр}} K}. \quad (6)$$

Уравнение (6) является уравнением прямой линии. По данной зависимости определяется величина предельного поглощения.

Сульфосалицилатным фотометрическим методом определяли общее содержание железа при длине волны  $\lambda = 430$  нм в кюветах с толщиной рабочего слоя 5 см на спектрофотометре ПромЭкоЛаб ПЭ-5400УФ (ООО «ЭКРОСХИМ»).

По зависимости оптической плотности ( $A$ ) от концентрации ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в водном растворе ( $C$ , мг/дм<sup>3</sup>) построен калибровочный график для определения остаточного содержания после сорбции, представленный на рисунке 1.

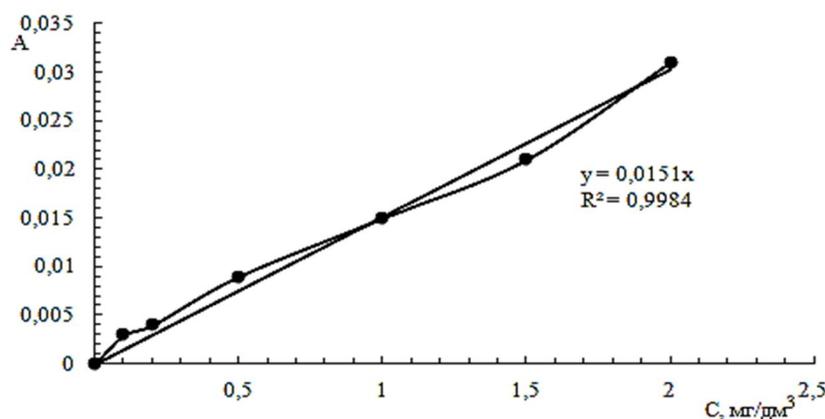


Рис. 1. Калибровочный график определения концентрации ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$

Fig. 1. Calibration graph for determining the concentration of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions

Для построения изотерм сорбции изучали зависимость величины сорбции от исходной концентрации ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  (в диапазоне от 0,8636 до 8,636 г/дм<sup>3</sup>). Масса навесок отходов производства составляла 0,5 г на объём водного раствора 0,02 дм<sup>3</sup>. Время контакта фаз 30 минут. По истечении времени суспензию фильтровали и определяли остаточную концентрацию ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в водном растворе по стандартной методике.

Величину сорбции ( $\Gamma$ ) определяли по формуле

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C_{0\text{ост}}) \cdot V}{m}, \quad (7)$$

где  $C_0$  – исходная концентрация ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , ммоль/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{ост}}$  – остаточная концентрация ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , ммоль/дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса навески отходов производства, г;  $V$  – объём водного раствора, содержащего ионы  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , дм<sup>3</sup>.

### Результаты и их обсуждение

Основную информацию о характере сорбции и сорбционных свойствах материалов можно получить из изотерм сорбции, которые характеризуют зависимость сорбции ( $\Gamma$ ) от концентрации ( $C$ ) сорбци-

онных компонентов при постоянной температуре:

$$\Gamma = f(C). \quad (8)$$

### Изотермы сорбции ионов $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ отходами производства из водных растворов

На основании того, что природные воды, а также промышленные сточные воды, в которые не исключены случаи залповых сбросов, характеризуются широким диапазоном концентраций загрязняющих веществ, рекомендуется исследовать процесс сорбции при различных исходных концентрациях ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в водных растворах.

Важной характеристикой материала, широко используемой в промышленности, которая позволяет оценивать свойства и структуру поверхности материала, является изотерма сорбции. При производстве сорбентов, катализаторов, и других сорбирующих материалов изотермы являются обязательными для оценки эффективности их работы.

Изотермы сорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  отходами производства из водных растворов, полученные при изучении термодинамики процесса сорбции, представлены на рисунке 2.

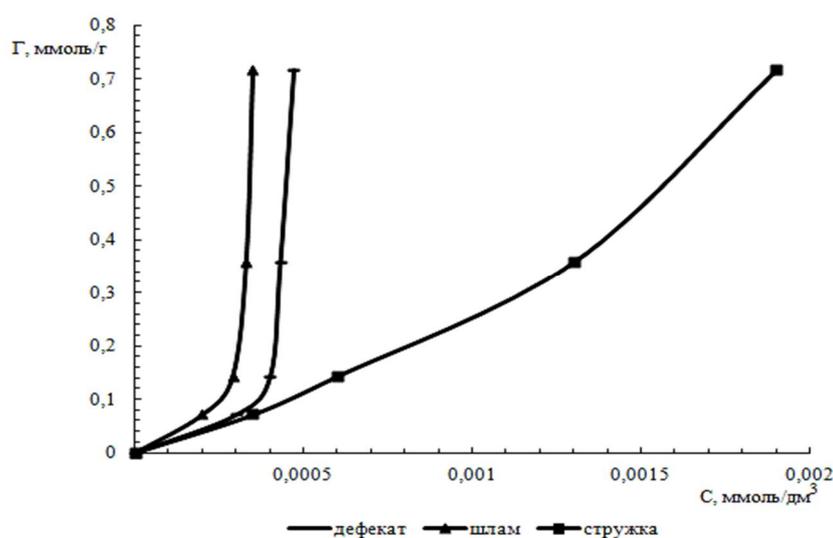


Рис. 2. Изотермы сорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  отходами производства из водных растворов

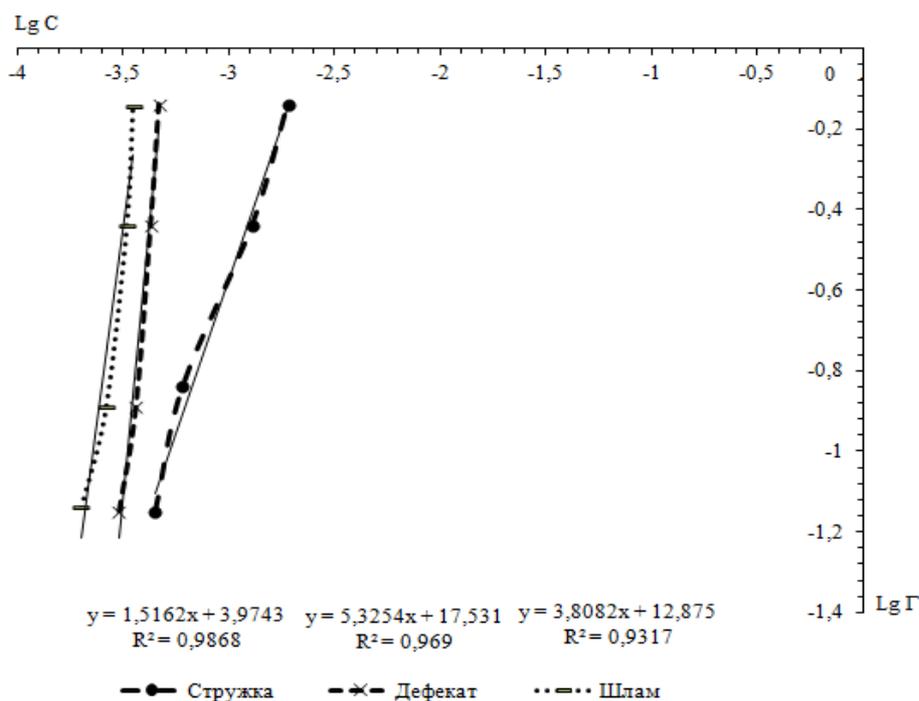
Fig. 2. Sorption isotherms of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions by industrial waste from aqueous solutions

В описании термодинамики процесса сорбции можно использовать различные математические модели: Ленгмюра, Фрейндлиха, Ленгмюра – Фрейндлиха, Редлиха – Петерсона, Темкина, Тота и пр. [26–28] Уравнения Фрейндлиха и Ленгмюра являются наиболее простыми и распространенными.

### Уравнение изотермы сорбции Фрейндлиха

На рисунке 3 представлен линейный вид уравнения Фрейндлиха при сорбции ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  отходами производства из водных растворов.

В таблице 1 приведены параметры процесса сорбции ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  отходами производства из водных растворов, полученные с помощью уравнения Фрейндлиха.



**Рис. 3.** Линейный вид уравнения Фрейндлиха при сорбции ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  отходами производства из водных растворов

**Fig. 3.** Linear form of the Freundlich equation during the sorption of  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions by production waste from aqueous solutions

**Таблица 1.** Параметры процесса сорбции ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  отходами производства из водных растворов, полученные с помощью уравнения Фрейндлиха

**Table 1.** The parameters of the process of sorption of  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions by industrial waste from aqueous solutions, obtained using the Freundlich equation

Отход производства	$K$ , (ммоль/г)·(ммоль/л) <sup>1/n</sup>	1/n	n	R <sup>2</sup>
Дефекат	2070,39	0,198	5,06	0,9690
Гальванический шлам	2690,30	0,263	3,80	0,9317
Кожевенная стружка	273,45	0,769	1,30	0,9868

Количественной мерой сродства ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  к поверхности отходов производства служит константа  $K$  уравнения Фрейндлиха. Наибольшим сродством по отношению к ионам  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  обладает гальванический шлам. Близким к этому значению сродством обладает дефекат, наименьшим – кожевенная стружка.

Из литературных источников известно, что величина  $1/n$  уравнения Фрейндлиха для сорбции из растворов должна находиться в пределах  $0,1-1$  [25]. Для всех исследуемых сорбентов значения данного параметра попадают в указанный интервал.

В случае изотермы Фрейндлиха значение  $n$  больше единицы ( $n = 1,30-5,06$ ), что указывает на то, что ионы  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  благоприятно сорбируются на отходах производства.

#### Уравнение изотермы сорбции Ленгмюра

В отличие от формулы Ленгмюра для уравнения Фрейндлиха нет простой теоре-

тической основы, т. к. данное уравнение не дает начальной зависимости сорбции или предела постоянной сорбции. Именно поэтому изотермы, описанные по уравнению Ленгмюра, являются одной из важных теоретических функций. Такая модель сорбции означает, что существуют некоторые сорбционные центры с аналогичной энергией сорбции на поверхности. Все сорбированные частицы контактируют с центрами сорбции и не взаимодействуют между собой, в результате чего на поверхности сорбента образуется мономолекулярный сорбционный слой [20]. Если на поверхности сорбента может сорбироваться только один слой молекул, то с ростом концентрации растворенного вещества происходит поверхностное насыщение молекулами сорбата.

На рисунке 4 представлен линейный вид уравнения Ленгмюра при сорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  отходами производства из водных растворов.

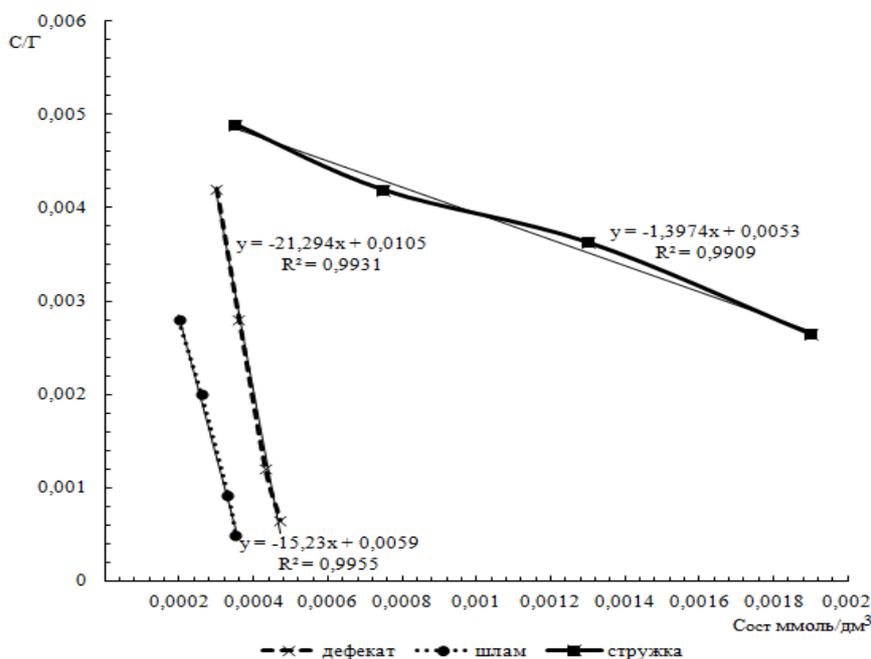


Рис. 4. Линейный вид уравнения Ленгмюра при сорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  отходами производства из водных растворов

Fig. 4. Linear form of the Langmuir equation during the sorption of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ions by production waste from aqueous solutions

Поскольку при сорбции вещества из воды происходит уменьшение свободной энергии системы  $\Delta G$ , Когановский предложил использовать сорбционную константу  $k$  для прогнозирования эффективности извлечения растворённых соединений из воды. Константа равновесия при сорбции из растворов  $k$  связана с  $\Delta G$  зависимостью вида [21]

$$-\Delta G = RT \ln k. \quad (9)$$

В таблице 2 приведены параметры процесса сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> отходами производства из водных растворов, полученные с помощью уравнения Ленгмюра.

**Таблица 2.** Параметры процесса сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> отходами производства из водных растворов, полученные с помощью уравнения Ленгмюра

**Table 2.** The parameters of the process of sorption of Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> ions by industrial waste from aqueous solutions, obtained using the Langmuir equation

Отход производства	$\Gamma_{\text{пр}}$ , ммоль/г	$k$	$\Delta G$ , Дж/моль	$R^2$
Дефекат	0,46	2070,39	-18609,60	0,9931
Гальванический шлам	0,63	2690,30	-19247,95	0,9955
Кожевенная стружка	0,069	273,45	-13675,70	0,9909

Сорбционная константа  $k$ , напрямую связанная с энергией взаимодействия между сорбентом и сорбатом, имеет аналогичную зависимость и характеризует наименьшее взаимодействие между ионами Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> и поверхностью кожевенной стружки.

Самопроизвольность протекания процесса извлечения ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> из водных растворов отходами производства определяет отрицательные значения энергии Гиббса ( $\Delta G = -13675,7 - 19247,95$  Дж/моль).

В этом исследовании данные о равновесии для ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> на отходах производства были сопоставлены с моделями Ленгмюра и Фрейндлиха при различных начальных концентрациях ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> в водных растворах. Экспериментальные данные более точно соответствуют изо-

Анализ изотерм сорбции ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> по уравнению Ленгмюра позволяет определить важную характеристику отходов производства как сорбентов – предельную сорбцию (сорбционную емкость), обусловленную взаимодействием ионов металлов с функциональными группами сорбента. Из данных, приведенных в таблице 2, видно, что степень сорбции ионов металлов к поверхности отходов производства изменяется в ряду следующим образом: гальванический шлам > дефекат > кожевенная стружка.

терме Ленгмюра (см. рис. 4). Это подтверждается высоким значением  $R^2$  в случае Ленгмюра (0,9909 – 0,9955) по сравнению с изотермами Фрейндлиха (0,9317 – 0,9869).

Сорбция ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> на отходах производства происходит в виде монослойной сорбции на поверхности, которая является однородной по сорбционному средству.

## Выводы

Удаление ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> при очистке сточных вод является сложной задачей, требующей срочных и практических решений. После сброса неочищенных сточных вод агропромышленных, металлургических, машиностроительных и других комплексов в окружающую среду они больше не пригодны для питья или

повторного использования в промышленности.

В данной работе изучено влияние ионов тяжелых металлов, а именно ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , на окружающую среду, а также рассмотрены факторы, объясняющие повышенное содержание железистых соединений в природных и сточных водах, связанные с условиями образования и особенностями их формирования.

Успешно решают проблему удаления загрязняющих веществ из воды сорбционные материалы, делая воду чистой и соответствующей требуемым санитарным нормам.

В ходе данной работы были построены и изучены изотермы сорбции ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  из водных растворов. Рассмотрены уравнения Ленгмюра и уравнения Фрейндлиха для полученных данных, а также выведены параметры сорбционных процессов.

Настоящее исследование установило пригодность отходов производства в качестве недорогого сорбента для эффективного удаления ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  из водных растворов в диапазоне от 0,8636 до 8,636 г/дм<sup>3</sup>. Процесс сорбции соответствует изотермам Ленгмюра с высоким значением  $R^2$  (более 0,99) по сравнению с изотермами Фрейндлиха (менее 0,98).

По уравнению Фрейндлиха наименьшим средством обладает кожевенная стружка. Она же имеет меньшую сорбционную емкость по уравнению Ленгмюра.

Рассмотрена возможность очистки сточных вод такими отходами производства, как гальванический шлам, дефекал и кожевенная стружка. В ходе работы установлено, что наибольшую сорбционную способность проявляет гальванический шлам и дефекал.

### Список литературы

1. Лысенко А. В., Ветчинова Д. В., Фрундина Д. А. Изучение адсорбции ионов железа (III) отходами растительного происхождения в зависимости от температуры // Будущее науки – 2017: сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х т. / под ред. А. А. Горохова. Курск: Университетская книга. 2017. Т. 3. С. 319–322.
2. Лысенко А. В., Подкопаева О. А., Колмыкова Д. А. Применение техногенных отходов при обезжелезивании водных объектов // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: материалы Международной научной конференции. Белгород: Белгород. гос. техн. ун-т им. В. Г. Шухова, 2021. С. 115–120.
3. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Курской области / Администрация Курской обл. Курск, 2020. 199 с. URL: <https://www.kursk.ru/upload/iblock/de4/ecodoklad-2021/pdf> (дата обращения: 20.02.2023).
4. Ниязи Ф. Ф., Мальцева В. С., Сазонова А. В. Кинетические закономерности сорбции ионов железа (II, III) модифицированными карбонатными породами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия. 2012. № 1. С. 40–47.
5. Использование производственных отходов для очистки сточных вод / Н. С. Лупанина, Н. Ю. Кирюшина, Ж. А. Свергузова, Д. А. Ельников // Экология и промышленность России. 2010. № 5. С. 38–41.
6. Сазонова А. В., Голощапова С. Э. Адсорбция ионов металлов отходами деревообрабатывающей промышленности // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2014. № 2. С. 17.
7. Сазонова А. В., Афанасьева М. М. Использование отходов кожевенного производства для очистки сточных вод текстильных предприятий // Актуальные проблемы экологии

и охраны труда: сборник статей VII Международной научно-практической конференции / редкол.: Л. В. Шульга (отв. ред.) [и др.]; Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2015. С. 181–185.

8. Молокоедова Т. А., Лысенко А. В., Кувардин Н. В. Термодинамика процесса адсорбции железа (II, III) из водных растворов отходами производства // *Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2021: сборник научных статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых* / отв. ред. О. В. Бурыкина. Курск: Университетская книга, 2021. С. 123–127.

9. Крымова В. В., Щербин Э. А. Исследование процессов адсорбции ионов  $Fe^{3+}$  на бентонитах // *Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: Биология, химия*. 2012. Т. 25 (64), № 4. С. 248–254.

10. Полещук И. Н., Пинигина И. А., Созыкина Е. С. Извлечение ионов железа (III) из водных растворов природными сорбентами // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 3-1. С. 65–69.

11. Молокоедова Т. А., Лысенко А. В. Термодинамика процесса адсорбции железа (II, III) из водных растворов отходами производства // *Всероссийский научный форум студентов и учащихся: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции*. Петрозаводск: Новая наука, 2021. Ч. 1. С. 236–241.

12. Солуковцева Т. В., Лысенко А. В. Разработка способа очистки сточных вод от ионов меди (II) отходами свеклосахарного производства // *Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2017: сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции: в 2 т.* / отв. ред. А. А. Горохов. Курск: Университетская книга, 2017. С. 68–71.

13. Фрундина Д. А., Ветчинова Д. В., Лысенко А. В. Очистка сточных вод отходом сахарного производства от прямых красителей // *Будущее науки-2017: сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х т.* / отв. ред. А. А. Горохов. Курск: Университетская книга, 2017. Т. 3. С. 340–343.

14. Сазонова А. В., Мальцева В. С. Перспективы использования отходов свеклосахарного производства в качестве сорбентов // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2012. №1 (49). С. 16–18.

15. Молокоедова Т. А., Лысенко А. В. Изотермы процесса сорбции при обезжелезивании воды техногенными отходами // *Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений: материалы Международной научно-практической конференции* / под ред. Т. В. Галаниной, М. И. Баумгартэна; Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. Кемерово, 2022. С. 518.1–518.4.

16. Виноградов С. С. Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус, 2002. 328 с.

17. Мальцева В. С., Бурыкина О. В., Сазонова А. В. Кинетика сорбции кислотных красителей из водных растворов карбонатными породами и отходами кожевенного производства // *Безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 6 (162). С. 16–22.

18. Сазонова А. В., Афанасьева М. М. Использование отходов кожевенного производства для очистки сточных вод текстильных предприятий // *Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей VII Международной научно-практической конференции* / отв. ред. Л. В. Шульга; Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2015. С. 181–185.

19. Лысенко А. В., Фатьянова Е. А. Адсорбция катионных красителей отходами кожевенного производства из бинарных систем // *Инновационные подходы в науке и образовании: теория, методология, практика: монография*. Пенза: Наука и просвещение, 2017. С. 223–231.

20. Мальцева В. С., Бурыкина О.В., Сазонова А.В. Кинетика сорбции из водных растворов карбонатными породами и отходами кожевенного производства // *Химическая технология*. 2012. № 7. С. 20.

21. Лысенко А. В., Фатьянова Е. А. Определение обменной емкости кожевенной стружки при адсорбции катионных красителей в динамических условиях // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2 (23). С. 153–161.
22. Петров Е. Г. Сорбционные характеристики процесса обесцвечивания природных вод алюмосиликатными адсорбентами различной модификации // Химия и технология воды. 1989. Т. 11, № 8. С. 761–762.
23. Сазонова А. В., Ниязи Ф. Ф., Мальцева В. С. Термодинамика и кинетика сорбции ионов хрома (III) карбонатными породами // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 275.
24. Макурина Ю. Д., Лысенко А. В. Изотермы адсорбции метиленового голубого гидролизным лигнином при различных температурах // Молодежь и XXI век – 2017: материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 т. / отв. ред. А. А. Горохов. Курск: Университетская книга, 2017. Т. 3. С. 413–419.
25. Сазонова А. В. Термодинамика и кинетика сорбции поллютантов сточных вод нетрадиционными материалами: дис. ... канд. хим. наук. Курск, 2013. 148 с.
26. Li N., Bau R. Copper adsorption on chitosan-cellulose hydrogen beads: behavior and mechanisms // Separ. Purific. Technol. 2005. Vol. 42, no. 3. P. 237–247.
27. Adsorption equilibrium model in groundwater solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanger zeolite F-9 / M. S. Onyango, Yoshihiro Kojima, Aoyi Ochieng, E. C. Bernardo, Hitoki Matsuda // J. Colloid Interf. Sci. 2004. Vol. 279, no. 2. P. 341–350.
28. Redlich O., Peterson D. L. Useful adsorption isotherm // J. Phys. Chem. 1959. Vol. 63. P. 1024.

## References

1. Lysenko A. V., Vetchinova D. V., Frundina D. A. [Study of the adsorption of iron (III) ions by plant waste depending on temperature]. *Budushchee nauki – 2017. Sbornik nauchnykh statei 5-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Future of Science – 2017. Collection of scientific articles of the 5th International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorohov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 319–322. (In Russ.)
2. Lysenko A. V., Podkopayeva O. A., Kolmykova D. A. [Application of technogenic wastes in the deironing of water bodies]. *Ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov i pererabotka tekhnogenogo syr'ya: fundamental'nye problemy nauki, materialovedenie, khimiya i biotekhnologiya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology. Materials of International scientific conference]. Belgorod, Belgorod St. Technological Univ. named after V. G. Shukhov, 2021, pp. 115–120. (In Russ.)
3. Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy na territorii Kurskoi oblasti [Report on the state and protection of the environment in the Kursk region]. Kursk, 2020. 199 p. Available at: <https://www.kursk.ru/upload/iblock/de4/ecodoklad-2021/pdf> (accessed 20.02.2023).
4. Niyazi F. F., Maltseva V. S., Sazonova A. V. Kineticheskie zakonomernosti sorbtzii ionov zheleza (II, III) modifitsirovannymi karbonatnymi porodami [Kinetic regularities of sorption of iron ions (II, III) by modified carbonate rocks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*, 2012, no. 1, pp. 40–47.

5. Lupandina N. S., Kiryushina N. Yu., Sverguzova Zh. A., Elnikov D. A. Ispol'zovanie proizvodstvennykh otkhodov dlya ochistki stochnykh vod [The use of industrial waste for wastewater treatment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*, 2010, no. 5, pp. 38–41.

6. Sazonova A. V., Goloshchapova S. E. Adsorbtsiya ionov metallov otkhodami derevoobrabatyvayushchei promyshlennosti [Adsorption of metal ions by woodworking industry waste]. *APRIORI. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = APRIORI. Series: Natural and technical sciences*, 2014, no. 2, pp. 17.

7. Sazonova A. V., Afanas'eva M. M. [The use of leather production waste for wastewater treatment of textile enterprises]. *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda. Sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of ecology and labor protection. Collection of articles of the VII International scientific and practical conference]; ed. by L. V. Shulga. Kursk, Southwest St. Univ. Publ., 2015, pp. 181–185. (In Russ.)

8. Molokoedova T. A., Lysenko A. V., Kuvardin N. V. [Thermodynamics of the iron (II, III) adsorption process from aqueous solutions by production wastes]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii – 2021. Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Fundamental and applied research in the field of chemistry and ecology – 2021. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]; ed. by O. V. Burykina. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 123–127. (In Russ.)

9. Krymova V. V., Shcherbin E. A. Issledovanie protsessov adsorbtsii ionov  $Fe^{3+}$  na bentonitakh [Study of adsorption processes of  $Fe^{3+}$  ions on bentonites]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya: Biologiya, khimiya = Scientific notes of the Tauride National University named after V. I. Vernadsky. Series: Biology, Chemistry*, 2012, vol. 25 (64), no. 4, pp. 248–254.

10. Poleshchuk I. N., Pinigina I. A., Sozykina E. S. Izvlechenie ionov zheleza (III) iz vodnykh rastvorov prirodnymi sorbentami [Extraction of iron (III) ions from aqueous solutions with natural sorbents]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern Science-Intensive Technologies*, 2019, no. 3-1, pp. 65–69.

11. Molokoedova T. A., Lysenko A. V. [Thermodynamics of the process of adsorption of iron (II, III) from aqueous solutions by production wastes]. *Vserossiiskii nauchnyi forum studentov i uchashchikhsya. Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [All-Russian Scientific Forum of Students and Pupils. Collection of Articles of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, Novaya nauka Publ., 2021, pp. 236–241. (In Russ.)

12. Solukovtseva T. V., Lysenko A. V. [Development of a method for treating wastewater from copper (II) ions with waste from beet sugar production]. *Yunost' i Znaniya – Garantiya Uspokha – 2017. Sbornik nauchnykh trudov 4-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and Knowledge - Guarantee of Success – 2017. Collection of scientific papers of the 4th International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorohov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 68–71. (In Russ.)

13. Frundina D. A., Vetchinova D. V., Lysenko A. V. [Wastewater treatment with sugar production waste from direct dyes]. *Budushchee nauki – 2017. Sbornik nauchnykh statei 5-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Future of science – 2017. Collection of scientific articles of the 5th International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorohov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 340–343. (In Russ.)

14. Sazonova A. V., Maltseva V. S. Perspektivy ispol'zovaniya otkhodov sveklosakharnogo proizvodstva v kachestve sorbentov [Prospects for the use of sugar beet waste as sorbents]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie = Water treatment. Water treatment. Water supply*, 2012, no. 1 (49), pp. 16–18.

15. Molokoedova T. A., Lysenko A. V. [Sorption process isotherms during water deironing by man-made waste]. *Proizvodstvennye sistemy budushchego: opyt vnedreniya Lean i ekologicheskikh reshenii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Production systems of the future: experience of implementing Lean and environmental solutions. Materials of the international scientific and practical conference]; ed. by T. V. Galanina, M. I. Baumgarten. Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass St. Technical Univ. Publ., 2022, pp. 518.1–518.4. (In Russ.)

16. Vinogradov S. S. Ekologicheski bezopasnoe gal'vanicheskoe proizvodstvo [Environmentally safe galvanic production]. Moscow, Globus Publ., 2002. 328 p.

17. Maltseva V. S., Burykina O. V., Sazonova A. V. Kinetika sorbtsii kislotnykh krasitelei iz vodnykh rastvorov karbonatnymi porodami i otkhodami kozhevennogo proizvodstva [Kinetics of sorption of acid dyes from aqueous solutions by carbonate rocks and wastes of leather production]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*, 2014, no. 6 (162), pp. 16–22.

18. Sazonova A. V., Afanas'eva M. M. [The use of leather production waste for wastewater treatment of textile enterprises]. *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda. Sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of ecology and labor protection. Collection of articles of the VII International scientific and practical conference]; ed. by L. V. Shulga. Kursk, Southwest St. Univ. Publ., 2015, pp. 181–185. (In Russ.)

19. Lysenko A. V., Fatyanova E. A. Adsorbtsiya kationnykh krasitelei otkhodami kozhevennogo proizvodstva iz binarnykh sistem [Adsorption of cationic dyes by tanning waste from binary systems]. *Innovatsionnye podkhody v nauke i obrazovanii: teoriya, metodologiya, praktika* [Innovative approaches in science and education: theory, methodology, practice]. Penza, Nauka I Prosveshchenie Publ., 2017, pp. 223–231.

20. Maltseva V. S., Burykina O. V., Sazonova A. V. Kinetika sorbtsii iz vodnykh rastvorov karbonatnymi porodami i otkhodami kozhevennogo proizvodstva [Kinetics of sorption from aqueous solutions by carbonate rocks and tanning waste]. *Khimicheskaya tekhnologiya = Chemical technology*, 2012, no. 7, pp. 20.

21. Lysenko A. V., Fatyanova E. A. Opredelenie obmennoi emkosti kozhevennoi struzhki pri adsorbtsii kationnykh krasitelei v dinamicheskikh usloviyakh [Determination of the exchange capacity of leather shavings during the adsorption of cationic dyes under dynamic conditions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 153–161.

22. Petrov E. G. Sorbtsionnye kharakteristiki protsessa obestsvechivaniya prirodnykh vod alyumosilikatnymi adsorbentami razlichnoi modifikatsii [Sorption characteristics of the process of bleaching natural waters with aluminosilicate adsorbents of various modifications]. *Khimiya i tekhnologiya vody = Chemistry and technology of water*, 1989, vol. 11, no. 8, pp. 761–762.

23. Sazonova A. V., Niyazi F. F., Maltseva V. S. Termodinamika i kinetika sorbtsii ionov khroma (III) karbonatnymi porodami [Thermodynamics and kinetics of sorption of chromium (III) ions by carbonate rocks]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2012, no. 1, pp. 275.

24. Makurina Yu. D., Lysenko A. V. [Adsorption isotherms of methylene blue by hydrolytic lignin at different temperatures]. *Molodezh' i XXI vek – 2017. Materialy VII Mezhdunarodnoi mo-*

*lodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and XXI century – 2017. Proceedings of the VII International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorohov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, vol. 3, pp. 413–419.

25. Sazonova A. V. Termodinamika i kinetika sorbtsii pollyutantov stochnykh vod netraditsionnymi materialami. Diss. kand. khim. nauk [Thermodynamics and kinetics of sorption of waste water pollutants by non-traditional materials. Cand. chem. sci. diss.]. Kursk, 2013. 148 p.

26. Li N., Bau R. Copper adsorption on chitosan-cellulose hydrogen beads: behavior and mechanisms. *Separ. Purific. Technol.*, 2005, vol. 42, no. 3, pp. 237–247.

27. Onyango M. S., Yoshihiro Kojima, Aoyi Ochieeng, Bernardo E. C., Hitoki Matsuda. Adsorption equilibrium model in groundwater solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanger zeolite F-9. *J. Colloid Interf. Sci.*, 2004, vol. 279, no. 2, pp. 341–350.

28. Redlich O., Peterson D. L. Useful adsorption isotherm. *J. Phys. Chem.*, 1959, vol. 63, pp. 1024.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Лысенко Анна Владимировна**, кандидат химических наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ginger313@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0776-8648

**Anna V. Lysenko**, Cand. of Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ginger313@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0776-8648

**Молокоедова Татьяна Алексеевна**, студент кафедры фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: molokoedovatatana@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6037-7836

**Tatyana A. Molokoedova**, Undergraduate Student of the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: molokoedovatatana@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6037-7836

**Соколова Юлия Васильевна**, кандидат технических наук, ведущий специалист АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Российская Федерация, e-mail: jv.sokolova@mail.ru

**Yuliya V. Sokolova**, Cand. of Sci. (Engineering), Leading Specialist of NPO Lavochkina JSC, Khimki, Russian Federation, e-mail: jv.sokolova@mail.ru