

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2024, Том 7, № 3 / 2024, Vol. 7, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.723.212

DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-78-92

## Кинетика и механизм адсорбции красителя метиленового голубого измельченной биомассой подсолнечника

<sup>1</sup>Евтушенко Е.И.,

<sup>1</sup>Локтионова Е.В. \*,

<sup>2</sup>Шайхиев И.Г.,

<sup>1</sup>Сапронова Ж.А.,

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,

\* Ответственный автор E-mail: [kate.sysa@yandex.ru](mailto:kate.sysa@yandex.ru)

**Аннотация: цели:** исследование кинетики и механизм адсорбции красителя целлюлозным сырьем. **Методы.** В качестве сорбента использовались отход растениеводства – измельченные стебли подсолнечника исходные и модифицированные 10% щелочью NaOH размером частиц с 1 до 2 мм. В качестве адсорбата предварительными испытаниями выбран краситель метиленовый голубой. Для определения максимальной сорбционной емкости строили изотермы адсорбции. Построены кинетические модели сорбции псевдопервого и псевдовторого порядка. С целью определения механизма процесса определяли термодинамические константы: энергию сорбции ( $E$ ), энергию Гиббса ( $\Delta G$ ) и коэффициент Био ( $Bi$ ).

**Результаты.** Максимальная сорбционная способность измельчённой биомассы стеблей подсолнечника по отношению к красителю составляет 0,52 ммоль/г для модифицированного щёлочью материала, что на 48% выше исходного сорбента (0,35 ммоль/г). Таким образом, материал СП(NaOH) показал улучшенные сорбционные свойства, и он был выбран для дальнейших кинетических исследований. Энергия сорбции равна 5,82 кДж/моль, что может свидетельствовать о физической адсорбции. Энергия Гиббса равна -6,3742 кДж/моль, меньше нуля, что свидетельствует о самопроизвольности данного процесса. Адсорбционное равновесие для красителя МГ наступает через 120 минут, кинетическая кривая имеет плавный характер. Коэффициент Био равен 1,812, следовательно, процесс адсорбции лимитируется смешанной диффузией.

**Выводы.** Анализ полученных данных позволил определить коэффициент Био, отражающий протекание адсорбции МГ по смешанно – диффузионному механизму во всём временном диапазоне адсорбции. Это указывает на сложный характер процесса адсорбции МГ и подтверждает важность учёта различных

факторов, влияющих на этот процесс, при разработке методов очистки водных сред от органических загрязнителей.

**Ключевые слова:** стебли подсолнечника, физическая адсорбция, химическое модифицирование поверхности, природные сорбенты, сорбция красителя, метиленовый голубой

**Для цитирования:** Евтушенко Е.И., Локтионова Е.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А. Кинетика и механизм адсорбции красителя метиленового голубого измельченной биомассой подсолнечника // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 3. С. 78 – 92. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-78-92

Поступила в редакцию: 30 мая 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 31 июля 2024 г.; Принята к публикации: 28 августа 2024 г.

### Kinetics and mechanism of adsorption of methylene blue dye by crushed sunflower biomass

<sup>1</sup> Evtushenko E.I.,

<sup>1</sup> Loktionova E.V. \*,

<sup>2</sup> Shaikhiev I.G.,

<sup>1</sup> Sapronova Zh.A.,

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,

<sup>2</sup> Kazan National Research Technological University,

\* Corresponding author: [kate.sysa@yandex.ru](mailto:kate.sysa@yandex.ru)

**Abstract: objectives:** to study the kinetics and mechanism of dye adsorption by cellulose raw materials. **Methods.** As a sorbent, waste from crop production was used – ground sunflower stalks, initial and modified with 10% NaOH alkali, with a particle size from 1 to 2 mm. Methylene blue dye was selected as an adsorbate by preliminary tests. Adsorption isotherms were constructed to determine the maximum sorption capacity. Kinetic models of sorption of the pseudo-first and pseudo-second order are constructed. In order to determine the mechanism of the process, thermodynamic constants were determined: sorption energy ( $E$ ), Gibbs energy ( $\Delta G$ ) and Bio coefficient ( $B_i$ ).

**Results.** The maximum sorption capacity of the crushed biomass of sunflower stalks in relation to the dye is 0.52 mmol/g for the alkali-modified material, which is 48% higher than the initial content (0.35 mmol/g). Thus, the SP(NaOH) material showed improved sorption properties, and it was selected for further kinetic studies. The sorption energy is 5.82 kJ/mol, which may indicate physical adsorption. The Gibbs energy is -6.3742 kJ/mol, less than zero, which indicates the spontaneity of this process. The adsorption equilibrium for the MG dye occurs after 120 minutes, the kinetic curve has a smooth character. The Bio coefficient is 1.812, therefore, the adsorption process is limited by mixed diffusion.

**Conclusions.** The analysis of the data obtained made it possible to determine the Bio coefficient reflecting the course of MG adsorption by a mixed-diffusion mechanism over the entire time range of adsorption. This indicates

*the complex character of the MG adsorption process and confirms the importance of taking into account various factors influencing this process when developing methods for cleaning aquatic environments from organic pollutants.*

**Keywords:** *sunflower stalks, physical adsorption, chemical modification of the surface, natural sorbents, dye sorption, methylene blue*

**For citation:** Evtushenko E. I., Loktionova E.V., Shaikhiev I.G., Saprionova Zh.A. Kinetics and mechanism of adsorption of methylene blue dye by crushed sunflower biomass. Chemical Bulletin. 2024. 7 (3). P. 78 – 92. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-3-78-92

The article was submitted: May 30, 2024; Approved after reviewing: July 31, 2024; Accepted for publication: August 28, 2024.

## Введение

Химические взаимодействия, протекающие при извлечении красителей из водных сред, представляют большой интерес для специалистов в области водоподготовки и химии воды. К широко распространенным процессам, происходящим в водных средах различной степени загрязненности при извлечении поллютантов, относится адсорбция. Это один из самых известных методов извлечения нежелательных примесей из природных, сточных, оборотных вод, химических и биологических жидкостей.

В химической промышленности многие процессы связаны с использованием красителей и сопряжены с образованием больших объемов окрашенных вод. Такие воды оказывают пагубное воздействие и на человека и животных, поскольку токсичные вещества могут попадать в человеческий организм вместе с питьевой водой или по пищевым цепям.

Известно, что активированный уголь [1] считается одним из наилучших адсорбентов во всем мире. Однако его высокая стоимость и необходимость в регенерации делают процесс очистки

сложным и затратным. Именно поэтому из соображений экономии активированный уголь не применяется для очистки больших объемов сточных вод. Помимо активированного угля в литературе широко описаны многочисленные сорбционные материалы, такие как хитин [2], целлюлозосодержащие отходы [3-4], зоокомпост [5], растительные отходы [6-8], отходы маслопереработки [9-10], монтмориллонитовые и каолиновые материалы [11-12] и другие. Предлагается также использовать отходы предприятий: шлаки [13-14], пыли [15], шламы [16-17] и так далее.

Особое внимание в последние годы привлекают растительные отходы в качестве материалов для очистки сточных вод. Это экологически безопасный, возобновляемый и широко доступный ресурс. В данной работе изучались кинетика и механизм адсорбции красителя метиленового голубого биомассой измельченных стеблей подсолнечника.

## Материалы и методы исследований

Материалы и методы. Исследуемый в качестве загрязняющего вещества краситель метиленовой голубой относится к основным красителям и имеет следующую формулу:

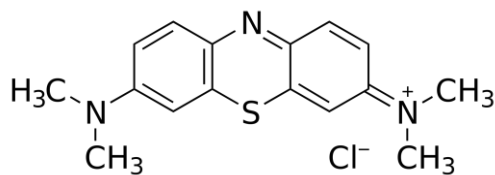


Рис. 1. Структурная формула красителя «Метиленовый голубой».

Fig. 1. The structural formula of the dye is "Methylene blue".

Молекулярная масса данного красителя 319,86 г/моль, растворы концентрации от 10 до 4500 мг/дм<sup>3</sup> имеют pH = 7.

При низких температурах раствор метиленового голубого приобретает фиолетовый окрас.

Модельный раствор готовили путем растворения навески метиленового голубого (ч.д.а.) в дистиллированной воде для получения соответствующей концентрации.

Концентрацию МГ определяли на фотоэлектроколориметре Photoelectric colorimeter AP-101 (Япония) при максимальной длине волны поглощения  $\lambda = 670$  нм. Была построена калибровочная кривая зависимости оптической плотности раствора от концентраций МГ ( $D=f(C)$ ) для определения неизвестной концентрации МГ.

Стебли подсолнечника были собраны на территории поля поселка Дубовое, Белгородского района, Белгородской области, Россия. Их собирали в период с декабря по март 2019 г. Стебли измельчали с помощью мясорубки до размеров 1-2 мм, затем полученную массу несколько раз промывали дистиллированной водой для удаления песка и грязи и сушили при температуре 80-100°C в сушильном шкафу в течении 24 часов. Получившийся порошок использовали в качестве сорбционного материала.

Для получения информации о морфологической структуре и химическом составе поверхности порошок биомассы стеблей подсолнечника (СП)

анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Размер частиц порошка СП измеряли с помощью ситового анализа [18].

Для повышения сорбционных свойств порошок СП обрабатывали 10% раствором NaOH в течение 90 минут. Концентрация NaOH и длительность обработки были выбраны на основании литературных данных для других растительных материалов. Для обработки использовали 5 г порошка подсолнечника, который затем заливали 100 см<sup>3</sup> раствора NaOH с нужной концентрацией. Смесь настаивали в течение 1,5 часа, промывали дистиллированной водой до восстановления pH, процеживали через бумажный фильтр и высушивали. [19-21].

Сорбционные исследования проводились статическим методом. Для определения сорбционной емкости (А, ммоль/г) навеску сорбционного материала вносили в колбу объемом 250 см<sup>3</sup> с раствором, содержащим краситель определенной концентрации. Соотношение твердой и жидкой фаз было 1:100 по массе. Содержимое колбы периодически встряхивали в течение 24 часов, затем жидкость отделяли фильтрованием, и в фильтрате оценивалось остаточное содержание красителя. Количество вещества, сорбированного твердой фазой (А, ммоль/г), рассчитывалось согласно формуле 1.

$$A = \frac{(C_n - C_k)V}{m} \quad (1)$$

где  $C_n$  – начальная концентрация красителя Метиленовый голубой, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $C_k$  – конечная концентрация красителя Метиленовый голубой после равновесия, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса навески адсорбционного материала, г.

## Результаты и обсуждения

В ходе исследований были построены изотермы адсорбции метиленового голубого на нативной поверхности материала СП(Н) и СП, модифицированных 10%-м раствором NaOH (СП(NaOH)) (рис. 2).

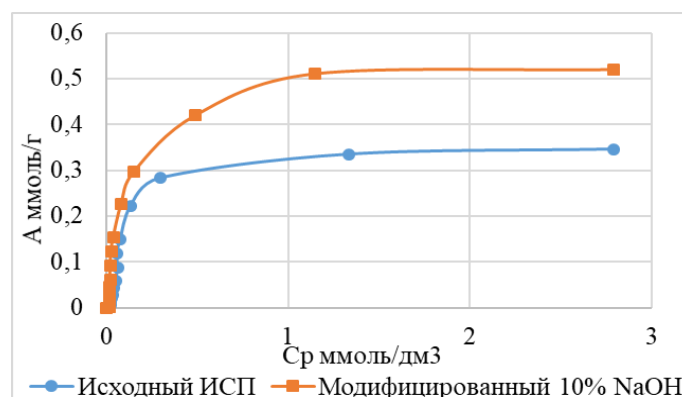


Рис. 2. Изотермы адсорбции МГ на поверхности СП и СП(NaOH).

Fig. 2. Isotherms of MG adsorption on the surface of SP and SP(NaOH).

Максимальная сорбционная емкость биомассы ИСП по Метиленовому голубому установлена на уровне 0,35 ммоль/г для исходного сорбента и 0,52 ммоль / г для модифицированного щелочью, что на 48% выше исходного.

Повышение сорбционной способности ИСП после химической модификации указывает на значительное увеличение размера мезопор в структуре сорбента. Химические вещества удаляют рас-

творимые компоненты из растительного сорбента, способствуя формированию развитой пористой структуры полученного сорбционного материала, что подтверждается микроскопическим анализом структуры стеблей подсолнечника до и после обработки 10%-ным раствором щёлочи (рис. 3).

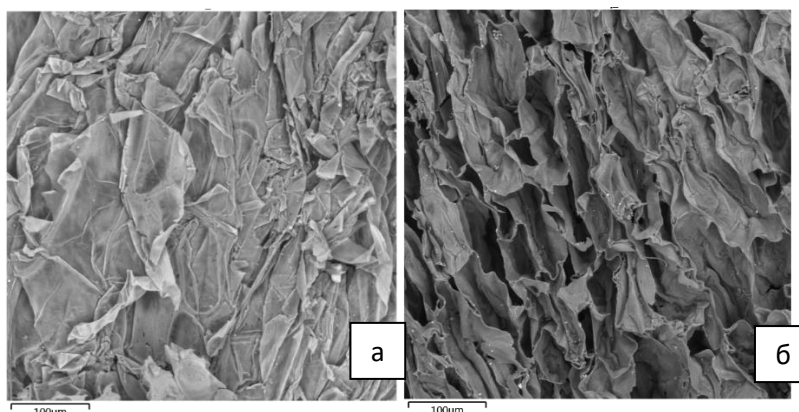


Рис. 3. Микрофотографии измельченных стеблей подсолнечника при увеличении в 100 раз: а – до обработки, б – после обработки щелочью NaOH 10%.

Fig. 3. Micrographs of crushed sunflower stalks at a magnification of 100 times: a – before processing, b – after processing with NaOH 10%.

Поскольку материал СП(NaOH) показал улучшенные сорбционные свойства, для дальнейших кинетических исследований был взят материал СП(NaOH).

С целью определения механизма процесса определяли термодинамические константы: энергию сорбции ( $E$ ), и энергию Гиббса ( $\Delta G$ ).

Энергию сорбции  $E$  Дж/моль, определяли по уравнению модели Дубинина-Радускевича

$\ln A = f(\ln(\frac{C_k}{C_n}))^2$ , при построении которой было получено значение  $E$ , равное 5823,56 Дж/моль или 5,82 кДж/моль, что может свидетельствовать о физической адсорбции

Энергию Гиббса,  $\Delta G$  Дж/моль, определяли с помощью константы Ленгмюра  $KL$ , рассчитанной

ранее и равной 15,94 по формуле:

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

где  $R=8,31$  Дж/моль\*К

$$T=273+20=293 \text{ K}$$

$$KL=15,94$$

Полученная после расчета величина  $\Delta G^\circ$ , равная -63741,63 Дж/моль или -6,3742 кДж/моль, меньше нуля, что свидетельствует о самопроизвольности данного процесса.

Для установления стадий, лимитирующих скорость процесса адсорбции, была построена кинетическая зависимость сорбционной емкости,  $A$ , от длительности перемешивания  $t$ :

$$A=f(t),$$

рис. 4.

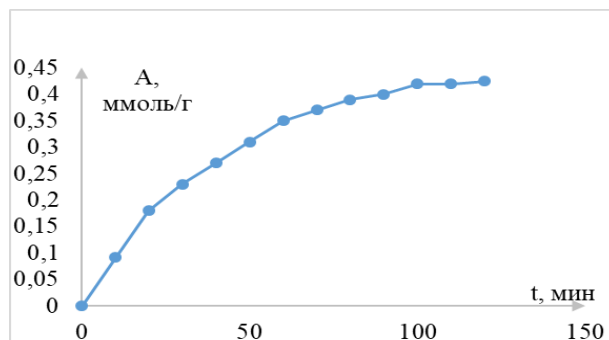


Рис. 4. Кинетическая кривая процесса сорбции.

Fig. 4. Kinetic curve of the sorption process.

На рис. 4 представлена кинетическая зависимость процесса адсорбции, из которой следует, что адсорбционное равновесие для красителя МГ наступает через 120 минут, кинетическая кривая

имеет плавный характер.

Внешнедиффузионная кинетическая модель сорбции представлена на рис. 5.

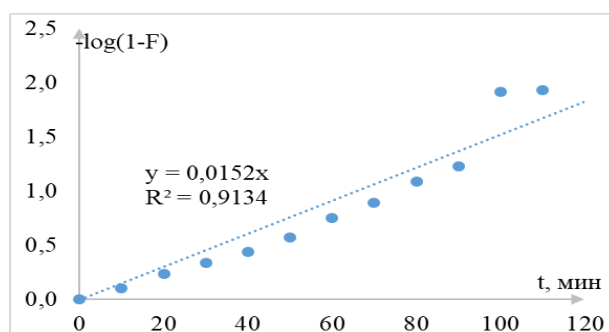


Рис. 5. Внешнедиффузионная кинетическая модель сорбции.

Fig. 5. External diffusion kinetic model of sorption.

Таблица 1

Константа внешнедиффузионной кинетической модели сорбции.

Table 1

The constant of the external diffusion kinetic sorption model.

$\log(1-F) = -Y \cdot t$	
$y = 0,0152x$	
$Y =$	0,0152

Коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9134$

Из рис. 5 видно, что данная зависимость является линейной с достоверностью  $R^2 = 0,9134$ . Константа  $Y = 0,0152$ .

С помощью константы  $Y$  можно определить  $D_{\text{вн}}$ :

$$D_{\text{вн}} = \frac{r_0 \cdot \delta \cdot Y \cdot A}{3 \cdot C_e} \quad (3)$$

где:  $D_{\text{вн}}$  – коэффициент внешней диффузии,  
 $C_e$  – равновесная концентрация сорбата в растворе, ммоль/см<sup>3</sup>, 2,8  
 $A$  – сорбционная емкость, ммоль/г 0,52;  
 $r_0$  – радиус частиц сорбента 0,008, см;  
 $\delta$  – толщина пленки вокруг гранул сорбента  $5 \cdot 10^{-3}$ , см.

После расчета получаем  $D_{\text{вн}} = 3,76 \cdot 10^{-8}$ .

Для выявления лимитирующей стадии кинетики адсорбции рассматривали три математические модели:

- Диффузионную модель;
- Модель псевдопервого порядка;
- Модель превдовторого порядка.

Диффузионная модель Бойда описывает протекание диффузионной адсорбции и рассматривается как процесс, состоящий из стадии диффузии адсорбата в порах адсорбента [22].

С целью выявления лимитирующей стадии строили зависимости:  $-\lg(1-F)=f(t)$ ,  $A=f(t/2)$  и  $Bt=f(t)$ , где  $F$  – степень достижения равновесия в системе, определяемая по формуле:

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

С помощью линейаризации графиков в координатах  $-\lg(1-F)=f(t)$ ,  $A=f(t/2)$  и  $Bt=f(t)$ , определяли константы внешней и внутренней диффузии и рассчитывали коэффициент Био ( $Bi$ ):

$$Bi = \frac{D_{\text{вн}} \cdot r}{D_i \cdot \delta \cdot K_p} \quad (5)$$

где

$r$  – радиус частиц сорбента 0,008, см;

$\delta$  – толщина пленки вокруг гранул сорбента  $5 \cdot 10^{-3}$ ,

$K_p$  – коэффициент распределения

$D_{\text{вн}}$  – коэффициент внешней диффузии  $3,76 \cdot 10^{-8}$ .

Для того чтобы определить вклад внутренней диффузии в процесс сорбции, эмпирическое уравнение

$$A = K_d \cdot t/2 + L \quad (6)$$

где:  $L$  – отрезок, отсекаемый на зависимости  $A=f(t/2)$ , на оси координат и характеризует толщину граничного слоя,  $K_d$  – константа скорости внутренней диффузии.

Внутридиффузионная кинетическая модель представлена на рис. 6.

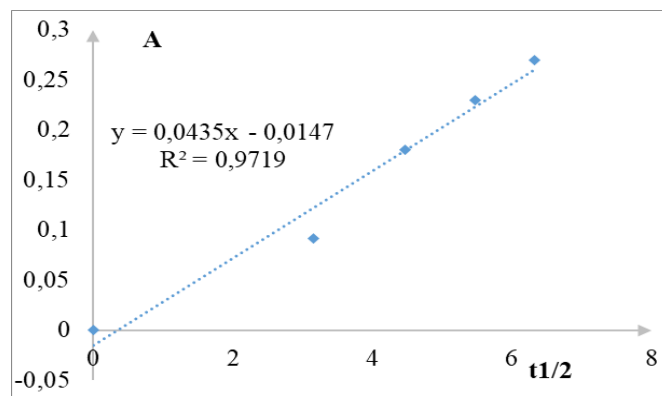


Рис. 6. Внутридиффузионная кинетическая модель сорбции.

Fig. 6. Intradiffusion kinetic model of sorption.



Константы  $K_d$  и  $L$ , которые определяли из уравнения прямой (рис. 6), составляют:

$$K_d = 0,0435;$$

$$L = -0,0147.$$

При коэффициенте аппроксимации  $R^2 = 0,9719$ .

Для анализа полученной кинетической кривой адсорбции были применены две кинетические модели псевдопервого (модель Лагергрена) и псевдовторого порядка.

Интегральные уравнения кинетических моделей псевдопервого I и псевдовторого II порядков имеют вид:

$$\ln(A_{\text{равн}} - A) = \ln A_{\text{равн}} - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{t}{A} = \frac{1}{k_2 A_{\text{равн}}^2} + \frac{1}{A_{\text{равн}}} t \quad (8)$$

где:  $A$  – адсорбция в момент времени  $t$ ;  $A_{\text{равн}}$  – равновесная адсорбция;  $k_1$  – константа скорости адсорбции для модели псевдопервого порядка;  $k_2$  – то же для модели псевдовторого порядка.

В процессе дальнейших расчётов были построены графики зависимости  $B_t = f(t)$  (7), кинетической модели сорбции псевдопервого порядка (8) и кинетической модели псевдовторого порядка (9).

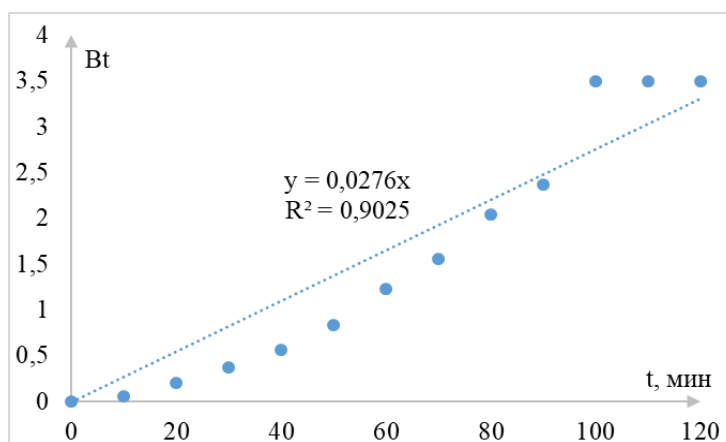


Рис. 7. График зависимости  $B_t = f(t)$ .

Fig. 7. Dependence graph  $B_t = f(t)$ .

Таблица 2

Коэффициент внутренней диффузии.

Table 2

Internal diffusion coefficient.

$B_t = (D_i * \pi^2 / r^2) * t$	
$y = 0,0276x$	
$D_i * \pi^2 / r^2 =$	0,0276

Коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9025$

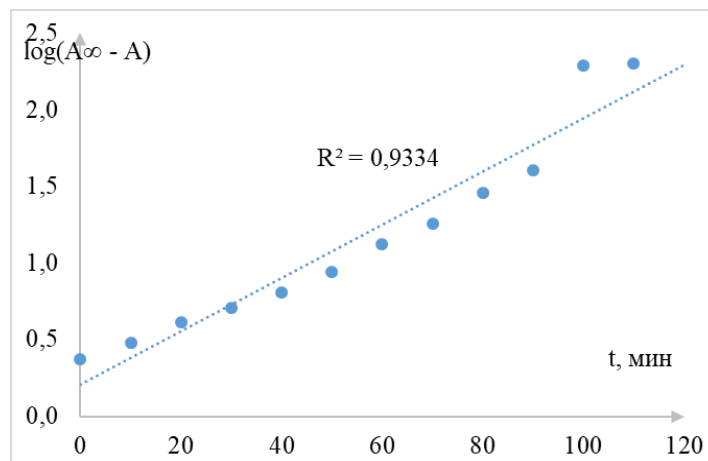


Рис. 8. Кинетическая модель сорбции псевдопервого порядка.

Fig. 8. Kinetic model of pseudo-first order sorption.

Коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9334$

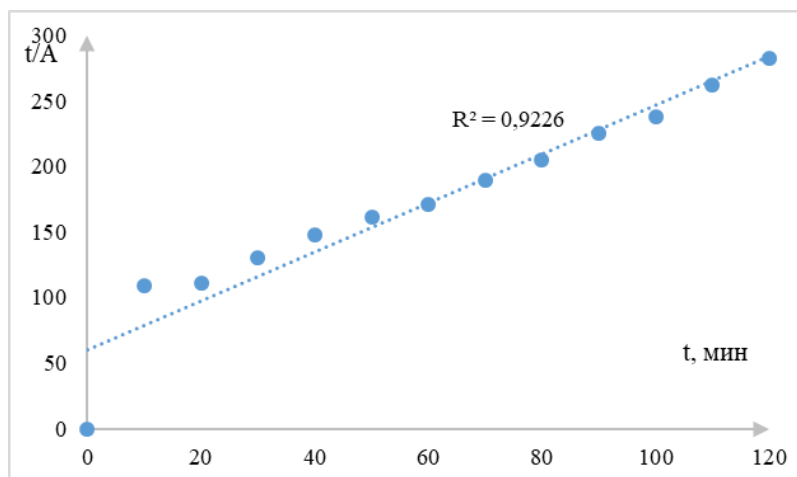


Рис. 9. Кинетическая модель сорбции псевдовторого порядка.

Fig. 9. Kinetic model of pseudo-second-order sorption.

Коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9226$

Модель псевдопервого порядка рассматривает роль сорбат-сорбентных взаимодействий и общую скорость процесса сорбции.

Модель псевдовторого порядка рассматривает роль сорбат-сорбентных взаимодействий и общую скорость процесса сорбции.

На основании проведенных расчетов был вычислен коэффициент  $B_i$ , данные для расчета которого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Данные для расчета коэффициента Био.

Table 3

Data for calculating the Bio coefficient.

Радиус частиц сорбента $r$ (м)	0,00008
Толщина плёнки раствора вокруг гранул сорбента $\delta$ (см)	0,005
Коэффициент распределения $K_p$	0,151785714
Коэффициент внешней диффузии $D_{вн}$	$3,07619 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент внутренней диффузии $D_i$	$1,78974 \cdot 10^{-11}$
Коэффициент Био $Bi$	1,811811436

Данные для расчёта коэффициента Био ( $Bi$ ) приведены в таблице 3

$$Bi = \frac{D_{вн} \cdot r}{D_i \cdot \delta \cdot K_p} \quad (9)$$

Коэффициент Био ( $Bi$ ) = 1,812, что больше 1, но меньше 20, следовательно, процесс адсорбции лимитируется смешанной диффузией.

#### Выводы

Таким образом, для выявления ограничивающего этапа процесса адсорбции метиленового голубого (МГ) с использованием природного адсор-

бирующего материала на основе целлюлозы, была изучена динамика этого процесса в статических условиях в модельных системах – водных растворах МГ – в течение 130 минут. Были построены графики изменения степени адсорбции МГ данным материалом, и после анализа полученных данных был определен коэффициент Био, который отражает процесс адсорбции МГ через смешанно-диффузионный механизм на протяжении всего временного интервала адсорбции.

#### Финансирование

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

#### Список источников

1. Mailler R. et al. Removal of emerging micropollutants from wastewater by activated carbon adsorption: Experimental study of different activated carbons and factors influencing the adsorption of micropollutants in wastewater // Journal of environmental chemical engineering. 2016. Vol. 4. № 1. P. 1102 – 1109.
2. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzova S.V. et al. Fish scales as a biosorbent of pollutants from wastewaters and natural waters (A literature review) // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2020. Vol. 10. No. 6. P. 6893 – 6905. DOI 10.33263/BRIAC106.68936905

3. Sverguzova S.V., Sapronova Zh.A., Shaikhiev I.G. et al. Use of Waste Paper Recycling as a Sorption Material for Methylene Blue Dye Removal from Model Solutions // Russian Journal of General Chemistry. 2023. Vol. 93. No. 12. P. 3258 – 3263. DOI 10.1134/s1070363223120277
4. Белый В.А., Свергузова С.В., Шайхиев И.Г. и др. Извлечение красителя метиленовой голубой из растворов биомассой опилок платана // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2023. Т. 66. № 5. С. 139 – 145. DOI 10.6060/ivkkt.20236605.6757
5. Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А. и др. Сорбционная активность зоокомпоста по отношению к ионам меди Cu(II) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23. № 6. С. 1051 – 1059. DOI 10.17308/sorpchrom.2023.23/11866
6. Свергузова С.В., Бомба И.В., Воронина Ю.С. Очистка маслосодержащих эмульсий листовым опадом вишни и рябины // Chemical Bulletin. 2018. Т. 1. № 4. С. 4 – 10.
7. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Shaikhieva K.I., Deberdeev T.R. Using Rye (Secale Cereale) Processing Wastes as Sorption Materials for Removing Pollutants from Aquatic Environments // Polymer Science, Series D. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 651 – 656. DOI 10.1134/s1995421223030346
8. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Шайхиева К.И. и др. Использование кожуры мандаринов в качестве сорбционных материалов для удаления загрязняющих веществ из водных сред // Химия растительного сырья. 2023. № 1. С. 61 – 75. DOI 10.14258/jcprm.2023011931
9. Sverguzova S.V., Gafarov R.R., Zubkova O.S. et al. Changes in the Physicochemical and Sorption Properties of Bleaching Clay in the Course of Thermal Treatment // Colloid Journal. 2024. Vol. 86. No. 4. P. 571 – 579. DOI 10.1134/S1061933X24600490
10. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Гафаров Р.Р., Сапронова Ж.А. Рациональное использование отхода маслоэкстракционного производства – отработанной отбеленной глины // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 7. С. 14 – 19. DOI 10.18412/1816-0395-2024-7-14-19
11. Ким О.К., Волкова Л.Д., Закарина Н.А. Пилларированные алюминием и железом слоистые алюмосиликаты в процессах очистки водных растворов от хрома (III) // Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 3. С. 62 – 65.
12. Бельчинская Л.И. и др. Влияние солевой модификации на адсорбционные характеристики кислотноактивированных монтмориллонита и каолинита // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. № 6. С. 926 – 930.
13. Кирюшина Н.Ю., Тарасова Г.И., Свергузова С.В. Шлаковые отходы в водоочистке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2010. № 4. С. 140 – 145.
14. Sverguzova S.V., Sapronova Z.A., Svyatchenko A.V. et al. Iron-Containing Modeled Waste as Raw Material for Coagulant Receiving // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Russky Island, 04-06 марта 2019 года. Vol. 272, 3. Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 032007. DOI 10.1088/1755-1315/272/3/032007

15. Старостина И.В., Кирюшина Н.Ю., Локтионова Е.В., Матушкина А.В. Получение железокремниевого флокулянта-коагулянта из отхода металлургического производства и его применение в процессе очистки эмульгированных сточных вод // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 7. С. 20 – 25. DOI 10.18412/1816-0395-2022-7-20-25
16. Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148 – 159.
17. Николаева Л.А. и др. Способы утилизации отработанного сорбента нефтепродуктов на основе шлама химводоочистки Казанской ТЭЦ-1 // Экология и промышленность России. 2014. № 7. С. 18 – 20.
18. Loktionova E.V., Maltseva E.K., Sysa V.I. The usage of expanded clay gravel production waste for oily wastewaters purification. 10 декабря 2021 года, 2021. P. 151 – 156.
19. Loktionova E.V., Sysa O.K., Loktionov V.A. Extraction of methylene blue coloring agent from model solutions with a plant-origin sorbent // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09-10 марта 2021 года. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012018. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012018
20. Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Локтионова Е.В. и др. Использование растительного сорбента для извлечения красителя конго красный из модельных растворов // Chemical Bulletin. 2021. Т. 4. № 1. С. 44 – 55.
21. Сакалова Г.В., Свергузова С.В., Мальованый М.С. Эффективность очистки сточных вод гальванического производства адсорбционным методом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 153 – 156.
22. Пальтиель Л.Р., Зенин Г.С., Волинец Н.Ф. Коллоидная химия: учебное пособие, СЗГУ, СПб, 2004. 68 с.
23. Галимова Р.З., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Обработка результатов исследования процессов адсорбции с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. 2017.

### References

1. Mailler R. et al. Removal of emerging micropollutants from wastewater by activated carbon adsorption: Experimental study of different activated carbons and factors influencing the adsorption of micropollutants in wastewater. Journal of environmental chemical engineering. 2016. Vol. 4. No. 1. P. 1102 – 1109.
2. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzoza S.V. et al. Fish scales as a biosorbent of pollutants from wastewaters and natural waters (A literature review). Biointerface Research in Applied Chemistry. 2020. Vol. 10.No. 6. P. 6893 – 6905. DOI 10.33263/BRIAC106.68936905
3. Sverguzoza S.V., Sapronova Zh.A., Shaikhiev I.G. et al. Use of Waste Paper Recycling as a Sorption Material for Methylene Blue Dye Removal from Model Solutions. Russian Journal of General Chemistry. 2023. Vol. 93. No. 12. P. 3258 – 3263. DOI 10.1134/s1070363223120277

4. Bely V.A., Sverguzova S.V., Shaikhiev I.G. et al. Extraction of the dye methylene blue from solutions of sycamore sawdust biomass. News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology. 2023. Vol. 66. No. 5. P. 139 – 145. DOI 10.6060/ivkkt.20236605.6757
5. Sverguzova S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Zh.A. et al. Sorption activity of zoocompost in relation to ions copper Cu(II). Sorption and chromatographic processes. 2023. Vol. 23. No. 6. P. 1051 – 1059. DOI 10.17308/sorpchrom.2023.23/11866
6. Sverguzova S.V., Bomba I.V., Voronina Yu.S. Purification of oil-containing emulsions with leaf litter from cherry and rowan. Chemical Bulletin. 2018. Vol. 1. No. 4. P. 4 – 10.
7. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Shaikhieva K.I., Deberdeev T.R. Using Rye (*Secale Cereale*) Processing Wastes as Sorption Materials for Removing Pollutants from Aquatic Environments. Polymer Science, Series D. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 651 – 656. DOI 10.1134/s1995421223030346
8. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Shaikhieva K.I. et al. Use of tangerine peel as a sorption materials for removing pollutants from aquatic environments. Chemistry of plant raw materials. 2023. No. 1. P. 61 – 75. DOI 10.14258/jcprm.20230111931
9. Sverguzova S.V., Gafarov R.R., Zubkova O.S. et al. Changes in the Physicochemical and Sorption Properties of Bleaching Clay in the Course of Thermal Treatment. Colloid Journal . 2024. Vol. 86. No. 4. P. 571 – 579. DOI 10.1134/S1061933X24600490
10. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Gafarov R.R., Sapronova Zh.A. Rational use of oil extraction waste production – spent bleaching clay. Ecology and Industry of Russia. 2024. Vol. 28. No. 7. P. 14 – 19. DOI 10.18412/1816-0395-2024-7-14-19
11. Kim O.K., Volkova L.D., Zakarina N.A. Aluminum-pillared and iron layered aluminosilicates in the processes of purification of aqueous solutions from chromium (III). Bashkir Chemical Journal. 2011. Vol. 18. No. 3. Pp. 62 – 65.
12. Belchinskaya L.I. et al. The influence of salt modification on the adsorption characteristics of acid-activated montmorillonite and kaolinite. Journal of Applied Chemistry. 2008. Vol. 81. No. 6. P. 926 – 930.
13. Kiryushina N.Yu., Tarasova G.I., Sverguzova S.V. Slag waste in water treatment. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after VG Shukhov. 2010. No. 4. P. 140 – 145.
14. Svergusova S.V., Sapronova Z.A., Svyatchenko A.V. et al. Iron-Containing Modeled Waste as Raw Material for Coagulant Receiving. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Russky Island, 04 -06 March 2019. Vol. 272, 3. Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 032007. DOI 10.1088/1755-1315/272/3/032007
15. Starostina I.V., Kiryushina N.Yu., Loktionova E.V., Matushkina A.V. Obtaining an iron-silicon flocculant-coagulant from metallurgical waste and its use in the process of treating emulsified wastewater. Ecology and Industry of Russia. 2022. Vol. 26. No. 7. Pp. 20 – 25. DOI 10.18412/1816- 0395-2022-7-20-25
16. Lukashevich O.D., Usova N.T. Sorbent from ferrous sludge for wastewater treatment from heavy metal ions. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. Vol. 20. No. 1. P. 148 – 159.

17. Nikolaeva L.A. et al. Methods of recycling waste sorbent of petroleum products based on sludge from chemical water treatment of Kazan TPP-1. Ecology and Industry of Russia. 2014. No. 7. P. 18 – 20.
18. Loktionova E.V., Maltseva E.K., Sysa V.I. The use of expanded clay gravel production waste for oily wastewater purification. December 10, 2021, 2021. P. 151 – 156.
19. Loktionova E.V., Sysa O.K., Loktionov V.A. Extraction of methylene blue coloring agent from model solutions with a plant-origin sorbent. Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, March 09-10, 2021. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012018. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012018
20. Sverguzova S.V., Sapronova Zh.A., Loktionova E.V. et al. Use of plant sorbent for extraction of Congo red dye from model solutions. Chemical Bulletin. 2021 . T. 4. No. 1. P. 44 – 55.
21. Sakalova G.V., Sverguzova S.V., Malovany M.S. Efficiency of wastewater treatment of galvanic production by the adsorption method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 153 - 156.
22. Paltiel L.R., Zenin G.S., Volynets N.F. Colloidal chemistry: a tutorial, SZGU, St. Petersburg, 2004. 68 p.
23. Galimova R.Z., Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V. Processing the results of the study of adsorption processes using Microsoft Excel software. 2017.

#### ***Информация об авторах***

Евтушенко Е.И., доктор технических наук, профессор, первый проректор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, email: naukaei@mail.ru

Локтионова Е.В., аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, email: kate.sysa@yandex.ru

Сапронова Ж.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, email: sapronova.2016@yandex.ru

Шайхиев И.Г., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, email: ildars@inbox.ru

#### ***Information about the authors***

Evtushenko E.I., Doctor of Engineering Sciences, Professor, First Vice-Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, email: naukaei@mail.ru

Loktionova E.V., Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, email: kate.sysa@yandex.ru

Sapronova Zh.A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, email: sapronova.2016@yandex.ru

Shaikhiev I.G., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Ecology, Kazan National Research Technological University, email: ildars@inbox.ru