



УДК 544.723

## Исследование адсорбции ионов цинка кислотомодифицированными опилками акации ушковидной (*Acacia auriculiformis*)

Мифтахова Ф.Р.<sup>1</sup>, Нгуен Т.К.Т.<sup>1</sup>, Галимова Р.З.<sup>1</sup>,  
Шайхиев И.Г.<sup>1</sup>, Свергузова С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород

Поступила в редакцию 3.06.2019 г.

DOI: 10.17308/sorpchrom.2019.19/1174

Исследована адсорбция ионов  $Zn^{2+}$  нативными и модифицированными в слабоконцентрированных (1-3 %) растворах  $H_2SO_4$  опилками акации ушковидной (*Acacia auriculiformis*). Изотерма адсорбции ионов цинка нативными опилками акации относятся к изотермам I типа, согласно классификации ИЮПАК и L типу, согласно классификации Гильса. Максимальная сорбционная емкость опилок акации по ионам цинка составляет 7.5 мг/г. С целью увеличения сорбционных показателей, исследуемые опилки обрабатывались слабоконцентрированными растворами серной кислоты при 20°C в течение 5 ч. С увеличением концентрации раствора серной кислоты сорбционная емкость опилок по ионам цинка увеличивается. Обработка опилок 3%-ным раствором  $H_2SO_4$  способствует увеличению максимальной сорбционной емкости по ионам  $Zn^{2+}$  с 7.5 до 36.5 мг/г. Полученные изотермы адсорбции обрабатывались с помощью моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Темкина. Определены уравнения регрессии и коэффициенты аппроксимации, а также термодинамические параметры процессов (энергия сорбции и энергия Гиббса). Изотерма адсорбции нативными опилками наиболее адекватно описывается моделью Темкина, модифицированными – моделью Фрейндлиха. Значения энергии адсорбции менее 8 кДж/моль и энергии Гиббса в пределах от -4 до 0 кДж/моль свидетельствуют о протекании самопроизвольной физической адсорбции. Получены кинетические зависимости процессов адсорбции ионов цинка нативными и модифицированными опилками акации. Обработкой кинетических зависимостей в рамках диффузионной модели Бойда рассчитаны коэффициенты Био для исследуемых процессов, значения которых соответствуют протеканию процессов смешанной диффузии, то есть лимитирующими стадиями процессов адсорбции являются, как внешняя, так и внутренняя диффузия.

**Ключевые слова:** ионы  $Zn^{2+}$ , опилки *Acacia auriculiformis*, растворы  $H_2SO_4$ , обработка, адсорбция

## The study of the adsorption of zinc ions by acid-modified acacia sawdust (*Acacia auriculiformis*)

Miftakhova F.R.<sup>1</sup>, Nguyen T.K.T.<sup>1</sup>, Galimova R.Z.<sup>1</sup>,  
Shaikhiyev I.G.<sup>1</sup>, Sverguzova S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FGBOU VO «Kazan national research technological university», Kazan

<sup>2</sup>FGBOU VO «Belgorod state university of technology named after V.G. Shukhov, Belgorod»

The adsorption of  $Zn^{2+}$  ions by native and modified in weakly concentrated (1-3%)  $H_2SO_4$  solutions of acacia sawdust (*Acacia auriculiformis*) was studied. Adsorption isotherm of zinc ions by native acacia

sawdust are type I isotherms, according to the IUPAC classification and L type, according to the Hils classification. The maximum sorption capacity of acacia sawdust for zinc ions is 7.5 mg/g. In order to increase the sorption parameters, the investigated sawdust was treated with slightly concentrated solutions of sulfuric acid at 20 °C for 5 hours. With an increase in the concentration of sulfuric acid solution, the sorption capacity of sawdust for zinc ions increases. It was determined that the treatment of acacia sawdust with 3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution increases the maximum sorption capacity for Zn<sup>2+</sup> ions from 7.5 to 36.5 mg/g. The adsorption isotherms obtained were processed using Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich and Temkin models. Regression equations and approximation coefficients, and thermodynamic parameters of the processes (sorption energy and Gibbs energy) are determined. Adsorption isotherm with native sawdust is most adequately described by the Temkin model, modified - the Freundlich model. The values of adsorption energy less than 8 kJ/mol and Gibbs energy in the range from -4 to 0 kJ/mol indicate the occurrence of spontaneous physical adsorption. The kinetic dependences of the processes of adsorption of zinc ions by native and modified acacia sawdust are obtained. By processing the kinetic dependencies within the Boyd diffusion model, the Bio coefficients of the studied processes are calculated, the values of which correspond to the flow of mixed diffusion processes, that is, the limiting stages of the adsorption processes are both external and internal diffusion.

**Keywords:** Zn<sup>2+</sup> ions, *Acacia auriculiformis* sawdust, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions, processing, adsorption

## Введение

В современном мировом сообществе стремительно развивается новое инновационное направление в области охраны окружающей среды – использование лигнино- и целлюлозосодержащих отходов переработки сельскохозяйственного сырья и древесной биомассы в качестве реагентов для удаления загрязняющих веществ из водных сред [1-5]. Особый интерес вызывают отходы, образующиеся на соответствующих предприятиях по переработке древесины – опилки, кора, стружки, щепы. В ранее опубликованных обзорах показано, что целлюлозосодержащие отходы являются дешевыми и эффективными сорбционными материалами для извлечения поллютантов из водных объектов и сточных вод [6-10].

Ионы Zn<sup>2+</sup> являются одними из широко распространенных загрязнителей в составе сточных вод гальванических и других производств, шахтных вод. Исследовалась возможность использования опилок акации ушковидной (*Acacia auriculiformis*) в качестве сорбционного материала для удаления ионов Zn<sup>2+</sup> из модельных растворов. Данный вид деревьев широко распространен в Австралии, Африке, Мексике и в Азии. Во Вьетнаме древесина *Acacia auriculiformis* используется в качестве источника дров и для получения бумажной массы [11]. Соответственно, возникает проблема утилизации образующихся опилок.

Ранее, в обзорах [12, 13] приведены сведения по удалению поллютантов органического и неорганического происхождения опилками и компонентами биомассы растений рода *Acacia* из водных сред. Компоненты акации ушковидной (опилки, измельченная кора и листва) возможно использовать в качестве сорбционных материалов для извлечения ионов Cu<sup>2+</sup> [14] и Ni<sup>2+</sup> [15] из модельных растворов.

Одним из способов повышения сорбционной емкости является химическая модификация сорбционных материалов различными реагентами, в том числе и кислотами. Обработка раствором лимонной кислоты сосновых опилок позволяет повысить максимальную сорбционную емкость по ионам Cu<sup>2+</sup> с 5.06 до 16.2 мг/г [16]. Обработка опилок дуба кермесового (*Quercus coccifera*) раствором HCl увеличивает сорбционную емкость по ионам Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> и Cr<sup>6+</sup> [17]. Также указывается, что обработка опилок азадирахты индийской (*Azadirachta indica*) раствором соляной кислоты способствует увеличению сорбционных показателей по ионам Cu<sup>2+</sup> и Ni<sup>2+</sup> [18]. Также обработка опилок кедра гималайского (*Cedrus deodara*) слабokonцентрированным раствором HCl увеличивает сорбционную емкость по ионам Cd<sup>2+</sup> [19]. Обработка

опилок акации ушковидной слабоконцентрированными растворами  $H_3PO_4$  способствует увеличению максимальной сорбционной емкости с 7.5 до 25.0 мг/г [20].

Цель исследования заключалась в получении модифицированных опилок акации разбавленными растворами серной кислоты и исследовании их сорбционных свойств по отношению к ионам цинка (II).

## Эксперимент

Первоначально строились изотермы адсорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками акации ушковидной. Для этого в плоскодонные колбы объемом  $250\text{ см}^3$  помещались навески сорбционного материала массой 1 г. Далее, в колбы приливалось по  $100\text{ дм}^3$  раствора, содержащего ионы  $Zn^{2+}$  в концентрациях от 10 до  $1500\text{ мг/дм}^3$ . Колбы с навесками плотно закрывались пробками и перемешивались 3 часа. Раствор отфильтровывался через бумажный фильтр, а в фильтрах определялись концентрации ионов  $Zn^{2+}$ . Количество ионов  $Zn^{2+}$ , сорбированных 1 г опилок (A) в мг/г, рассчитывалось по формуле 1:

$$A = \frac{(C_s - C_e) \cdot 100}{1 \cdot 1000} \quad (1)$$

где  $C_s$  – исходная концентрация ионов металла,  $\text{мг/дм}^3$ ;  $C_e$  – конечная концентрация ионов металла,  $\text{мг/дм}^3$ ; 100 – объем раствора,  $\text{см}^3$ ; 1 – вес СМ, г; 1000 – переход от  $\text{см}^3$  к  $\text{дм}^3$ .

По полученным значениям сорбционной емкости (A) исследуемых материалов при различных равновесных концентрациях ионов  $Zn(II)$  строились изотермы адсорбции. Максимальная сорбционная емкость опилок акации по ионам  $Zn^{2+}$  составляет  $0.012\text{ ммоль/г}$  ( $\sim 7.5\text{ мг/г}$ ).

Проводилась обработка опилок *Acacia auriculiformis* 1, 2 и 3%-ными растворами серной кислоты при  $20^\circ\text{C}$ . Модифицированные опилки по окончании времени взаимодействия (5 часов) промывались дистиллированной водой до нейтрального pH и высушивались. По результатам исследования сорбционных свойств модифицированных опилок по отношению к ионам  $Zn(II)$  строились изотермы адсорбции ионов.

## Обсуждение результатов

Полученные изотермы адсорбции приведены на рисунке 1.

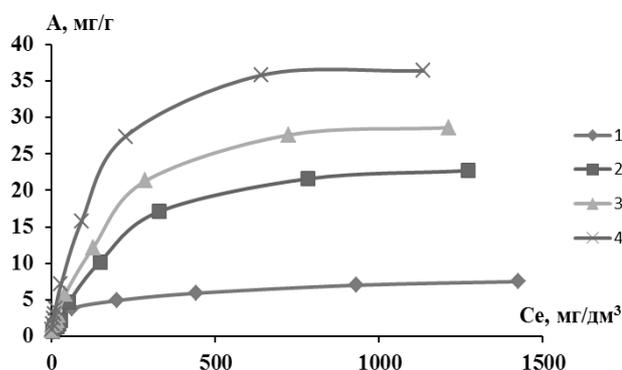


Рис. 1 Изотермы адсорбции ионов  $Zn^{2+}$ : 1 – немодифицированными опилками акации и модифицированными с помощью растворов серной кислоты концентрацией: 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% (масс)

Изотермы адсорбции относятся к изотермам I типа по классификации Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (БДДТ) или L-типу, согласно классификации Гиль-

са и описывают мономолекулярную адсорбцию ионов  $Zn^{2+}$  на опилках акации ушковидной. Общеизвестно, что I тип изотерм характерен для микропористых твёрдых тел с относительно малой долей внешней поверхности. Очевидно, что с увеличением концентрации серной кислоты, сорбционная емкость по ионам  $Zn^{2+}$  повышается. Наибольшее значение сорбционной емкости  $A=36.4$  мг/г (0.56 ммоль/г) достигается в случае использования в качестве сорбционного материала опилок *Acacia auriculiformis*, обработанных 3%-ным водным раствором  $H_2SO_4$ .

Для определения механизма процесса адсорбции, полученные изотермы обрабатывались с помощью моделей адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича, Темкина [32]. В таблицу 1 вынесены уравнения регрессии и значения коэффициентов аппроксимации по различным моделям адсорбции.

Таблица 1. Уравнения регрессии и коэффициенты аппроксимации ( $R^2$ ) моделей адсорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками *Acacia auriculiformis*, обработанных 1, 2 и 3%-ными растворами серной кислоты

Модель	До модификации	1% p-p $H_2SO_4$	2% p-p $H_2SO_4$	3% p-p $H_2SO_4$
Ленгмюра	$y=9.773x+13.48$ $R^2=0.939$	$y=4.109x+12.72$ $R^2=0.845$	$y=2.270x+9.050$ $R^2=0.893$	$y=1.467x+6.010$ $R^2=0.957$
Фрейндлиха	$Y=0.484x-1.460$ $R^2=0.914$	$y=0.650x-1.170$ $R^2=0.964$	$y=0.599x-1.000$ $R^2=0.968$	$y=0.587x-0.820$ $R^2=0.979$
Дубинина-Радушкевича	$y=-5.391x-2.360$ $R^2=0.742$	$y=-2.346x-1.760$ $R^2=0.522$	$y=1.136x-1.480$ $R^2=0.645$	$y=-1.028x-0.520$ $R^2=0.963$
Темкина	$y=0.002x+0.051$ $R^2=0.975$	$y=0.065x+0.130$ $R^2=0.904$	$y=0.076x+0.190$ $R^2=0.892$	$y=0.094x+0.270$ $R^2=0.923$

Как следует из приведенных в таблице 1 данных, адсорбция ионов  $Zn^{2+}$  нативными опилками наиболее точно описывается моделью Темкина, т.е. теплота адсорбции всех молекул в слое линейно снижается по мере заполнения слоя из-за отталкивания ионов  $Zn^{2+}$  между собой, при этом адсорбция происходит с равномерным распределением максимальной энергии связывания [22]. Изотермы адсорбции ионов цинка опилками акации ушковидной, обработанных 1-3 %-ными растворами серной кислоты, лучше всего описываются моделями Фрейндлиха, то есть процесс протекает на гетерогенной поверхности сорбционного материала.

Адсорбционные центры по этим моделям обладают различными величинами энергии, поэтому первую очередь, происходит заполнение активных адсорбционных положений с максимальной энергией.

На основании полученных уравнений сорбции и констант уравнений Ленгмюра ( $K_L$ ) по формуле 2 определены энергия Гиббса процессов сорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками акации, описывающие механизм процессов сорбции, и другие термодинамические величины, представленные в таблице 2.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L, \quad (2)$$

где  $\Delta G^\circ$  – энергия Гиббса (Дж/моль),  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $K_L$  – константа Ленгмюра.

Константа равновесия ( $K_L$ ), определяемая из уравнения Ленгмюра, описывает состав системы в состоянии равновесия. Значения  $K_L > 1$  означает преобладание в системе продуктов (прямого) процесса. При модификации опилок растворами серной кислоты наблюдается увеличение значений  $K_L$  и  $\Delta G$  (увеличение отрицательного значения по модулю), т.е. процесс адсорбции становится более предпочтительным [23]. Значения энергий сорбции ( $E$ ) меньше 8 кДж/моль свидетельствуют о протекании физической адсорбции. А отрицательные значения  $\Delta G$  в пределах от -4 до

0 кДж/моль соответствуют самопроизвольному протеканию физической адсорбции во всех четырех случаях [21].

Таблица 2. Термодинамические константы процессов адсорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками *Acacia auriculiformis*, обработанных 1, 2 и 3%-ными растворами серной кислоты

Адсорбент	Константы уравнения Ленгмюра		Константы уравнения Фрейндлиха		E, кДж/моль	$\Delta G$ , кДж/моль
	$A_{\infty}$ , ммоль/г	$K_L$	$K_F$	n		
До модификации	0.074	1.380	0.035	0.484	1.049	-0.784
1 % p-p $H_2SO_4$	0.079	3.096	0.067	0.650	1.590	-2.753
2 % p-p $H_2SO_4$	0.110	3.987	0.099	0.599	2.285	-3.369
3 % p-p $H_2SO_4$	0.165	4.136	0.152	0.587	2.403	-3.459

С целью выявления лимитирующей стадии процесса получены кинетические зависимости процессов сорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками акации и модифицированными опилками (рисунок 2).

Вклад внешней диффузии в процесс сорбции оценивается по коэффициенту внешней диффузии ( $D_{вн}$ ), который определяется по формуле 3:

$$D_{вн} = \frac{r_o \cdot \delta \cdot \gamma \cdot A}{3C_e} \quad (3)$$

где  $r_o$  – радиус частиц сорбента (см),  $\delta$  – толщина пленки раствора вокруг гранул сорбента (см),  $\gamma$  – некоторая величина, постоянная для данных условий и определяемая как тангенс угла наклона прямой  $-\lg(1-F) = f(t)$ , где  $F$  – степень достижения равновесия в системе, определяемая по формуле 4:

$$F = \frac{A}{A_{\infty}} \quad (4)$$

Вклад внутренней диффузии в процесс сорбции определяется по уравнениям 5 и 6:

$$D_i \cdot \pi^2 \cdot t / r^2 = B_t \quad (5)$$

$$A = K_d \cdot t^{1/2} + L \quad (6)$$

где  $D_i$  – коэффициент внутренней диффузии,  $\pi$  – число Пи,  $t$  – время процесса сорбции (с),  $r$  – радиус зерна сорбента (см),  $B_t$  – безразмерный параметр Бойда или критерий гомохромности Фурье, который определяется по табличным данным как функция от  $F$ ,  $L$  – толщина граничного слоя,  $K_d$  – константа скорости внутренней диффузии.

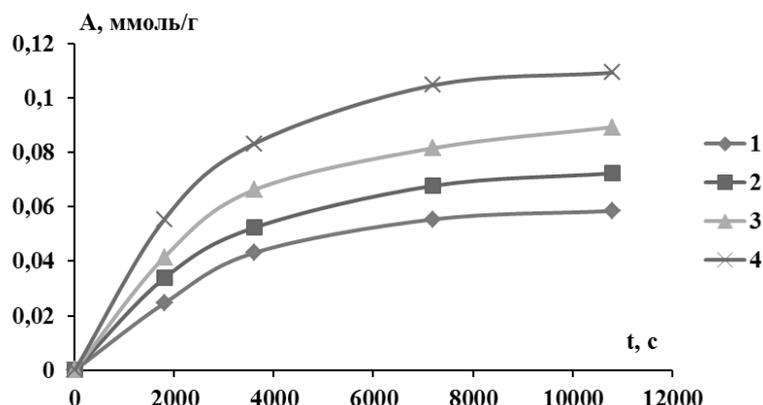


Рис. 2. Кинетическая зависимость процессов сорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками *Acacia auriculiformis*: 1 – нативными и модифицированными с помощью растворов серной кислоты с концентрацией: 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% (масс)

$D_i$  определяют по тангенсу угла наклона прямой  $V_t = f(t)$ , а коэффициенты  $L$  и  $K_d$  по графику зависимости  $A=f(t^{1/2})$ . Результаты обработки кинетических зависимостей в рамках диффузионной модели Бойда представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты обработки кинетических зависимостей адсорбции ионов  $Zn^{2+}$  опилками *Acacia auriculiformis*, обработанных 1, 2 и 3%-ными растворами серной кислоты в рамках диффузионной модели

Адсорбент	$D_{вн} \cdot 10^9$	$L \cdot 10^4$	$\frac{K_d \cdot 10^4}{10^4}$	$D_i \cdot 10^6$	$B_i$	Комментарий
До модификации	3 – 10	17	6	8	2.191	1 < $B_i$ < 20 – наблюдается смешанная диффузия
1% р-р $H_2SO_4$	5 – 10	31	7	8	2.191	
2% р-р $H_2SO_4$	6 – 20	41	9	5	3.286	
3% р-р $H_2SO_4$	9 – 40	68	11	8	2.191	

Модифицированные опилки акации, обработанных 3 %-ным раствором серной кислоты прошли промышленные испытания по очистке гальванических сточных вод ООО «Тхиен Ми», г.Вань Фук. Начальная концентрация ионов цинка (II) в сточных водах составила 0.63 мг/дм<sup>3</sup>, после очистки сточных вод модифицированными опилками *Acacia auriculiformis* – менее 0.02 мг/дм<sup>3</sup>. Таким образом, эффективность очистки составила более 96 %.

### Заключение

В статических условиях изучены сорбционные свойства опилок *Acacia auriculiformis* и их модификатов, полученных путем обработки растворами серной кислоты с концентрацией 1, 2 и 3% (масс.) при температуре 20°C в течение 5 ч по отношению к ионам  $Zn^{2+}$ . Обработкой полученных изотерм адсорбции в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича, Темкина определены уравнения процессов с наибольшими значениями коэффициентов аппроксимации ( $R^2$ ). Экспериментальные максимальные сорбционные емкости по иону  $Zn^{2+}$  для опилок до и после их модификации 1, 2 и 3%-ными растворами  $H_2SO_4$  составляют 7.5 мг/г (0.12 ммоль/г), 22.7 мг/г (0.35 ммоль/г), 28.6 мг/г (0.44 ммоль/г) и 36.4 мг/г (0.56 ммоль/г) соответственно. Установлено, что адсорбция ионов  $Zn^{2+}$  нативными опилками наиболее точно описывается моделью Темкина; опилками, обработанными 1-3 %-ными растворами серной кислоты – моделями Фрейндлиха. При модификации опилок растворами серной кислоты, а также при увеличении концентрации серной кислоты при обработке, наблюдается увеличение значений  $K_L$  и  $\Delta G$  (увеличение отрицательного значения по модулю), то есть процесс адсорбции становится более предпочтительным. Значения энергий сорбции ( $E$ ) меньше 8 кДж/моль и энергий Гиббса ( $\Delta G$ ) в пределах от -4 до 0 кДж/моль свидетельствуют о протекании самопроизвольной физической адсорбции. Построены кинетические зависимости процессов сорбции ионов  $Zn^{2+}$  нативными и модифицированными опилками акации ушковой, обработкой которых в рамках диффузионной модели Бойда рассчитаны коэффициенты внешней и внутренней диффузии, а также критерий Био, значения которого в пределах от 1 до 20 для всех исследуемых процессов указывает на то, что лимитирующей стадией является смешанная диффузия.

### Список литературы

1. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. // *Sustainable Materials and Technologies*. 2016. Vol. 9. pp. 10-40.
2. Khatoon H., Rai J.P.N. // *Octa Journal of Environmental Research*. 2016. Vol. 4. No 3. pp. 208-229.

3. Bhatnagar A., Sillanpää M., Witek-Krowiak A. // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 270. pp. 244-271.
4. Bachale S., Sharma S., Sharma A., Verma S. // *International Journal of Applied Research*. 2016. Vol. 2. No 7. pp. 523-527.
5. Doshi B., Sillanpää M., Kalliola S. // *Water Research*. 2018. Vol. 135. pp. 262-277.
6. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И. // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 4. С. 127-141.
7. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И. // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 5. С. 161-165.
8. Шайхиев И.Г. // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 5. С. 151-160.
9. Денисова Т.Р., Шайхиев И.Г. // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 24. С. 145-158.
10. Шайхиев И.Г. // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. № 12. С. 29-42.
11. Huong V.D., Nambiar E.K.S., Quang L.T., Mendham D.S. et al. // *Journal of Forest Science*. 2015. Vol. 77. No 1. pp. 51-58.
12. Шайхиев И.Г., Нгуен Т.К.Т., Шайхиева К.И. // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 3. С. 171-179.
13. Шайхиев И.Г., Нгуен Т.К.Т., Шайхиева К.И. // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 11. С. 153-155.
14. Нгуен Т.К.Т., Сидоровнина О.О., Замалиева Л.А., Мифтахова Ф.Р. и др. // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 18. С. 159-162.
15. Denisova T.R., Sippel I.Ya., Shaikhiev I.G., Nguyen T.K.T. et al. // *International Journal of Green Pharmacy*. 2018. Vol. 12. No 4. pp. 895-899.
16. Zhou Y., Zhang R., Gu X., Lu J. // *Separation Science and Technology*. 2015. Vol. 50. No 2. pp. 245-252.
17. Argun M.E., Dursun S., Ozdemir C., Karatas M. // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. vol. 141. pp. 77-85.
18. Rao P.S., Reddy K.V.N.S., Kalyani S., Krishnaiah A. // *Wood Science and Technology*. 2007. Vol. 41. No 5. pp. 427-442.
19. Memon S.Q., Memon N., Shah S.W., Khuhawar M.Y. and et al. // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. B139. pp. 116-121.
20. Мифтахова Ф.Р., Нгуен Т.К.Т., Галимова Р.З., Шайхиев И.Г. // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22. № 2. С. 37-43.
21. Галимова Р.З., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. *Обработка результатов исследования процессов адсорбции с использованием программного обеспечения Microsoft Excel: практикум: учебное пособие*. Казань. Белгород. Изд-во БГТУ. 2017. 60 с.
22. Галимова Р.З., Шайхиев И.Г. // *Вода: химия и экология*. 2017. № 2. С. 60-66.
23. Denisova T.R., Galimova R.Z., Nizameev I.R., Shaikhiev I.G. et al. // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017. Vol. 9. No 1S. pp. 1480-1490.
24. Denisova T.R., Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Mavrin G.V. // *Reserch Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7. No 5. pp. 1765-1771.
25. Галимова Р.З., Шайхиев И.Г., Алмазова Г.А., Свергузова С.В. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 10. С. 179-184.

## References

1. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. *Sustainable Materials and Technologies*, 2016, Vol. 9, pp. 10-40. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002
2. Khatoon H., Rai J.P.N., *Octa Journal of Environmental Research*, 2016, Vol. 4, No 3, pp. 208-229.
3. Bhatnagar A., Sillanpää M., Witek-Krowiak A., *Chemical Engineering Journal*, 2015, Vol. 270, pp. 244-271. DOI: 10.1016/j.cej.2015.01.135
4. Bachale S., Sharma S., Sharma A., Verma S., *International Journal of Applied Research*, 2016, Vol. 2, No 7, pp. 523-527.
5. Doshi B., Sillanpää M., Kalliola S., *Water Research*, 2018, Vol. 135, pp. 262-277. DOI: 10.1016/j.watres.2018.02.034
6. Shaikhiev I.G., Shaikhieva K.I., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, Vol. 19, No 4, pp. 127-141.
7. Shaikhiev I.G., Shaikhieva K.I., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, Vol. 19, No 5, pp. 161-165.
8. Shaikhiev I.G., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 5, pp. 151-160.
9. Denisova T.R., Shaikhiev I.G., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 24, pp. 145-158.

10. Shaikhiev I.G., *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2008, No 12, pp. 29-42.
11. Huong V.D., Nambiar E.K.S., Quang L.T., Mendham D.S. et al., *Journal of Forest Science*, 2015, Vol. 77, No 1, pp. 51-58. DOI: 10.2989/20702620.2014.983360
12. Shaikhiev I.G., Nguen T.K.T., Shaikhieva K.I., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 3, pp. 171-179.
13. Shaikhiev I.G., Nguen T.K.T., Shaikhieva K.I., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 11, pp. 153-155.
14. Nguen T.K.T., Sidorovna O.O., Zamaieva L.A., Miftakhova F.R. et al., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, Vol. 20, No 18, pp. 159-162.
15. Denisova T.R., Sippel I.Ya., Shaikhiev I.G., Nguyen T.K.T. et al., *International Journal of Green Pharmacy*, 2018, Vol. 12, No 4, pp. 895-899.
16. Zhou Y., Zhang R., Gu X., Lu J. Separation Science and Technology. 2015. vol. 50. № 2. – pp. 245-252. DOI: 10.1080/01496395.2014.956223
17. Argun M.E., Dursun S., Ozdemir C., Karatas M., *Journal of Hazardous Materials*. 2007. vol. 141. pp. 77-85. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.095
18. Rao P.S., Reddy K.V.N.S., Kalyani S., Krishnaiah A., *Wood Science and Technology*, 2007, Vol. 41, No 5, pp. 427-442. DOI: 10.1007/s00226-006-0115-4
19. Memon S.Q., Memon N., Shah S.W., Khuhawar M.Y. et al., *Journal of Hazardous Materials*, 2007, Vol. B139, pp. 116-121. DOI:10.1016/j.jhazmat.2006.06.013
20. Miftakhova F.R., Nguen T.K.T., Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2019, Vol. 22, No 2, pp. 37-43.
21. Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Obrabotka rezul'tatov issledovaniya protsessov adsorbtsii s ispol'zovaniem programmogo obespecheniya Microsoft Excel: praktikum: uchebnoe posobie, Kazan', Belgorod, Izd-vo BGTU, 2017, 60 p.
22. Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Voda: khimiya i ekologiya, 2017, No 2, pp. 60-66.
23. Denisova T.R., Galimova R.Z., Nizameev I.R., Shaikhiev I.G. et al., *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2017, Vol. 9, No 1S, pp. 1480-1490.
24. Denisova T.R., Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Mavrin G.V., *Reserch Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, Vol. 7, No 5, pp. 1765-1771.
25. Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Almazova G.A., Sverguzova S.V., *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2016, No 10, pp. 179-184.

**Мифтахова Файруза Рафаэлевна** – магистрант кафедры инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

**Нгуен Тхи Ким Тхоа** – аспирант кафедры инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

**Галимова Румия Захидовна** – ассистент кафедры инженерной экологии, канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

**Шайхиев Ильдар Гильманович** – заведующий кафедрой инженерной экологии, д-р техн. наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

**Свергузова Светлана Васильевна** – заведующая кафедрой промышленной экологии, д-р техн. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

**Miraftakhova Fairuza R.** - undergraduate student of the Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University, Kazan

**Nguyen Thi Kim Thoa** - Postgraduate Student, Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University, Kazan

**Galimova Rumiya Z.** - Assistant of the Department of Environmental Engineering, Ph.D. tech. Sciences, Kazan National Research Technological University, Kazan, [rumiushka666@mail.ru](mailto:rumiushka666@mail.ru)

**Shaikhiev Ildar G.** - Head of the Department of Environmental Engineering, Dr. Tech. Sciences, Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan

**Sverguzova Svetlana V.** - Head of the Department of Industrial Ecology, Dr. Tech. Sciences, Professor, Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, Belgorod