



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 628.316.12

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11866

Сорбционная активность зоокомпоста по отношению к ионам меди Cu(II)

Светлана Васильевна Свергузова¹,
Ильдар Гильманович Шайхиев², Жанна Ануаровна Сапронова¹,
Илья Васильевич Бомба^{1✉}, Светлана Евгеньевна Спесивцева¹

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия,
Ilya.bomba86@gmail.com[✉]

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. В работе исследована возможность использования зоокомпоста – отхода, полученного в процессе производства белка и липидного концентрата из личинок мухи «Черная львинка» (*Hermetia illucens*), для снижения подвижности ионов меди (II) в почвах вследствие сорбции ионов меди (II). Использовался зоокомпост «Гермеция», имеющий высокую воздухопроницаемость, влагоудерживающие свойства и пористую структуру.

Адсорбцию ионов Cu^{2+} исследовали в статических условиях на модельных медьсодержащих растворах, приготовленных путем растворения соли $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в дистиллированной воде. Установлено, что сорбционная емкость зоокомпоста по отношению к ионам Cu^{2+} составляет 1 ммоль/г или 64 мг/г. Эффективность очистки модельного раствора, содержащего ионы Cu^{2+} достигает 95% от начальной концентрации. Математическая обработка изотермы адсорбции в рамках моделей моделей Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ), Темкина, Ленгмюра, Дубинина-Радушкевича и Фрейндлиха показала, что процесс адсорбции наиболее точно описывается моделью Фрейндлиха ($R^2=0.9686$). Значение энергии Гиббса ($\Delta G^\circ=-15.18$ кДж/моль) свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса. Рассчитанная энергия сорбции ($E=15.022$ кДж/моль) указывает на специфический характер адсорбции.

Ключевые слова: зоокомпост, личинки мухи «Черная львинка», ионы меди (II), сорбционная емкость.

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

Для цитирования: Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А., Бомба И.В., Спесивцева С.Е. Сорбционная активность зоокомпоста по отношению к ионам меди Cu(II) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 6. С. 1051-1059. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11866>

Original article

Sorption activity of zoocompost relative to copper ions Cu(II)

Svetlana V. Sverguzova¹, Ildar G. Shaikhiev², Zhanna A. Saponova¹,
Ilya V. Bomba^{1✉}, Svetlana E. Spesivtseva¹

¹Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia, Ilya.bomba86@gmail.com[✉]

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract. The study explored the possibility of using zoocompost, a waste product obtained during the production of protein and lipid concentrate from the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*), to reduce the mobility of copper (II) ions in soils due to the sorption of copper (II) ions. The *Hermetia* zoocompost, which has high air permeability, moisture-retaining properties, and a porous structure was used in the study.

The adsorption of Cu^{2+} ions was studied under static conditions using model copper containing solutions prepared by dissolving $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ salt in distilled water. It has been established that the sorption capacity of

Cu²⁺ ions by zoocompost was 1 mmol/g or 64 mg/g. The efficiency of purification of a model solution containing Cu²⁺ ions reached 95% of the initial concentration. The mathematical processing of the adsorption isotherm within the framework of the Brunauer-Emmett-Teller (BET), Temkin, Langmuir, Dubinin-Radushkevich, and Freundlich models showed that the adsorption process was most accurately described by the Freundlich model ($R^2=0.9686$). The value of Gibbs energy ($\Delta G^{\circ}=-15.18$ kJ/mol) indicated a spontaneous process. The calculated sorption energy ($E=15.022$ kJ/mol) indicated the specific nature of adsorption.

Keywords: zoocompost, black soldier fly larvae, copper (II) ions, sorption capacity.

Acknowledgments: the work was carried out as part of the implementation of the Federal Program for supporting universities Priority 2030 using equipment on the Centre for High Technologies of Shukhov Belgorod State Technological University.

For citation: Svergzuzova S.V., Shaikhiev I.G., Saprionova Zh.A., Bomba I.V., Spesivtseva S.E. Sorption activity of zoocompost relative to copper ions Cu (II). *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(6): 1051-1059. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11866>

Введение

Почвы, как и остальные объекты окружающей среды, повсеместно подвергаются негативному антропогенному воздействию в результате человеческой деятельности. Одними из токсичных веществ, попадающих в окружающую среду в результате деятельности человека, являются соединения меди. Последние широко используются в электро- и радиотехнике, фармацевтике, как средство химзащиты растений; для изготовления запорной арматуры в водоснабжении и водоотведении, при производстве различных металлических сплавов и электрооборудования. В сельском хозяйстве источниками соединений меди являются медьсодержащие удобрения и медьсодержащие фунгициды [1, 2]. Следовательно, существует необходимость в разработке методов снижения опасности поступления ионов меди в растения и далее – в живые организмы. Этого можно добиться внесением в почвы веществ, превращающих ионы тяжелых металлов в малорастворимые соединения типа гидроксидов и основных солей или связывающих их в прочные комплексы, например, хелатные. Возможно также снижение подвижности ионов путем поглощения их различными сорбционными материалами (СМ).

В качестве сорбционных материалов актуально использовать различные производственные и сельскохозяйственные отходы. Авторами [3] проведено исследо-

вание по выявлению потенциальной возможности использования зоокомпоста культивирования личинок мухи *Hermetia illucens* для снижения токсичности почв, загрязненных соединениями тяжелых металлов. Внесение зоокомпоста (5 т/га) в загрязненный почвенный слой позволило ускорить всхожесть растений (на примере горчицы белой - *Sinapis alba*), благодаря снижению эффекта начального торможения развития семян, обеспечить развитие корней, средняя длина которых возросла в 2 раза, обеспечить массу выросших растений, превышающую массу культуры при росте на «чистых» почвах.

Авторы [4] предлагают повысить эффективность сорбционного способа очистки загрязненных почв от тяжелых металлов гуминовыми кислотами из природноокисленных углей в водонерастворимом виде. Технический результат достигается тем, что для детоксикации загрязненных металлами почв использованы гуминовые кислоты, повышенная сорбционная емкость которых обусловлена введением в их состав новых реакционных центров для связывания с ионами металлов в почве в нерастворимые и нетоксичные комплексы.

В данной работе исследовали возможность использования зоокомпоста культивирования личинок мухи «Черная львинка» в качестве сорбента для снижения подвижности ионов Cu²⁺. Культивирование личинок может происходить на различных органических материалах, таких как навоз, остатки овощей и фруктов,



просроченные продукты питания и т.д. [5,6]. В процессе жизнедеятельности личинок мухи образуется зоокопост, который может быть использован в качестве удобрения, а также перспективного сорбционного материала.

Вскармливание личинок мухи *Hermetia illucens*, при котором используют различные сельскохозяйственные отходы, является одной из перспективных и актуальных проблем в агропромышленной сфере. В процессе питания органическим субстратом личинки мухи *Hermetia illucens* измельчают его на близкие по размеру частицы от 1 до 3 мм. Высокая дисперсность частиц, их шероховатость и пористость, а также большое содержание в них гуминовых веществ (с множеством функциональных групп) являются предпосылкой высоких сорбционных свойств зоокопоста [7,8].

Цель работы – исследование сорбционных свойств зоокопоста по отношению к ионам Cu^{2+} в водных растворах.

Экспериментальная часть

В работе использовался зоокопост «Гермеция» предприятия промышленного производства белка и липидного концентрата из личинок мухи «Черная львинка», который: имеет пористую текстуру, благодаря чему обеспечивает хорошую воздухопроницаемость и влагоудерживающие свойства; имеет темно-коричневый цвет, что связано с высоким содержанием органического вещества и минеральных элементов [8]; обладает относительно малой плотностью, что облегчает возможность его использования с целью ремедиации почвы.

Модельные растворы, содержащие ионы Cu^{2+} с концентрацией от 10 до 50 мг/дм³ готовили путем растворения реактива $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а.) в дистиллированной воде. Зоокопост высушивался до постоянной массы при 105°C в сушильном шкафу марки «ТРМ-1».

Адсорбция ионов Cu^{2+} зоокопостом проводилась статическим способом при

20°C и времени сорбционного взаимодействия 24 часа. Во всех случаях объем раствора, взятого для исследований, составлял 100 см³, с добавлением расчетного количества зоокопоста. По истечении заданного времени контактирования, содержимое колб отфильтровывалось через бумажный фильтр.

Остаточную концентрацию ионов меди Cu^{2+} в фильтрате определяли фотоколориметрическим методом при длине волны $\lambda=550$ нм согласно [9] на фотоколориметре КФК-01-3. По значениям концентраций ионов меди Cu^{2+} в растворах до и после процессов адсорбции рассчитывали сорбционную емкость зоокопоста (А) по формуле (1):

$$A = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}) \cdot 100}{M \cdot 1000}, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация ионов меди Cu^{2+} , мг/дм³; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация ионов меди Cu^{2+} , мг/дм³; М – масса сорбционного материала, добавляемого к раствору, г; 1000 – переход от см³ к дм³.

По полученным значениям строилась изотерма адсорбции, которая обрабатывалась в рамках моделей Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ), Темкина, Ленгмюра, Теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ), Дубинина-Радушкевича и Фрейндлиха.

Для определения влияния дозы навески зоокопоста на эффективность поглощения ионов меди Cu^{2+} в плоскодонные колбы вместимостью 250 см³ вносили исходный модельный раствор объемом 100 см³, далее добавляли навески зоокопоста массой от 0.5 до 3 грамм. Полученные суспензии перемешивали в течение 20 минут на лабораторном шейкере ЛАБ-ПУ-02, после чего зоокопост отделяли фильтрованием через бумажный фильтр и определяли остаточное содержание ионов меди Cu^{2+} (мг/дм³) согласно [9].

С целью изучения влияния длительности перемешивания на эффективность

очистки в реакционные колбы вместимостью 250 см³ вносили по 100 см³ модельного раствора, содержащего ионы меди Cu²⁺ и навески зоокомпоста массой 1, 2 и 3 г. Остаточное содержание ионов Cu²⁺ определяли через 5, 10, 15 и 20 минут после начала эксперимента.

Для исследования влияния размера частиц зоокомпоста на эффективность очистки от ионов меди в растворе, исходный материал разделили на фракции разного размера методом ситового анализа. Затем проводилась серия экспериментов аналогично описанной выше методике.

Обсуждение результатов

С увеличением дозы зоокомпоста снижается концентрация ионов меди Cu²⁺ в растворе (рис. 1). Минимальная концентрация ионов Cu²⁺ в растворе составляет 1.9 мг/дм³ и достигается при дозе сорбционного материала в 3 г/дм³.

В первые 10 минут после начала эксперимента (рис. 2) концентрация ионов Cu²⁺ в растворе снижается с 40 до 5.4 мг/дм³ (при добавке 3 г/дм³). Уменьшение концентрации меди при массе добавки 3 г/дм³ в промежутке времени от 10 до 20 минут достигает 2 мг/дм³. Т.е. при добавлении зоокомпоста в количестве 3 г/дм³ и времени взаимодействия 20 минут эффективность очистки модельного раствора, содержащего ионы Cu²⁺ достигает 95% от начальной концентрации.

С уменьшением размера частиц зоокомпоста эффективность очистки модельных растворов от ионов меди Cu²⁺ возрастает (рис. 3). Так, при использовании частиц размерами от 1.4 до 2 мм эффективность составляет 72.3%, для частиц от 0.315 до 0.63 мм эффективность составляет 90.5%, что выше на 18.2%.

Изотермы адсорбции имеют значение при описании взаимодействия адсорбата с адсорбентом, при этом важна емкость адсорбента. Из изотермы адсорбции ионов Cu²⁺ зоокомпостом (рис. 4) сле-

дует, что сорбционная емкость зоокомпоста по отношению к ионам Cu²⁺ составляет 1 ммоль/г или 64 мг/г.

Процесс адсорбции может быть описан с помощью различных моделей сорбции. С этой целью изотерма адсорбции обработана с применением двухпараметрических моделей БЭТ, Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича, Темкина с помощью программного комплекса Microsoft Excel [8].

В линейном виде уравнение Ленгмюра имеет вид:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{max}} + \frac{1}{K_L \times A_{max} \times C_p},$$

где A – сорбционная емкость, ммоль/г; A_{max} – предельное количество сорбированного вещества (емкость монослоя), ммоль/г; K_L – константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность сорбции, дм³/ммоль; C_p – равновесная концентрация сорбата, ммоль/дм³.

Для эффективных сорбентов характерны высокие A_{max} и низкие K_L . Изотерма, рассчитанная по уравнению Ленгмюра, представлена на рис. 5.

Сродство между адсорбатом и адсорбентом оценивалось с использованием параметра уравнения Ленгмюра K_L по величине безразмерного коэффициента R_L :
$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \times C_n} = \frac{1}{1 + 633,94436 \times 0,734} = 0,00215,$$
 где C_n – начальная концентрация адсорбата, ммоль/дм³.

В зависимости от коэффициента R_L можно оценить процесс адсорбции следующим образом: если $R_L=1$, то наблюдается линейная зависимость, при значениях $0 < R_L < 1$ условия для сорбции благоприятны, а при $R_L=0$ процесс сорбции считается необратимым. В данном случае $R_L=0.00215$, что указывает на благоприятные условия для сорбции и практически необратимый процесс. Также рассчитывали энергию Гиббса ΔG по следующей формуле:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_L,$$

где ΔG^0 – энергия Гиббса, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная (8.314

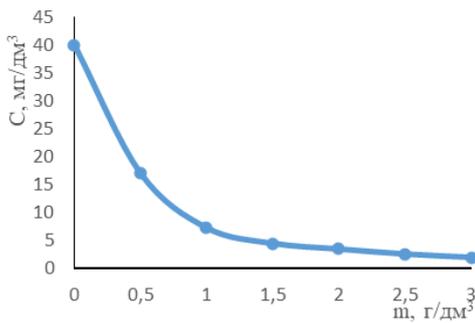


Рис. 1. Зависимость концентрации ионов Cu^{2+} в растворе от дозы зоокомпоста

Fig. 1. Dependence of concentration of Cu^{2+} ions in solution depending on the dose of zoocompost

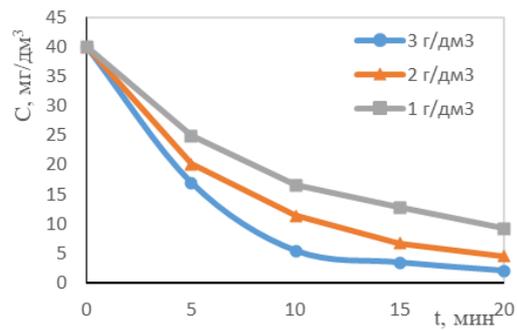


Рис. 2. Зависимость концентрации ионов Cu^{2+} в растворе от времени взаимодействия при добавлении разных дозе зоокомпоста
 Fig. 2. Dependence of concentration of Cu^{2+} ions in solution depending on the time of interaction when adding different doses of zoocompost

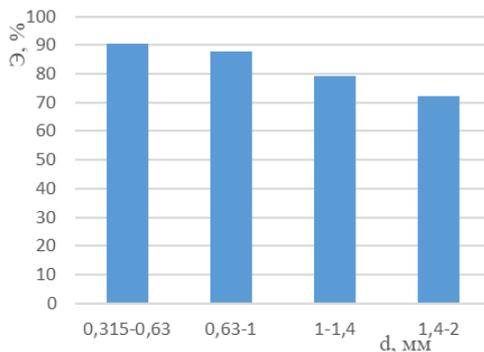


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки ионов Cu^{2+} в растворе от фракционного состава зоокомпоста

Fig. 3. Dependence of the efficiency of purification of Cu^{2+} ions in solution depending on the fractional composition of zoocompost

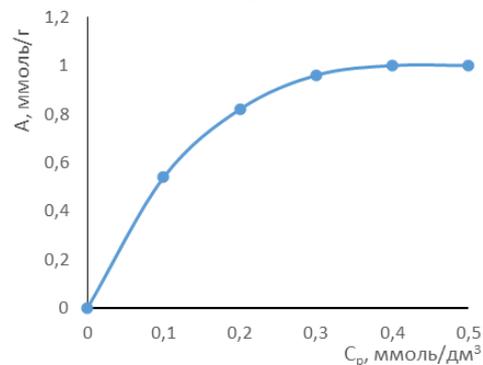


Рис. 4. Изотерма адсорбции ионов Cu^{2+} зоокомпостом

Fig. 4. Cu^{2+} ion adsorption isotherm by zoocompost

Дж/(моль·К)); T – абсолютная температура, К; K_L – константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность сорбции, $\text{дм}^3/\text{ммоль}$.

Установлено, что $\Delta G^0 = -15.18$ кДж/моль, что свидетельствует о самопроизвольном протекании процесса.

Модель Фрейндлиха действительна для многослойной адсорбции на неоднородной поверхности без равномерного распределения теплоты адсорбции. И может быть выражена уравнением $\lg A = \lg K_F + 1/n \lg C_p$, где n и K_F связаны с интенсивностью адсорбции и сорбционной емкостью, соответственно.

При условии $n < 1$, энергия связи сорбент-сорбат возрастает, при $n > 1$ энергия связей уменьшается по мере заполнения поверхности, в случае $n = 1$ все сорбционные центры эквивалентны.

Изотерма, обработанная в соответствии с уравнением Фрейндлиха, представлена на рис. 6.

Параметр $n = 4.7526$, что свидетельствует об ослабевании энергии связи «сорбент-сорбат» по мере заполнения поверхности. Значение параметра n свидетельствует о благоприятных условиях процесса сорбции.

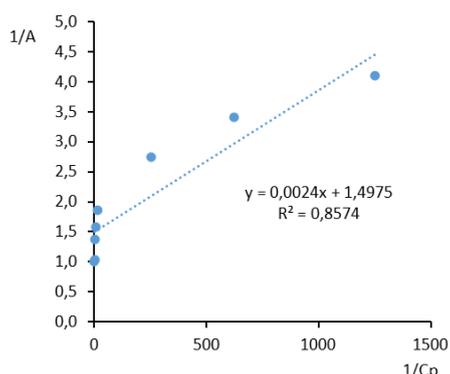


Рис. 5. Зависимость $1/A = 1/A = f(1/C_p)$.
 Fig. 5. Dependence $1/A = 1/A = f(1/C_s)$.

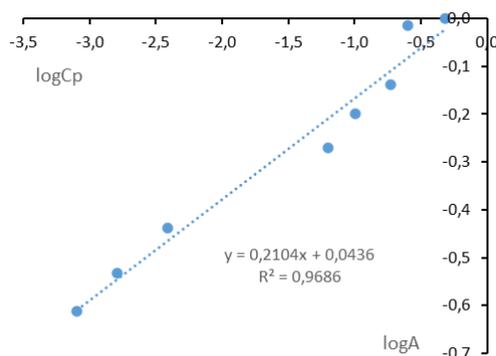


Рис. 6. Зависимость $\log A = \log K_F + 1/n \log C_p$.
 Fig. 6. Dependency $\log A = \log K_F + 1/n \log C_s$.

Таблица 1. Константы уравнения Ленгмюра
 Table 1. Langmuir equation constants

$1/A = 1/A_\infty + 1/(K_L A_\infty C_p)$	
$y = 1.4975 + 0.0024x$	
$1/A_\infty = 1.49749$	$1/(K_L A_\infty) = 0.00236$
$A_\infty = 0.66779$	$K_L = 633.94436$

Таблица 2. Константы уравнения Фрейндлиха
 Table 2. Constants of the Freundlich equation

$\log A = \log K_F + 1/n \log C_p$	
$y = 0.0436 + 0.2104x$	
$\log K_F = 0.04362$	$1/n = 0.21041$
$K_F = 1.10566$	$n = 4.75258$

Изотерма Дубинина-Радушкевича разработана для описания процессов сорбции на твердых пористых адсорбентах и широко используется для определения типа процесса адсорбции, физического или химического:

$$\ln A = \ln A_\infty \times \exp\left(-\frac{RT}{E} \times \frac{C_H}{C_p}\right)^2$$

и линеаризуется по формуле:

$$\ln A = \ln A_\infty - \left(\frac{RT}{E}\right)^2 \times \left(\ln \frac{C_H}{C_p}\right)^2$$

Одним из способов определения сил взаимодействия между сорбатом и активными центрами поверхности сорбента является численное значение энергии сорбции (E). При $E < 8$ кДж/моль обычно происходит физическая адсорбция, а при E более 40 кДж/моль – хемосорбция, при $8 < E < 40$ кДж/моль энергию относят к специфической. Физическая адсорбция происходит благодаря слабым взаимодействиям между сорбатом и поверхностью

сорбента, таким как ван-дер-ваальсовы силы или диполь-дипольные взаимодействия. Хемосорбция происходит благодаря более сильным химическим взаимодействиям, таким как обмен ионами или образование ковалентных связей. Поэтому, зная значение энергии сорбции, можно предположить, какие типы взаимодействий происходят между сорбатом и сорбентом. Изотерма, обработанная по модели Дубинина-Радушкевича представлена на рис.7.

Как видно из приведенных расчетов, значения энергии сорбции E составляет 15.022 кДж/моль, что свидетельствует о протекании специфической адсорбции. Изотерма, обработанная в рамках модели БЭТ изображена на рис. 8.

Изотерма БЭТ описывает зависимость количества адсорбированного вещества на поверхности твердого материала от концентрации вещества в растворе при постоянной температуре. При низких

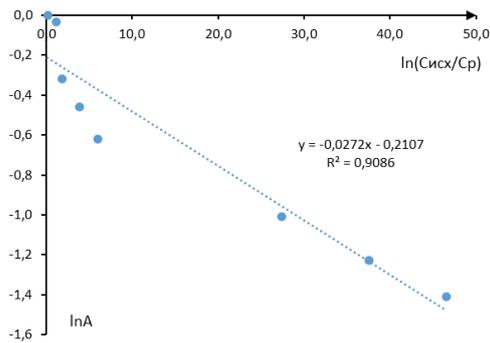


Рис. 7. Зависимость $\ln A = \ln A_\infty - (R \cdot T/E)^2 \cdot (\ln(C_{исх}/C_p))^2$
 Fig. 7. Dependence $\ln A = \ln A_\infty - (RT/E)^2 \cdot (\ln(C_{ref}/C_s))^2$

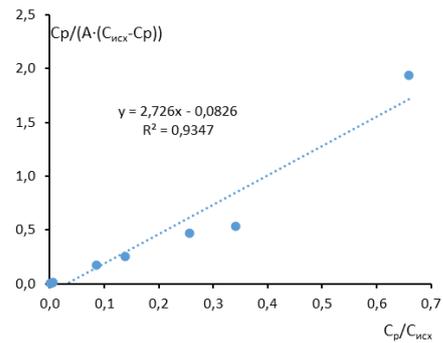


Рис.8. Зависимость $C_{исх}/(A \cdot (C_{исх} - C_p))$
 Fig.8. Dependence $C_{ref}/(A \cdot (C_{ref} - C_s))$

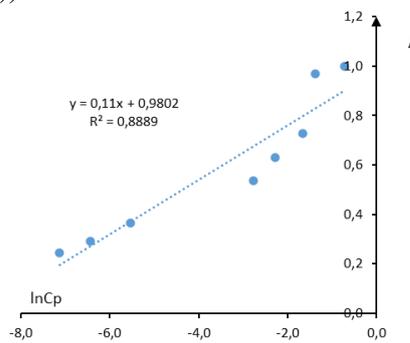


Рис. 9. Зависимость $A = f(\ln C_p)$
 Fig. 9. Dependence $A = f(\ln C_s)$

Таблица 3. Константы уравнения Дубинина-Радушкевича
 Table 3. Constants of the Dubinin-Radushkevich equation

$\ln A = \ln A_\infty - (RT/E)^2 \cdot (\ln(C_{исх}/C_p))^2$	
$y = -0.2107 - 0.0272x$	
$\ln A_\infty = -0.21074$	$(RT/E)^2 = 0.02720$
$A_\infty = 0.80998$	$E = 15022.07256$

Таблица 4. Константы уравнения БЭТ
 Table 4. Constants of the BET equation

$C_{исх}/(A \cdot (C_{исх} - C_p)) = 1/(A_\infty \cdot K_{БЭТ}) + (K_{БЭТ} - 1)/(A_\infty \cdot K_{БЭТ}) \cdot (C_p/C_{исх})$			
$y = -0.0826 + 2.726x$			
$1/(A_\infty \cdot K_{БЭТ})$	-0.08262313	$(K_{БЭТ} - 1)/(A_\infty \cdot K_{БЭТ})$	2.7260
$(A_\infty \cdot K_{БЭТ})$	-12.103148	$K_{БЭТ} - 1$	-32.9926
$A_\infty =$	0.378310894	$K_{БЭТ}$	-31.9926

Таблица 5. Константы уравнения Темкина
 Table 5. Constants of the Temkin equation

$A = (RT)/b_{ТЕ} \cdot \ln a_{ТЕ} + (RT)/b_{ТЕ} \cdot \ln C_p$			
$y = 0.9802 + 0.11x$			
$(R \cdot T)/b_{ТЕ} \cdot \ln a_{ТЕ}$	0.980233923	$(RT)/b_{ТЕ}$	0.1100286
$\ln a_{ТЕ}$	8.908901177	$b_{ТЕ}$	22518.78023
$a_{ТЕ}$	7397.528058		

концентрациях адсорбата изотерма имеет линейный участок, называемый участком

только на поверхности твердого материала. При дальнейшем увеличении кон-

монослоя, где адсорбат поглощается

центрации адсорбата на поверхности образуется многослойное покрытие, и изотерма становится более плавной.

Изотерма Темкина (рис. 9) описывает процесс мономолекулярной адсорбции на неоднородной поверхности адсорбента, в линейном виде уравнение имеет вид:

$$A = \frac{RT}{b_{TE}} \times \ln a_{TE} + \frac{RT}{b_{TE}} \times \ln C_p$$

где b_{TE} – константа, характеризующая теплоту адсорбции; a_{TE} – константа связывания при равновесии, соответствующая максимальной энергии связывания.

Модель Темкина предполагает, что теплота адсорбции всех молекул в слое снижается линейно, по мере заполнения слоя. Полученные значения параметров уравнения Темкина позволяет расценивать поверхность зоокомпоста как равномерно-неоднородную. Адсорбция ионов Cu^{2+} зоокомпостом может быть многослойной или с присутствием химической реакцией на поверхности сорбента.

Заключение

Изучена возможность адсорбции ионов Cu^{2+} зоокомпостом, образующимся после культивирования личинок

Список литературы/References

1. Borisov P.O. Vliyaniye tyazhelykh metallov na organizm cheloveka. *Vestnik nauki*. 2019; 12 (21): 6-8. (In Russ.)
2. Efremova S.YU. Priemy detoksikatsii himicheskii zagryaznennykh pochv. *Izvestiya PGU im. V.G. Belinskogo*. 2012; 29; 379-382. (In Russ.)
3. Vasilenko M., Goncharova E., Serykh E. Vliyaniye zookomposta v sostave zagryaznennykh soedineniyami medi pochv na razvitie fitotsenoza. *Annali d'Italia*. 2021; 19-1: 10-13. (In Russ.)
4. Patent № 2233293 C1. 27.07.2004 ZHakina A.H., Akkulova Z.G., Amirhanova A.K., Utegenova A.S. Sposob ochistki zagryaznennykh pochv ot tyazhelykh metallov. Patent Kazahstana 16.07.2012. Byul. № 7. (In Russ.)

мухи *Hermetia illucens*. Построена изотерма адсорбции ионов меди зоокомпостом и описана в рамках двухпараметровых моделей адсорбции. Установлено, что сорбционная емкость зоокомпоста по отношению к ионам Cu^{2+} составляет 64 мг/г. Определено, что изотерму адсорбции ионов меди Cu^{2+} зоокомпостом наиболее точно описывает модель Фрейндлиха ($R=0.9686$). Энергия сорбции ($E=15.022$ кДж/моль) указывает на специфический характер адсорбции. На основании значений термодинамических параметров, установлена специфическое взаимодействие между ионами Cu^{2+} и функциональными группировками гуминовых кислот, входящих в состав зоокомпоста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

5. Ipepa A.F., Bokkers E.A.M., Gerrits W.J.J. Providing live black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) improves welfare while maintaining performance of piglets post weaning. *Scientific Reports*. 2021; 11: 7371.
6. Shaikhiev I.G., Saponova Zh.A., Sverguzova S.V. Use of fly larvae *Hermetia illucens* in feed diet for growing piglets and adult pigs. *Sciences of Europe*. 2020; 2(59): 12-19.
7. El-Hack M.E.A., Shafi M.E., Alghamdi W.Y. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) meal as a promising feed ingredient for poultry: A comprehensive review. *Agriculture*. 2020; 10: Article 339.
8. Cullere M., Woods M.J., Emmenes L. van *Hermetia illucens* larvae reared on different substrates in broiler quail diets: effect on physicochemical and sensory quality of the quail meat. *Animals*. 2019; 9: Article 525.



9. GOST 4388-72 «Voda pit'evaya. Metody opredeleniya massovoj koncentracii medi». (In Russ.)

10. Galimova R.Z., SHajhiev G., Sverguzova S.V. Obrabotka rezul'tatov issledovaniya processov adsorbicii s ispol'zovaniem programmnoho obespecheniya Microsoft excel. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2017. 60 p. (In Russ.)

11. Pendyurin E.A., Rybina S.YU., Smolenskaya L.M. Ispol'zovanie zookomposta Chernoj l'vinki v kachestve organicheskogo udobreniya. *Agrarnaya nauka*. 2020; 7-8: 106-110. (In Russ.)

12. Setti L., Francia E., Pulvirenti A. Use of black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media. *Waste Management*. 2019; 95: 278-288.

13. European Commission. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. In Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; European Commission: Brussels, Belgium, 2020; 20.5.2020 COM (2020) 381.

Информация об авторах / Information about the authors

С.В. Свергузова – д-р техн. наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухов», Белгород, Россия

И.Г. Шайхиев – д.т.н., заведующий кафедрой инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Ж.А. Сапронова – д.т.н., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

И.В. Бомба – ассистент кафедры Промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

С.Е. Спесивцева – канд. пед. наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

S.V. Sverguzova – Belgorod state technological university after named V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

I.G. Shaikhiev – Kazan national research technological university, Kazan, Russia

Zh.A. Sapronova – Belgorod state technological university after named V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, E-mail: sapronova.2016@yandex.ru

I.V. Bomb – Belgorod state technological university after named V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, E-mail: ilya.bomba86@gmail.com

S.E. Spesivtseva – Belgorod state technological university after named V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, E-mail: spesivceva.se@bstu.ru

Статья поступила в редакцию 02.05.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 18.10.2023.

The article was submitted 02.05.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 18.10.2023.