

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДА ПЕРЕРАБОТКИ МАКУЛАТУРЫ В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ КРАСИТЕЛЯ "МЕТИЛЕНОВЫЙ ГОЛУБОЙ" ИЗ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

С.В. Свергузова¹, Ж.А. Сапронова¹, И.Г. Шайхиев², Ю.С. Воронина¹, Е.С. Иевлева¹

¹Кафедра Промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, Российская Федерация, 308012

E-mail: pe@intbel.ru*, sapronova.2016@yandex.ru, yuliavoronina@mail.ru

²Кафедра Инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015

E-mail: ildars@inbox.ru

Красители составляют один из главенствующих поллютантов в составе сточных вод различных производств. Для утилизации красителей в водных средах используют различные химические и физико-химические методы, из которых адсорбция является наиболее эффективной. Использование активированных углей в процессах водоочистки ограничено их высокой ценой и необходимостью регенерации. Наиболее приемлемым является использование в качестве сорбционных материалов отходов промышленного и сельскохозяйственного производств. Исследована возможность использования волокнистого отхода промышленного производства – шлама от переработки макулатуры в качестве сорбционного материала для удаления красителей из водных сред. Применение целлюлозосодержащих отходов производств выгодно экономически, поскольку не требуют затрат на производство новых материалов, а являются ежегодно возобновляемым растительным ресурсом. Использование подобных материалов целесообразно также с экономической точки зрения, поскольку являются природными материалами и не содержат в своем составе каких-либо вредных веществ. Приведены сведения о том, при каких процессах переработки макулатуры образуются отходы, в том числе и волокнистый шлам, не находящийся вторичного применения и вывозимый на шламохранилища. Предложено использование названного отхода производства в качестве сорбционного материала. Для приготовления модельных растворов в качестве загрязняющего вещества использован краситель марки "Метиленовый голубой", который является реперным соединением для анализа сорбционных характеристик различных адсорбентов. Приведены некоторые физико-химические показатели волокнистого отхода переработки макулатуры. Определено, что максимальная сорбционная емкость исследуемого отхода составила 1,17 ммоль/г или 374,3 г/г. Построена изотерма адсорбции красителя "Метиленовый голубой" на исследуемом сорбционном материале и математически обработана в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. Выявлено, что изотерма адсорбции наиболее адекватно описывается моделью Ленгмюра ($R^2=0,7909$). Вычисленные термодинамические параметры (энергия адсорбции и энергия Гиббса) свидетельствуют о протекании самопроизвольного физического процесса.

Ключевые слова: шлам переработки макулатуры, краситель "Метиленовый голубой", удаление, адсорбция

USE OF WASTE RECYCLING OF WASTE PAPER AS A SORPTION MATERIAL TO REMOVE "METHYLENE BLUE" DYE FROM MODEL SOLUTIONS

S.V. Sverguzova¹, Zh.A. Sapronova¹, I.G. Shaikhiev², Yu.S. Voronina¹, E.S. Ievleva¹

¹Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, st. Kostyukova, 46, Belgorod, Russian Federation, 308012

E-mail: pe@intbel.ru*, sapronova.2016@yandex.ru, yuliavoronina@mail.ru

²Department of Engineering Ecology, Kazan National Research Technological University, st. K. Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015
E-mail: ildars@inbox.ru

Dyes are one of the main pollutants in wastewater from various industries. For the disposal of dyes in aqueous media, various chemical and physicochemical methods are used, of which adsorption is the most effective. The use of activated carbons in water treatment processes is limited by their high price and the need for regeneration. The most acceptable is the use of industrial and agricultural waste as sorption materials. The possibility of using a fibrous waste from industrial production - sludge from waste paper processing as a sorption material for removing dyes from aqueous media was studied. The use of cellulose-containing production waste is economically beneficial, since it does not require the cost of producing new materials, but is an annually renewable plant resource. The use of such materials is also advisable from an economic point of view, since they are natural materials and do not contain any harmful substances in their composition. Information is provided on the processes of waste paper processing that generate waste, including fibrous sludge, which cannot be reused and is transported to sludge storage facilities. It is proposed to use the named production waste as a sorption material. For the preparation of model solutions, the "methylene blue" dye was used as a pollutant, which is a reference compound for analyzing the sorption characteristics of various adsorbents. Some physical and chemical indicators of fibrous waste from waste paper processing are given. It was determined that the maximum sorption capacity of the studied waste was 1.17 mmol/g or 374.3 g/g. The adsorption isotherm of the dye "Methylene blue" on the studied sorption material was constructed and mathematically processed within the framework of the Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich models. It was found that the adsorption isotherm is most adequately described by the Langmuir model ($R^2=0.7909$). The calculated thermodynamic parameters (adsorption energy and Gibbs energy) indicate the occurrence of a spontaneous physical process.

Key words: waste paper recycling sludge, methylene blue dye, removal, adsorption

Для цитирования:

Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Шайхиев И.Г., Воронина Ю.С., Иевлева Е.С. Использование отхода переработки макулатуры в качестве сорбционного материала для удаления красителя "Метиленовый голубой" из модельных растворов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 2. С. 67–73. DOI: 10.6060/RCJ.2023672.8.

For citation:

Sverguzova S.V., Saproнова Zh.A., Shaikhiev I.G., Voronina Yu.S., Ievleva E.S. Use of waste recycling of waste paper as a sorption material to remove "Methylene blue" dye from model solutions. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 2. P. 67–73. DOI: 10.6060/RCJ.2023672.8.

ВВЕДЕНИЕ

Красители, особенно синтетические, в настоящее время широко применяются в различных отраслях промышленного производства. Их применение приводит к образованию большого количества окрашенных сточных вод, попадание которых в результате недостаточной очистки в природные водоемы, нарушает в последних ход естественных биологических процессов.

Для разложения красителей в водных средах применяют различные химические и физико-химические процессы, такие как окисление [1], коагуляция [2] и электрокоагуляция [3], адсорбция [4, 5], мембранное разделение [6, 7] и другие. Как показывает анализ литературных источников, наиболее

часто для очистки окрашенных сточных вод применяют сорбционные методы. В промышленном производстве для этих целей используют активированные угли [8]. Однако, использование последних, наряду с высокой эффективностью очистки сточных вод от красителей, имеет существенный недостаток – высокую стоимость активированных углей. Необходимость регенерации последних способствует увеличению стоимости очистки и усложнению технологического процесса, что не всегда приемлемо в промышленных условиях.

В последнее время в практике водоочистки интенсивно развивается новое инновационное направление – использование отходов промышленного и сельскохозяйственного производства в качестве сорбционных материалов для удаления раз-

личных поллютантов, в том числе и различных красителей, из водных сред [9–12]. Особый интерес в качестве сорбционных материалов для извлечения красителей из водных сред представляют целлюлозосодержащие отходы растительного происхождения [13–18].

Применение целлюлозосодержащих отходов производств выгодно экономически, поскольку не требуют затрат на производство новых материалов, а являются ежегодно возобновляемым растительным ресурсом. Использование подобных материалов целесообразно также с экономической точки зрения, поскольку являются природными материалами и не содержат в своем составе каких-либо вредных веществ.

Целлюлозосодержащие материалы растительного и промышленного происхождения, которые накапливаются в больших количествах, могут быть использованы в качестве сырья для получения сорбционных материалов. Большое количество сырья, низкая стоимость, простая технология обработки обуславливают перспективность исследований, направленных на получение новых сорбционных материалов на основе целлюлозосодержащего сырья.

Нетрадиционными материалами, которые не нашли в настоящее время квалифицированного применения, могут служить целлюлозосодержащие отходы предприятий по переработке макулатуры. В мировой литературе имеется несколько сообщений об использовании таких отходов в качестве сорбционных материалов для удаления нефти, масел и органических соединений из водных сред [19–23]. Сведений об использовании твердых отходов переработки макулатуры в качестве сорбционных материалов красителей в мировой литературе не обнаружено.

В ходе технологических процессов переработки макулатуры (первичный роспуск, разволокнение, сортирование макулатурной массы, грубая очистка, дополнительное разволокнение, сортировка, тонкая очистка, тонкая сортировка) происходит образование сточных вод, содержащих в виде взвеси тонкие целлюлозные волокна. После очистки стоков, образуется волокнистый шлам, не нашедший рационального применения и выбрасываемый на промышленные полигоны отходов.

В свете вышеизложенного, в настоящем сообщении исследовалась возможность использования волокнистого шлама от переработки макулатуры, образующегося на ООО "Гофротара", для очистки модельных сточных вод от красителя "Метиленовый голубой".

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отходы ООО "Гофротара" (ОГ) представляют собой волокнистую массу серого цвета (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид отхода ООО "Гофротара"

Упрощенная структурная формула целлюлозы, которая входит в состав отхода ООО "Гофротара", представлена на рис. 2.

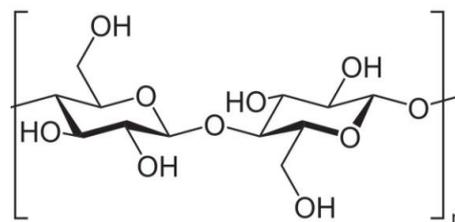


Рис. 2. Структурная формула целлюлозы

Наличие у целлюлозы многочисленных ОН-групп делает возможным ее взаимодействие с многими химическими веществами как по месту разрыва О-Н связей, так и за счет возникновения водородных связей между атомами водорода, входящими в молекулу целлюлозы атомами водорода, принадлежащими другим соединениям.

Образующийся отход высушивался до постоянной массы при температуре 105 °С в сушильном шкафу, далее измельчался и использовался в ходе проведения экспериментов. У измельченного волокнистого шлама определялись некоторые физико-химические показатели.

Насыпную плотность ($\rho_{\text{нас}}$) высушенного ОГ определяли по методике [24].

Потери при прокаливании (п.п.п.) путем последовательного нагревания пробы в прокаленном тигле при температуре 950–1000 °С до постоянной массы. Нагрев вели в муфельном тигле "Loip

LF-7/13-G2" (Россия). Потери при прокаливании вычисляют по формуле:

$$\text{П. п. п.} = \frac{G_1 \cdot 100}{G_2}, \% \quad (1),$$

где П.п.п. – потери при прокаливании, %; G_1 – разность в массе тигля с навеской до и после прокаливания, г; G_2 – масса исходной навески, г [25].

Краситель метиленовый голубой (МГ) выбран как хорошо изученное вещество и часто используемое при исследовании сорбционных свойств. МГ – основной краситель, химическая формула $C_{16}H_{18}ClN_3S$, молярная масса 319,9 г/моль, структурная формула показана на рис. 3.

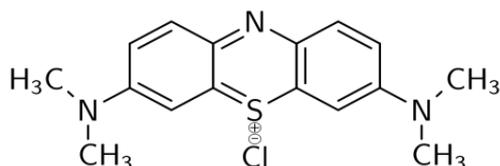


Рис. 3. Структурная формула красителя МГ

Модельные растворы с различным содержанием красителя готовились путем растворения навесок МГ (х.ч.) в дистиллированной воде.

Измерение рН водной вытяжки проводили с использованием рН-метр модели "Ионометрический преобразователь И-500" (Россия).

Для исследования сорбционных свойств ОГ в плоскодонные колбы вместимостью 250 см³ вносили навески сорбционного материала массой по 0,5 г, туда же заливались модельные растворы в концентрациях от 0,034 до 6,998 ммоль/дм³.

Колбы с навесками ОГ и модельными растворами плотно закрывались пробками и энергично встряхивались в течение 4 ч. Затем содержимое колб фильтровали, в фильтрах определяли остаточные концентрации МГ фотоколориметрическим методом на фотоколориметре марки "КФК-3".

Количество МГ, сорбированное 1 г сорбционного материала, моль/г, рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot 100}{1 \cdot 1000} \quad (2)$$

где C_0 – исходная концентрация МГ, ммоль/дм³; C_p – конечная (равновесная) концентрация МГ, ммоль/дм³; 100 – объем раствора, см³; 1 – вес сорбционного материала, г; 1000 – переход от см³ к дм³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ряд физико-химических свойств ОГ представлены в табл. 1.

При оценке возможности использования материала ОГ в водоочистке нами были получены следующие зависимости (рис. 4-7).

Таблица 1

Физико-химические свойства ОГ

Характеристики	Размерность	Значение
Насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$	г/см ³	0,1193
Потери при прокаливании, П.п.п.	%	16,16
Влажность, W	%	92,7
рН фильтрата		5,19

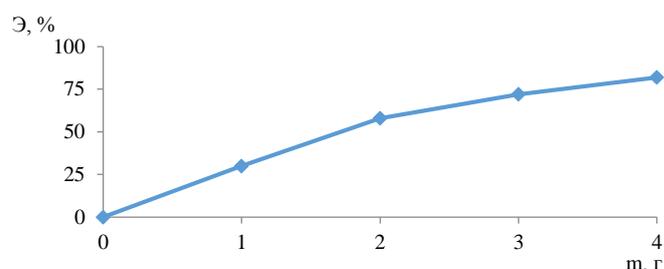


Рис. 4. Влияние дозы ОГ на эффективность очистки; $C_{\text{исх}} = 10 \text{ мг/дм}^3$; $\tau = 20 \text{ мин}$

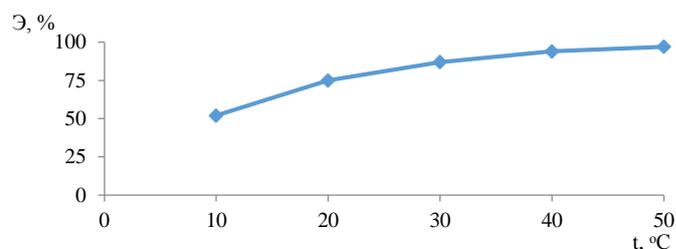


Рис. 5. Влияние температуры на эффективность очистки; $C_{\text{исх}} = 10 \text{ мг/дм}^3$; $m = 4 \text{ г/дм}^3$; $\tau = 20 \text{ мин}$

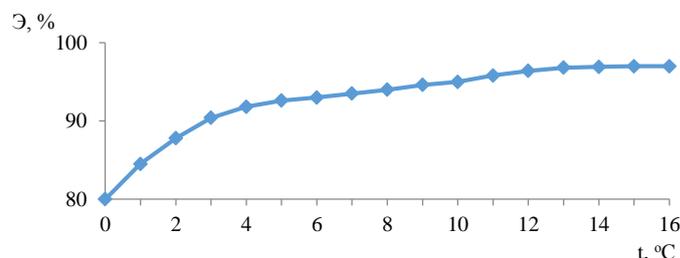


Рис. 6. Влияние соотношения $C_{\text{исх}}/m$ на эффективность очистки от МГ

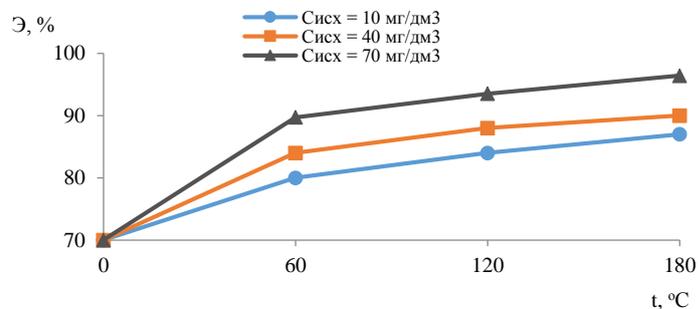


Рис. 7. Зависимость эффективности очистки модельных растворов от исходной концентрации МГ

По полученным значениям равновесных концентраций МГ в растворе и значениям сорбционной емкости, A , строилась изотерма адсорбции в координатах $A = f(C_p)$ (рис. 8).

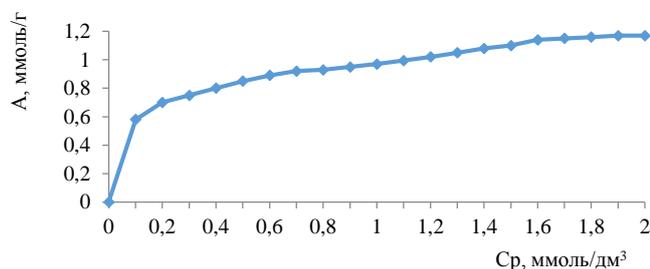


Рис. 8. Изотерма адсорбции МГ отходом гофротары

Определено, что максимальная сорбционная емкость (A_{\max}) материала ОГ составляет 1,17 ммоль/г по МГ.

С целью определения механизма адсорбции полученная изотерма была обработана в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича (табл. 2, рис. 9).

Таблица 2

Характеристика моделей адсорбции

№	Модель	Уравнение модели
1	Ленгмюра	$1/A = 1/A_{\infty} + 1/(K_L \cdot A_{\infty} \cdot C_p)$
2	Фрейндлиха	$\log A = \log K_F + n \cdot \log C_p$
3	Дубинина-Радушкевича	$\ln A = \ln A_{\infty} - (RT/E)^2 \cdot (\ln(C_{исх}/C_p))^2$

где A – сорбционная ёмкость (ммоль/г), A_{∞} – емкость монослоя; K_L – константа сорбционного равновесия (дм³/ммоль); $C_{исх}$, C_p – начальная концентрация и равновесная концентрация после сорбции ионов Cu^{2+} (ммоль/дм³); E – энергия сорбции (Дж/(моль)); T – абсолютная температура в Кельвинах; R – универсальная газовая постоянная, $8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль · К).

По результатам обработки изотермы следует, что процесс адсорбции наилучше описывается изотермой Ленгмюра ($R^2 = 0,79$), что соответствует протеканию процесса адсорбции на поверхности участков, каждый из которых может адсорбировать только одну молекулу адсорбата, т.е. мономолекулярную адсорбцию. Линеаризация моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича представлена на рис. 9.

С помощью константы Ленгмюра ($K_L = 10,36$), полученной при вычислениях, была определена энергия Гиббса, ΔG° , процесса адсорбции по уравнению:

$$\Delta G^{\circ} = -R \cdot T \cdot \ln K_L \quad (4)$$

$\Delta G^{\circ} = -8,314 \cdot 298 \cdot 2,34 = -5,79$ кДж/моль
Отрицательный знак ΔG° свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса.

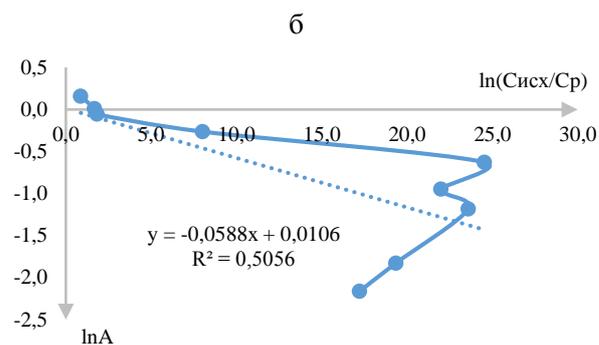
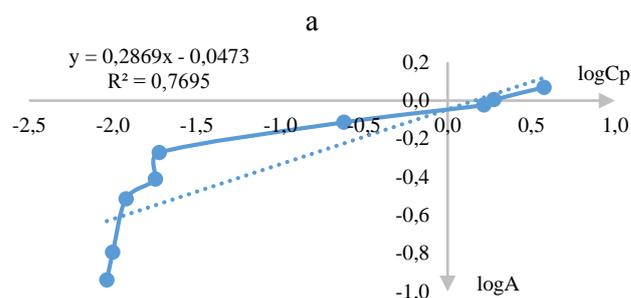
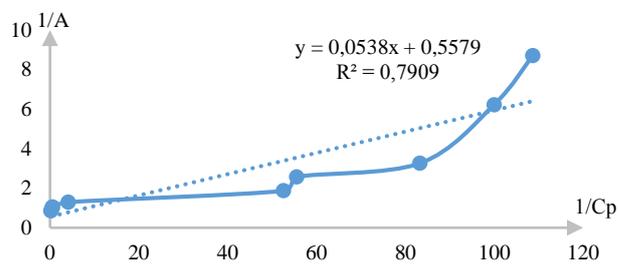


Рис. 9. Модели Ленгмюра (а), Фрейндлиха (б), Дубинина-Радушкевича (в)

В ходе обработки изотермы адсорбции была получена величина энергии адсорбции, которая составила 10,22 кДж/моль, из чего следует, что процесс адсорбции имеет физическую природу.

ВЫВОДЫ

Изучена возможность очистки модельных растворов от красителя метиленовой голубой с использованием в качестве сорбционного материала отходов производства гофротары. Выявлена зависимость очистки растворов от дозировки сорбционного материала, температуры водной среды и длительности контакта сорбционного материала с модельным раствором. Установлена положительная динамика увеличения эффективности очистки при повышении температуры раствора, дозировки сорбционного материала и длительности контакта.

Исследованы сорбционные характеристики отхода производства гофротары. Полученная изотерма адсорбции обработана в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радускевича. Установлено, что модель Ленгмюра наиболее адекватно описывает процесс сорбции ($R^2 = 0,7909$). Сорбционная емкость отхода производства гофротары составляет 1,17 ммоль/г, энергия Гиббса данного процесса составляет -5,79 кДж/моль, что свидетельствует о самопроизвольном протекании адсорбции, а величина энергии адсорбции E , равная 10,22 кДж/моль, указывает на физическую природу процесса.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов "Приоритет 2030" с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Javaid R., Qazi U.Y.* International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. V. 16. N 11. 2066. DOI 10.3390/ijerph16112066.
2. *Verma A.K., Dash R.R., Bhunia P.* Journal of Environmental Management. 2012. V. 93. N 1. P. 154–168. DOI 10.1016/j.jenvman.2011.09.012.
3. *Линников О., Родина И.* Российский химический журнал. 2021. Т. 65. № 2. С. 83–89. DOI: 10.6060/rcj.2021652.7.
4. *Singh A.T.S., Ramesh S.T.* Environmental Engineering Science. 2013. V. 30. N 7. P. 333–349. DOI 10.1089/ees.2012.0417.
5. *Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M.* Advances in Colloid and Interface Science. 2014. V. 209. P. 172–184. DOI 10.1016/j.cis.2014.04.002.
6. *Dutta S., Gupta B., Srivastava S.K., Gupta A.K.* Materials Advances. 2021. V. 2. N 14. P. 4497–4531. DOI: 10.1039/D1MA00354B.
7. *Al-Alawy R.M. J., Abod B. M., Kamar F.H., Nechifor A.C.* Revista de Chimie -Bucharest- Original Edition. 2019. V. 70. N 5. P. 1715–1719. DOI:10.37358/RC.19.5.7200.
8. *Moradihamedani P.* Polymer Bulletin. 2021. N 79. P. 1–29. DOI:10.1007/s00289-021-03603-2.
9. *Moosavi S., Lai C.W., Gan S., Zamiri G., Pivehzhani A.O., Johan M.R.* ACS Omega. 2020. V. 5. N 33. P. 20684–20697. DOI: 10.1021/acsomega.0c01905.
10. *Gupta V.K.* Journal of Environmental Management. 2009. V. 90. N 8. P. 2313–2342. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.
11. *Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В.* Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 6. С. 183–186.
12. *Crini G.* Bioresource Technology. 2006. V. 97. N 9. P. 1061–1085. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.
13. *Gupta V.K., Carrott P.J.M., Ribeiro Carrott M.M.L., Suhas.* Critical reviews in environmental science and technology. 2009. V. 39. N. 10. P. 783–842. DOI 10.1080/10643380801977610.
14. *Dada E.O., Ojo I.A., Alade A.O., Afolabi T.J., Jimoh M.O., Dauda M.O.* Journal of Scientific Research and Reports. 2020. V. 26. N 8. P. 34–56. DOI: 10.9734/JSRR/2020/v26i830294.
15. *Bharathi K.S., Ramesh S.T.* Applied Water Science. 2013. V. 3. P. 773–790.
16. *Амонова М.М.* Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 1-3(69). С. 163–165.
17. *Галимова Р.З., Буркеев Д.О., Шайхиев И.Г.* Экономика и предпринимательство. 2022. № 8 (145). С. 1273–1276. DOI: 10.34925/EIP.2022.145.8.264.

REFERENCES

1. *Javaid R., Qazi U.Y.* International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. V. 16. N 11. 2066. DOI 10.3390/ijerph16112066.
2. *Verma A.K., Dash R.R., Bhunia P.* Journal of Environmental Management. 2012. V. 93. N 1. P. 154–168. DOI 10.1016/j.jenvman.2011.09.012.
3. *Linnikov O., Rodina I.* Russian chemical journal. 2021. V. 65. N 2. P. 83–89. DOI: 10.6060/rcj.2021652.7.
4. *Singh A.T.S., Ramesh S.T.* Environmental Engineering Science. 2013. V. 30. N 7. P. 333–349. DOI 10.1089/ees.2012.0417.
5. *Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M.* Advances in Colloid and Interface Science. 2014. V. 209. P. 172–184. DOI 10.1016/j.cis.2014.04.002.
6. *Dutta S., Gupta B., Srivastava S.K., Gupta A.K.* Materials Advances. 2021. V. 2. N 14. P. 4497–4531. DOI: 10.1039/D1MA00354B.
7. *Al-Alawy R.M. J., Abod B. M., Kamar F.H., Nechifor A.C.* Revista de Chimie -Bucharest- Original Edition. 2019. V. 70. N 5. P. 1715–1719. DOI:10.37358/RC.19.5.7200.
8. *Moradihamedani P.* Polymer Bulletin. 2021. N 79. P. 1–29. DOI:10.1007/s00289-021-03603-2.
9. *Moosavi S., Lai C.W., Gan S., Zamiri G., Pivehzhani A.O., Johan M.R.* ACS Omega. 2020. V. 5. N 33. P. 20684–20697. DOI: 10.1021/acsomega.0c01905.
10. *Gupta V.K.* Journal of Environmental Management. 2009. V. 90. N 8. P. 2313–2342. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.
11. *Stepanova S.V. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V.* News-Nick BGTU im. V.G. Shukhova. 2014. N 6. P. 183–186.
12. *Crini G.* Bioresource Technology. 2006. V. 97. N 9. P. 1061–1085. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.
13. *Gupta V.K., Carrott P.J.M., Ribeiro Carrott M.M.L., Suhas.* Critical reviews in environmental science and technology. 2009. V. 39. N 10. P. 783–842. DOI: 10.1080/10643380801977610.
14. *Dada E.O., Ojo I.A., Alade A.O., Afolabi T.J., Jimoh M.O., Dauda M.O.* Journal of Scientific Research and Reports. 2020. V. 26. N 8. P. 34–56. DOI: 10.9734/JSRR/2020/v26i830294.
15. *Bharathi K.S., Ramesh S.T.* Applied Water Science. 2013. V. 3. P. 773–790.
16. *Amonova M.M.* Actual scientific research in the modern world. 2021. N 1-3(69). P. 163–165.
17. *Galimova R.Z., Burkeev D.O., Shaikhiev I.G.* Economy and entrepreneurship. 2022. N 8 (145). P. 1273–1276. DOI: 10.34925/EIP.2022.145.8.264.

18. *Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V.* Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. V. 11. N 5. P. 12689–12705. DOI:10.33263/BRIAC115.1268912705.
19. *Сиволобова Н.О., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф., Букреева К.Е.* Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1. С. 104–112.
20. *Беловодский Е.А., Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Воронина Ю.С., Иевлева Е.С.* Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 121–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6638.
21. *Кушнир А.А., Сыпко К.С., Губин А.С., Сизо К.О., Суханов П.Т.* Химия растительного сырья. 2022. № 3. С. 5–26. DOI: 10.14258/jcprm.20220310943.
22. *Белый В.А., Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А., Воронина Ю.С.* Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 139–145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
23. *Смирнова Д.Н., Гришин И.С., Смирнов Н.Н.* Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 44–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6694.
24. *Bi H., Huang X., Wu X., Cao X., Tan C., Yin Z., Lu X., Sun L., Zhang H.* Small. 2014. V. 10. N 17. P. 3544–3550. DOI: 10.1002/sml.201303413.
25. *Bayik G.D., Altın A.* Marine Pollution Bulletin. 2017. V. 125. N 1–2. P. 341–349. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.040.
18. *Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V.* Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. V. 11. N 5. P. 12689–12705. DOI:10.33263/BRIAC115.1268912705.
19. *Sivolobova N.O., Gracheva N.V., Zheltobryukhov V.F., Bukreeva K.E.* Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2019. N 1. P. 104–112.
20. *Belovodsky E.A., Svergzova S.V., Shaikhiev I.G., Voronina Yu.S., Ievleva E.S.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 9. P. 121–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6638.
21. *Kushnir A.A., Sytko K.S., Gubin A.S., Siso K.O., Sukhanov P.T.* Chemistry of plant raw materials. 2022. N 3. P. 5–26. DOI: 10.14258/jcprm.20220310943.
22. *Belyy V.A., Svergzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A., Voronina Yu.S.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 5. P. 139–145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
23. *Smirnova D.N., Grishin I.S., Smirnov N.N.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 12. P. 44–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6694.
24. *Bi H., Huang X., Wu X., Cao X., Tan C., Yin Z., Lu X., Sun L., Zhang H.* Small. 2014. V. 10. N 17. P. 3544–3550. DOI:10.1002/sml.201303413.
25. *Bayik G.D., Altın A.* Marine Pollution Bulletin. 2017. V. 125. N 1–2. P. 341–349. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.040.

Поступила в редакцию 10.04.23
Принята к опубликованию 12.06.23

Received 10.04.23
Accepted 12.06.23