

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛЕНОВЫЙ ГОЛУБОЙ
ИЗ РАСТВОРОВ БИОМАССОЙ ОПИЛОК ПЛАТАНА****В.А. Белый, С.В. Свергузова, И.Г. Шайхиев, Ж.А. Сапронова, Ю.С. Воронина**

Валентин Анатольевич Белый, Светлана Васильевна Свергузова (ORCID 0000-0002-3845-8741)*, Жанна Ануаровна Сапронова (ORCID 0000-0003-1410-0179), Юлия Сергеевна Воронина (ORCID 0000-0001-6125-0239)

Кафедра Промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, Российская Федерация, 308012
E-mail: valentin_hadi@mail.ru, pe@intbel.ru*, sapronova.2016@yandex.ru, yuliavoronina@mail.ru

Ильдар Гильманович Шайхиев (ORCID 0000-0001-9160-0412)

Кафедра Инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015
E-mail: ildars@inbox.ru

*В работе исследована возможность использования биомассы опилок *Platanus orientalis* для очистки модельных растворов от красителя "Метиленовый голубой" (МГ). Использовались промытые и высушенные опилки фракции менее 1,0 мм. Адсорбционные исследования проводились в статических условиях на модельных растворах, в экспериментах определялась сорбционная емкость исследуемого материала для нативных опилок и модифицированных 3%-ой H_2SO_4 . Установлено, что сорбционная емкость биомассы опилок составляет 0,26 ммоль/г МГ для нативной биомассы и 0,34 ммоль/г для модифицированной. Удельная поверхность сорбционного материала, рассчитанная через число Авогадро, N_A , и площадь поперечного сечения молекулы МГ, Q , составила 0,28 м²/г для нативной биомассы и 0,36 м²/г для модифицированной. Эффективность очистки модельного раствора от МГ при соотношении массы опилок m к исходной концентрации раствора $C_{исх}$ ($m/C_{исх}$), равной 5, составляет 75% для исходных опилок и 86% для модифицированных; при изменении соотношения $m/C_{исх}$ до 8 эффективность очистки для нативных опилок составляет 92%, а для модифицированных – 95%. Получены изотермы адсорбции, которые, согласно классификации ИЮПАК, характеризуют одноступенчатую адсорбцию на микропористых твердых адсорбентах. Математическая обработка изотерм адсорбции в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича показала, что процесс адсорбции наиболее адекватно описывается моделью Фрейндлиха как для нативных ($R^2 = 0,9501$), так и для модифицированных ($R^2 = 0,9389$) опилок. Значение энергии Гиббса, ΔG° , кДж/моль·К имеют отрицательный знак как для нативных ($\Delta G^\circ = -7,237$), так и для модифицированных ($\Delta G^\circ = -19,568$), что свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса. Сорбционная емкость биомассы опилок после обработки кислотой возрастает от 0,26 до 0,34 ммоль/г, т.е. на 30%.*

Ключевые слова: краситель метиленовый голубой, биомасса опилок платана, адсорбция, эффективность очистки

Для цитирования:

Белый В.А., Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А., Воронина Ю.С. Извлечение красителя метиленовый голубой из растворов биомассой опилок платана. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 139–145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.

For citation:

Belyy V.A., Svergzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A., Voronina Yu.S. Extraction of the methylene blue dye from solutions with sycamore biomass sawdust. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 5. P. 139–145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.

**EXTRACTION OF THE METHYLENE BLUE DYE FROM SOLUTIONS
WITH SYCAMORE BIOMASS SAWDUST**

V.A. Belyy, S.V. Svergzova, I.G. Shaikhiev, Zh.A. Sapronova, Yu.S. Voronina

Valentin A. Belyy, Svetlana V. Svergzova (ORCID 0000-0002-3845-8741)*, Zhanna A. Sapronova (ORCID 0000-0003-1410-0179), Yulia S. Voronina (ORCID 0000-0001-6125-0239)

Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Kost-yukova st., 46, Belgorod, 308012, Russia

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

Ildar G. Shaikhiev (ORCID 0000-0001-9160-0412)

Department of Engineering Ecology, Kazan National Research Technological University, K. Marx st., 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russia

E-mail: ildars@inbox.ru

*The possibility of using the sawdust biomass of *Platanus orientalis* for the purification of model solutions from the dye "Methylene blue" (MG) was studied. Washed and dried sawdust fractions less than 1.0 mm were used. Adsorption studies were carried out under static conditions on model solutions. In experiments, the sorption capacity of the material under study was determined for native sawdust and modified with 3% H₂SO₄. It has been established that the sorption capacity of sawdust biomass is 0.26 mmol/g of MG for native biomass and 0.34 mmol/g for modified one. The specific surface of the sorption material, calculated through the Avogadro number, N_a, and the cross-sectional area of the MG molecule, Q, was 0.28 m²/g for native biomass and 0.36 m²/g for the modified one. The efficiency of purification of the model solution from MG at the ratio of the mass of sawdust m to the initial concentration of the solution C^m (m/C^m) equal to 5 is 75% for the original sawdust and 86% for the modified ones; when the m/C ratio is changed to 8, the cleaning efficiency for native sawdust is 92%, and for modified sawdust it is 95%. Adsorption isotherms have been obtained, which, according to the IUPAC classification, characterize single-stage adsorption on microporous solid adsorbents. Mathematical processing of adsorption isotherms in the framework of the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich models showed that the adsorption process is most adequately described by the Freundlich model for both native (R² = 0.9501) and modified (R² = 0.9389) sawdust. The value of the Gibbs energy, ΔG^o, kJ/mol·K, has a negative sign both for native (ΔG^o = -7.237) and for modified ones (ΔG^o = -19.568), which indicates a spontaneous flow of the process. Sorption capacity of sawdust biomass after treatment with acid increases from 0.26 to 0.34 mmol/g, i.e. by 30%.*

Key words: methylene blue dye, sycamore sawdust biomass, adsorption, purification efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Красители, в основном, используются в текстильной промышленности, но определенное их количество расходуется для окраски различных материалов, таких как кожа, бумага, высокомолекулярные соединения, нефтепродукты, продукты питания и др. Красители обычно имеют синтетическое происхождение и обладают сложной химиче-

ской структурой, которые делают их очень устойчивыми к освещению и окислению, а сточные воды, содержащие красители, трудно поддаются очистке. Текстильная промышленность является одним из крупнейших загрязнителей природных вод красителями в мире. Последние могут нанести значительный вред не только водным экосистемам, но и их обитателям, ввиду их высокой токсичности [1-4]. Опасность красителей для водной среды за-

ключается не только в токсичности. Любой краситель при попадании в водную среду изменяет цветность воды, ухудшает светопропускание, что влияет на процессы фотосинтеза; оказывает влияние на окислительные процессы, повышает химическое потребление кислорода (ХПК), снижает концентрацию растворенного кислорода в воде. Кроме того, при участии красителя в окислительно-восстановительных процессах возможно образование новых токсичных соединений.

Следовательно, сточные воды, содержащие красители, перед сбросом их в природные водные объекты необходимо подвергать глубокой очистке.

В текстильной промышленности используются основные, кислотные, активные, прямые, кубовые, дисперсные, протравные красители, азокрасители и др. Метиленовый голубой (МГ), катионный краситель, обычно используется для окрашивания волос и бумаги, хлопка, шерсти. Удаление МГ из воды очень важно из-за его токсичности. МГ был выбран в этом исследовании в качестве катионного красителя в соответствии с причинами, изложенными выше. Вопрос удаления красителей из воды очень важен, и экономически целесообразный подход к удалению красителя из водных сред представляет сложную проблему для текстильной промышленности.

В мировой практике для извлечения и разложения красителей из водных сред используются многие способы и методы, такие как озонирование, коагуляция, ультрафильтрация, окисление, фотохимическая деструкция и адсорбция. Среди многочисленных способов удаления красителей адсорбция является одной из самых эффективных, и она успешно применяется для удаления красителей из сточных вод [5, 6].

Активированные угли (АУ) обычно широко используются в качестве эффективных адсорбентов из-за их высокой сорбционной емкости, возможности поглощать широкий спектр загрязняющих веществ, простоты конструкции сорбционного оборудования. АУ широко используются в качестве адсорбентов при очистке сточных вод из-за их высокой сорбционной емкости, чрезвычайно большой удельной поверхности, быстрой кинетики адсорбции, относительной легкости регенерации и амфотерных свойств, которые позволяют извлекать из водных сред как катионные, так и анионные загрязнители [7]. Тем не менее, коммерчески доступные АУ остаются ограниченными из-за высокой стоимости в результате использования невозобновляемого и дорогого сырья, такого, как уголь.

В этой связи, поиск более дешевых, более эффективных и экологически чистых сорбционных материалов является актуальной проблемой. В последнее время внимание исследователей привлекают недорогие сорбционные материалы из отходов деревопереработки, такие как опилки, стружка, щепа и др. для извлечения различных поллютантов из водных сред [8-20].

Одним из деревьев, широко распространенным в Европе и южных областях России, в том числе и в Крыму, является Платан восточный (*Platanus orientalis*)- высокие листопадные деревья с густой широкой кроной. Ствол мощный (высота до 50 м, окружность до 18 м), цилиндрический, с зеленовато-серой отслаивающейся корой. Древесина платана всегда ценилась благодаря своим физико-механическим свойствам. Она используется для изготовления ценной мебели, высококачественного декоративного шпона, напольных покрытий, столярных изделий, оформления интерьеров и для выполнения различных отделочных работ. В процессе переработки древесины платана образуются опилки, которые необходимо рекуперировать.

В связи с вышеизложенным, целью этой работы являлось установление возможности извлечения из водных сред красителя МГ с помощью биомассы опилок *Platanus orientalis*. Краситель метиленовый голубой был выбран для работы как часто используемое и хорошо изученное исследователями вещество для определения сорбционных свойств адсорбентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опилки платанового дерева рассеивались на фракции с помощью набора сит типа "У1-ЕСЛ" (Россия), дважды промывались дистиллированной водой для удаления механических примесей и высушивались в сушильном шкафу типа "Loip LF-7/13-G2" (Россия) при температуре 105 °С. Полученный продукт обрабатывался 3%-ным раствором серной кислоты в течение 24 ч при температуре 22 °С. В исследованиях использовались опилки с размером частиц < 1,0 мм [21].

Модельные растворы МГ различных концентраций готовились растворением красителя в дистиллированной воде.

Значение рН среды определялось с помощью рН-метра модели "Ионометрический преобразователь И-500" (Россия) [22].

Концентрацию МГ в растворах определяли фотоколориметрическим методом на фотоколориметре марки "КФК-3" [23].

Адсорбционные исследования проводились в статических условиях. Для этого навески опилок платана массой 1,0 г помещались в плоскодонные конические колбы вместимостью 250 см³, куда приливалось по 100 см³ модельных растворов МГ известной концентрации. Колбы плотно закрывались крышками и подвергались принудительному встряхиванию на механическом шейкере в течение 24 ч. После окончания встряхивания содержимое колб фильтровалось через бумажный фильтр, в фильтрате определялась остаточная концентрация МГ.

Адсорбционная емкость исходных опилок и модифицированных 3 %-й H₂SO₄ определялась по формуле (1):

$$A = (C_{исх} - C_p) / m \cdot V \quad (1)$$

где C_{исх} – исходная концентрация МГ в растворе, моль/дм³; C_p – равновесная концентрация МГ в растворе после процесса сорбции, моль/дм³; m – масса сорбционного материала, используемого для процесса сорбции, г; V – объем раствора, дм³.

Энергетические показатели и математические характеристики процессов адсорбции получены с помощью двухпараметровых моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича.

Удельную поверхность (S_{уд}), нативных и кислотомодифицированных опилок платана определяли по уравнению (2):

$$S_{уд} = \frac{A_{\infty} \cdot N_A \cdot Q}{M} \quad (2)$$

где S – удельная поверхность, м²/г; A_∞ – максимальная сорбционная емкость биоматериала, г/г; N_A – число Авогадро (6,02 · 10²³ моль⁻¹); Q – площадь поперечного сечения молекулы МГ, м²; M – молекулярная масса МГ [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения физических характеристик опилок платана указаны в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства опилок платана

Table 1. Physical properties of sycamore sawdust

№	Показатели	Значение
1	Размер частиц, мм	< 0,1 мм
2	pH среды водной вытяжки	7,45
3	Насыпная плотность, г/см ³	0,142 г/см ³

На рис. 1 показана зависимость эффективности очистки модельных растворов от соотношения m/C_{исх}, где m – масса добавляемого биоматериала, г/дм³, C_{исх} – исходная концентрация МГ, моль/дм³. Эффективность очистки рассчитывали по формуле (3):

$$\varepsilon = (C_{исх} - C_{кон}) / C_{исх} \quad (3)$$

где C_{исх} – исходная концентрация МГ в растворе, моль/дм³, C_{кон} – конечная концентрация МГ в растворе, моль/дм³.

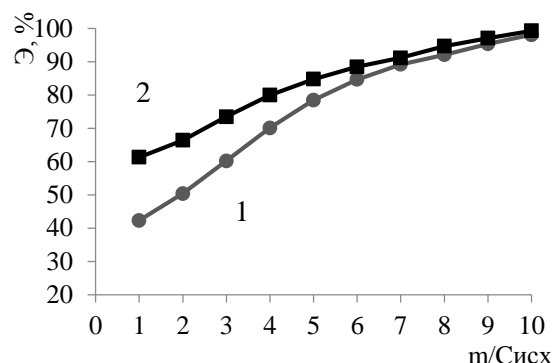


Рис. 1. Влияние соотношения m/C_{исх} на эффективность очистки раствора от красителя МГ опилками платана: 1 – исходные опилки платана; 2 – модифицированные опилки платана

Fig. 1. Influence of the m/C_{in} ratio on the efficiency of MG dye purification with sycamore sawdust: 1 - original sycamore sawdust; 2 - modified sycamore sawdust

Как видно из графика, представленного на рис. 1, при увеличении показателя m/C_{исх} повышается эффективность очистки модельных растворов, причем для опилок, модифицированных серной кислотой, эффективность выше. Вероятно, данное обстоятельство объясняется тем, что под воздействием кислоты целлюлозные волокна древесины расщепляются, при этом увеличивается количество активных центров, играющих важную роль в процессе адсорбции.

Сравнительная эффективность очистки растворов от МГ опилками платана при различных соотношениях m/C_{исх} показана на рис. 2.

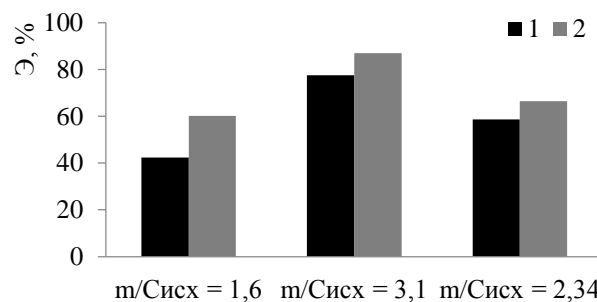


Рис. 2. Сравнительная эффективность очистки растворов от МГ нативными и модифицированными опилками платана: 1 – исходные опилки; 2 – обработанные 3% H₂SO₄

Fig. 2. Comparative efficiency of purification of solutions from MG by native and modified sycamore sawdust: 1 - original sycamore sawdust; 2 - treated with 3% H₂SO₄

Изотермы адсорбции МГ опилками нативными и обработанными 3%-ым раствором H₂SO₄, представлены в координатах A = f(C_p) на рис. 3.

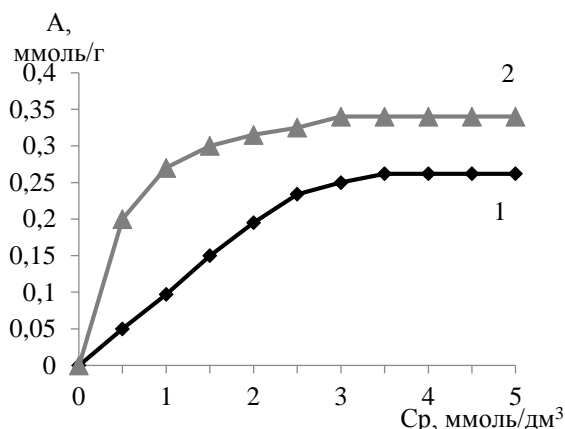


Рис. 3. Изотермы адсорбции МГ нативными (1) и обработанными 3%-ым раствором H_2SO_4 (2) опилками
Fig. 3. Isotherms of MG adsorption by (1) native and (2) sawdust treated with 3% H_2SO_4 solution

Используя информацию о значении A_{max} , рассчитана удельная поверхность ($S_{уд}$) для биомассы нативных и обработанных 3%-ым раствором H_2SO_4 опилок по формуле, представленной выше.

Исходные данные для расчета: $A_{\infty} = A_{max}$; для опилок нативных $A_{max} = 0,26$ ммоль/г, для модифицированных – $0,34$ ммоль/г; N_A – число Авогадро, $6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$; Q – площадь поперечного сечения молекулы метиленового голубого, $0,57 \cdot 10^{-18}$ м 2 ; M – молярная масса метиленового голубого, $319,85$ г/моль.

Результатами расчетов определено, что удельная поверхность нативных опилок платана составляет $0,28$ м 2 /г, обработанных 3%-ым раствором серной кислоты – $0,36$ м 2 /г, т.е. после кислотной обработки удельная поверхность сорбционного материала возрастает в 1,29 раза.

Полученные изотермы адсорбции красителя опилками *Platanus orientalis*, согласно классификации ИЮПАК, характерны для микропористых твердых сорбентов и одноступенчатых процессов адсорбции. Обработка изотерм с помощью методов нелинейной регрессии с использованием программного обеспечения «MATLAB» в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха позволили получить математические модели, представленные в табл. 2.

Согласно полученным расчетным данным, процесс адсорбции красителя МГ наиболее адекватно описывается моделью Фрейндлиха как для нативных опилок ($R^2 = 0,9501$), так и для модифицированных ($R^2 = 0,9389$).

Поскольку в модели Фрейндлиха параметр $n > 1$, это означает, что энергия связей опилки-МГ уменьшается.

При расчете термодинамического параметра ΔG° (энергии Гиббса) по уравнению (4):

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

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура среды; K_L – равновесная константа, получено, что для нативных опилок данный параметр составляет $\Delta G^{\circ} = -7,237$ кДж/моль·К, для модифицированных – $\Delta G^{\circ} = -19,568$ кДж/моль·К, что свидетельствует о том, что процесс адсорбции в данном случае имеет физическую природу.

Таблица 2

Характеристики математических моделей изотерм опилок исходных и модифицированных опилок
Table 2. Characteristics of mathematical models of sawdust isotherms of original and modified sawdust

Модель	Уравнение	R^2	Константы и др. показатели
Ленгмюра	$y = 3,233 + 0,353x$	0,9165	$K_L = 9,1603$
	$M^* y = 3,155 + 0,080x$	0,9507	$K_L = 39,227$
Фрейндлиха	$y = -0,656 + 0,333x$	0,9501	$K_F = -0,6568$ $n = 2,9998$
	$M^* y = -0,538 + 0,297x$	0,9389	$K_F = 0,2895$ $n = 3,3614$

Примечание: M^* – модифицированные опилки
Note: M^* – modified sawdust

Таким образом, в работе показана возможность очистки модельных растворов от красителя метиленового голубого сорбционным материалом – биомассой опилок платана. Показано, что модификация опилок 3%-ым раствором серной кислоты повышает сорбционную активность биомассы опилок. Сорбционная емкость опилок после обработки кислотой возрастает от $0,26$ до $0,34$ ммоль/г, что составляет 30,8%. Следовательно, биомассу опилок платана можно считать перспективным материалом, пригодным к использованию его в водочистке в качестве сорбента для извлечения красителя метиленового голубого.

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 work was carried out as part of the implementation of the federal program to support universities "Priority 2030" using equipment based on the Center for High Technologies of the Belgorod State Technical University named after V. G. Shukhov.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов Б.И., Шарипов Р.М., Валеева Л.Д., Гадельшина Э.А., Вильданова А.И. Ассортимент применяемых красителей для текстильных материалов. *Вестн. технол. ун-та*. 2015. Т. 18. № 15. С. 180-182.
2. Третьякова А.Е., Черногорцев Е.А., Сафонов В.В. Исследование условий очистки сточных вод от водорастворимых красителей с помощью волокнообразующих полимеров. *Изв. вузов. Технол. текстил. пром-сти*. 2016. № 2 (362). С. 127-132.
3. Нестерова Л.А., Кондратюк Л.Н., Сарибеков Г.С. Разработка технологии очистки сточных вод после процесса крашения текстильных материалов активными красителями. *Вост.-Европ. журн. перед. технол.* 2010. № 5/6 (47). С. 35-37.
4. Баранова А.Ф., Мамедов С.Н., Погодина И.В. Экологические проблемы текстильной промышленности и пути их решения. *Изв. вузов. Технол. текстил. пром-сти*. 2019. № 4(382). С. 170-174.
5. Лишай А.В., Савицкая Т.А., Цыганкова Н.Г., Гриншпан Д.Д., Джун Чен. Адсорбция метиленового голубого энтеросорбентами различной природы. *Журн. Белорус. гос. ун-та. Химия*. 2021. № 1. С. 58-74. DOI: 10.33581/2520-257X-2021-1-58-74.
6. Хоботова Э.Б., Грайворонская И.В., Калужная Ю.С., Игнатенко М.И. Сорбционная очистка сточных вод от органических красителей с помощью гранулированного доменного шлака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 89-94. DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6302.
7. Мухина О.Ю., Пискунова И.А., Лысенко А.А. Адсорбция красителя метиленового голубого активированными углеродными волокнами. *Журн. прикл. химии*. 2003. Т. 76. № 6. С. 926-930. DOI: 10.1023/A:1026311606910.
8. Dolatabadi M., Mehrabpour M., Esfandyari M., Alidadi H. Modeling of simultaneous adsorption of dye and metal ion by sawdust from aqueous solution using of ANN and ANFIS. *Chemometrics and Intelligent Lab. Syst.* 2018. V. 181. P. 72-78. DOI: 10.1016/j.chemolab.2018.07.012.
9. Chikri R., Elhadiri N., Benchanaa M., El maguana Y. Efficiency of sawdust as low-cost adsorbent for dyes removal. *J. Chem.* 2020. Art. ID 8813420. DOI: 10.1155/2020/8813420.
10. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. Sawdust for the removal of heavy metals from water: A review. *Molecules*. 2021. V. 26. N 4318. 21 p. DOI: 10.3390/molecules26144318.
11. Akhouairi, S., Ouachtak, H., Addi, A.A., Jada A., Douch J. Natural sawdust as adsorbent for the Eriochrome Black T dye removal from aqueous solution. *Water Air Soil Pollution*. 2019. V. 230. N 181. 15 p. DOI:10.1007/s11270-019-4234-6.
12. Cemin A., Ferrarini F., Poletto M., Bonetto L.R., Bortoluz J., Lemée L., Guégan R., Esteves V.I., Giovanela M. Characterization and use of a lignin sample extracted from Eucalyptus grandis sawdust for the removal of methylene blue dye. *Int. J. Biolog. Macromol.* 2021. V. 170. P. 375-389. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.155.
13. Mashkoor F., Nasar A. Magnetized Tectona grandis sawdust as a novel adsorbent: preparation, characterization, and utilization for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Cellulose*. 2020. V. 27. P. 2613-2635. DOI: 10.1007/s10570-019-02918-8.
14. Tezcan Un U., Ates F. Low-cost adsorbent prepared from poplar sawdust for removal of disperse orange 30 dye from aqueous solutions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 16. P. 899-908. DOI: 10.1007/s13762-018-1716-9.

REFERENCES

1. Izmailov B.I., Sharipov R.M., Valeeva L.D., Gadelshina E.A., Vildanova A.I. Assortment of dyes used for textile materials. *Vestn. Tekhnol. Univ.* 2015. V. 18. N 15. P. 180-182 (in Russian).
2. Tretyakova A.E., Chernogortsev E.A., Safonov V.V. Investigation of wastewater treatment conditions from water-soluble dyes using fiber-forming polymers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom-sti*. 2016. N 2 (362). P. 127-132 (in Russian).
3. Nesterova L.A., Kondratyuk L.N., Saribekov G.S. Development of wastewater treatment technology after the process of dyeing textile materials with active dyes. *Vost.-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2010. N 5/6 (47). P. 35-37 (in Russian).
4. Baranova A.F., Mammadov S.N., Pogodina I.V. Environmental problems of the textile industry and ways to solve them. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom-sti*. 2019. N 4(382). P. 170-174 (in Russian).
5. Lishai A.V., Savitskaya T.A., Tsygankova N.G., Grynshpan D.D., Jun Chen. Adsorption of methylene blue by enterosorbents of various nature. *Zhurn. Belorus. Gos. Univ. Khimiya*. 2021. N 1. P. 58-74 (in Russian). DOI: 10.33581/2520-257X-2021-1-58-74.
6. Khabotova E.B., Hraivoronska I.V., Kaliuzhna Iu.S., Ihnatenko M.I. Sorption purification of wastewater from organic dyes using granulated blast-furnace slag. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 6. P. 89-94 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216406.6302.
7. Mukhina O.Yu., Piskunova I.A., Lysenko A.A. Adsorption of methylene blue dye by activated carbon fibers. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2003. V. 76. N 6. P. 926-930 (in Russian). DOI: 10.1023/A:1026311606910.
8. Dolatabadi M., Mehrabpour M., Esfandyari M., Alidadi H. Modeling of simultaneous adsorption of dye and metal ion by sawdust from aqueous solution using of ANN and ANFIS. *Chemometric and Intelligent Lab. Syst.* 2018. V. 181. P. 72-78. DOI: 10.1016/j.chemolab.2018.07.012.
9. Chikri R., Elhadiri N., Benchanaa M., El maguana Y. Efficiency of sawdust as low-cost adsorbent for dyes removal. *J. Chem.* 2020. Art. ID 8813420. DOI: 10.1155/2020/8813420.
10. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. Sawdust for the removal of heavy metals from water: A review. *Molecules*. 2021. V. 26. N 4318. 21 p. DOI: 10.3390/molecules26144318.
11. Akhouairi, S., Ouachtak, H., Addi, A.A., Jada A., Douch J. Natural sawdust as adsorbent for the Eriochrome Black T dye removal from aqueous solution. *Water Air Soil Pollution*. 2019. V. 230. N 181. 15 p. DOI:10.1007/s11270-019-4234-6.
12. Cemin A., Ferrarini F., Poletto M., Bonetto L.R., Bortoluz J., Lemée L., Guégan R., Esteves V.I., Giovanela M. Characterization and use of a lignin sample extracted from Eucalyptus grandis sawdust for the removal of methylene blue dye. *Int. J. Biolog. Macromol.* 2021. V. 170. P. 375-389. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.155.
13. Mashkoor F., Nasar A. Magnetized Tectona grandis sawdust as a novel adsorbent: preparation, characterization, and utilization for the removal of methylene blue from aqueous solution. *Cellulose*. 2020. V. 27. P. 2613-2635. DOI: 10.1007/s10570-019-02918-8.
14. Tezcan Un U., Ates F. Low-cost adsorbent prepared from poplar sawdust for removal of disperse orange 30 dye from aqueous solutions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 16. P. 899-908. DOI: 10.1007/s13762-018-1716-9.

15. **Tounsadi H., Metarfi Y., Barka N., Taleb M., Rais Z.** Removal of textile dyes by chemically treated sawdust of *Acacia*: kinetic and equilibrium studies. *J. Chem.* 2020. Art. ID 7234218. DOI: 10.1155/2020/7234218.
16. **Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В.** Очистка модельных стоков, содержащих ионы тяжелых металлов, шелухой пшеницы. *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 6. С. 168-171.
17. **Shakoor S., Nasar A.** Adsorptive decontamination of synthetic wastewater containing crystal violet dye by employing *Terminalia arjuna* sawdust waste. *Groundwater Sust. Develop.* 2018. VI. 7. P. 30-38. DOI: 10.1016/J.GSD.2018.03.004.
18. **Фарберова Е.А., Тиньгаева Е.А., Чучалина Д., Кобелева Р., Максимов А.С.** Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 3. С. 51–57. DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
19. **Свергузова С.В., Бомба И.В., Воронина Ю.С.** Очистка маслосодержащих эмульсий листовым опадом вишни и рябины. *Chem. Bull.* 2018. Т. 1. № 4. С. 4-10.
20. **Dao My Uyen, Sirotkin A.S., Le Van Thuan, Cong Hong Хань, Нгуен Х. Кыонг, Хоанг Хиен И.** Адсорбционное удаление ионов никеля (II) из водных растворов шаровидным углеродным сорбентом на основе *Litsea glutinosa*. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 71-78. DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6416.
21. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ. 2019. 19 с.
22. РД 52.24.495-2017. Водородный показатель вод. Методика измерений потенциометрическим методом. Ростов н/Д.: Росгидромет. 2017. 13 с.
23. ГОСТ 16922-71. Красители органические, полупродукты, текстильно-вспомогательные вещества. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов. 1990. 30 с.
24. **Грег С., Синг К.** Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир. 1994. 306 с.
15. **Tounsadi H., Metarfi Y., Barka N., Taleb M., Rais Z.** Removal of textile dyes by chemically treated sawdust of *Acacia*: kinetic and equilibrium studies. *J. Chem.* 2020. Art. ID 7234218. DOI: 10.1155/2020/7234218.
16. **Stepanova S.V., Shaikhiyev I.G., Sverguzova S.V.** Purification of model effluents containing heavy metal ions by wheat husks. *Vestn. BGTU im. V.G. Shukhov.* 2014. N 6. P. 168-171 (in Russian).
17. **Shakoor S., Nasar A.** Adsorptive decontamination of synthetic wastewater containing crystal violet dye by employing *Terminalia arjuna* sawdust waste. *Groundwater Sust. Develop.* 2018. VI. 7. P. 30-38. DOI: 10.1016/J.GSD.2018.03.004.
18. **Farberova E.A., Tingaeva E.A., Chuchalina A.D., Kobleleva A.R., Maximov A.S.** Obtaining granulated active carbon from wastes of vegetable raw materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 3. P. 51–57 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
19. **Sverguzova S.V., Bomba I.V., Voronina Yu.S.** Purification of oil-containing emulsions with cherry and mountain ash leaf litter. *Chem. Bull.* 2018. V. 1. N 4. P. 4-10 (in Russian).
20. **Dao My Uyen, Sirotkin A.S., Le Van Thuan, Cong Hong Hanh, Nguyen Huy Cuong, Hoang Hien Y.** Removal of nickel (II) from aqueous solution by adsorption onto spherical carbonaceous sorbent derived from *Litsea glutinosa* seeds. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 11. P. 71-78 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6416.
21. ГОСТ 12536-2014. Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition. М.: Standartinform. 2019. 19 p. (in Russian).
22. RD 52.24.495-2017. Hydrogen indicator of water. Measurement technique by the potentiometric method. Rostov n/Don: Rosgidromet. 2017. 13 p. (in Russian).
23. ГОСТ 16922-71. Organic dyes, intermediates, textile auxiliaries. Test methods. М.: Izd-vo standartov. 1990. 30 p. (in Russian).
24. **Greg S., Sing K.** Adsorption, surface area, porosity. М.: Mir. 1994. 306 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 03.11.2022
Принята к опубликованию 16.01.2023

Received 03.11.2022
Accepted 16.01.2023