

Научная статья  
УДК 658.567.1  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.018

## СОРБИЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТХОДОВ ТРОСТНИКА С ИОНАМИ МЕДИ

**Диана Вячеславовна Мытько<sup>1</sup>, Людмила Анатольевна Шибек<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь*

<sup>1</sup>*dianamytko1@gmail.com*

<sup>2</sup>*Shibekal@mail.ru*

### Аннотация

Приведены физико-химические свойства и химический состав отходов тростника. Представлены спектры инфракрасного поглощения исследуемых образцов до и после взаимодействия с ионами меди, которые подтверждают растительное происхождение отходов и присутствие в их составе целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Результаты исследований показали, что во взаимодействии сорбентов с ионами меди принимают участие гидроксильные, карбоксильные и метиленовые группы. Приведены результаты изучения процесса извлечения ионов меди из раствора с помощью целлюлозосодержащего сорбента (отходов тростника). Установлено, что процесс сорбции ионов меди из водной среды сорбентами на основе отходов тростника описывается с помощью уравнения адсорбции Фрейндлиха.

### Ключевые слова:

сорбционная емкость, отход, сорбент, тростник, медь, ИК-спектроскопия, целлюлоза, тяжелый металл

### Для цитирования:

Мытько Д. В., Шибек Л. А. Сорбционное взаимодействие отходов тростника с ионами меди // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 99–104. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.018.

Original article

## SORPTION INTERACTION OF REED WASTE WITH COPPER IONS

**Dziyana V. Mytsko<sup>1</sup>, Ludmila A. Shibeka<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>1</sup>*dianamytko1@gmail.com*

<sup>2</sup>*Shibekal@mail.ru*

### Abstract

The physicochemical properties and chemical composition of reed waste are presented. The infrared absorption spectra of the studied samples before and after interaction with copper ions are presented, which confirm the plant origin of the waste and the presence of cellulose, hemicellulose and lignin in their composition. The results of the studies showed that hydroxyl, carboxyl and methylene groups participate in the interaction of sorbents with copper ions. The results of studying the process of extracting copper ions from a solution using a cellulose-containing sorbent (reed waste) are presented. It was found that the process of sorption of copper ions from an aqueous medium by sorbents based on reed waste is described using the Freundlich adsorption equation.

### Keywords:

sorption capacity, waste, sorbent, reed, copper, IR spectroscopy, cellulose, heavy metal

### For citation:

Mytsko D. V., Shibeka L. A. Sorption interaction of reed waste with copper ions // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 99–104. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.018.

## Введение

В связи с продолжающимся загрязнением водоемов и ужесточением санитарных требований, предъявляемых к качеству воды в них, проблема очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов сейчас является одной из наиболее важных. В настоящее время используются различные методы очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов: механический, биологический, физико-химический, химический. Некоторые из них являются дорогостоящими, экологически не безопасными, сложными в исполнении или требующими дорогих реагентов [1].

Среди физико-химических методов наиболее перспективными являются адсорбционные методы, которые позволяют добиться высокой эффективности очистки при правильном выборе сорбентов. Актуальной задачей является разработка дешевых сорбентов из возобновляемых природных материалов. В последние годы появилось большое количество работ, посвященных использованию в качестве сорбентов на основе целлюлозосодержащих отходов производства. В качестве сорбционного материала находят применение древесные опилки, пыль зерновая, отходы тростника, лузга подсолнечника и др. [2]. Данные отходы образуются в Республике Беларусь в большом количестве на пищевых и деревообрабатывающих предприятиях, в сельском хозяйстве и на предприятиях по производству строительных материалов на основе целлюлозосодержащего сырья. Сорбенты на основе растительного сырья содержат в своем составе целлюлозу и ее производные, благодаря чему отходы проявляют катионообменные свойства и обладают высокоразвитой поверхностью при взаимодействии с водой [3–5].

Целью работы является изучение сорбционных свойств отходов тростника в отношении ионов меди, содержащихся в воде.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований в работе выступали отходы тростника, образующиеся на одном из предприятий Республики Беларусь по производству строительных материалов. Указанные отходы, в соответствии с классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь, относятся к разделу 6 «Отходы растительных волокон», группе 1 «Отходы переработки растительных волокон» (код отхода — 1619919, наименование отхода — «Прочие отходы переработки растительных волокон, не вошедшие в группу 1», класс опасности — не установлен) [6]. Отходы тростника подвергались измельчению до размера частиц не более 10 мм (с преобладанием фракции с размером частиц менее 0,25 мм — 75 %).

Для характеристики физико-химических свойств отходов тростника в работе проведены исследования по определению влажности и зольности исследуемого образца с помощью гравиметрического метода. Данный отход подвергали сушке при температуре 105 °С и прокаливанию при 600 °С [7].

Исследование сорбционной емкости отхода проводили в статических условиях на модельных сточных водах, содержащих ионы меди. Навеску отходов тростника массой 0,2 г помещали в химический стакан, в который приливали определенный объем раствора, содержащего ионы металла. Содержание сорбента в пробе составляло 4 г/дм<sup>3</sup>. В течение 60 мин смесь подвергалась перемешиванию с последующим фильтрованием. Концентрацию ионов меди в фильтрате определяли титриметрическим методом [8]. Полученные данные использовали при расчете сорбционной емкости исследуемого образца по формуле:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где  $A$  — величина адсорбции, моль/г;  $C_0$  — начальная концентрация ионов цинка в растворе, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_p$  — равновесная концентрация ионов цинка в растворе, моль/дм<sup>3</sup>;  $V$  — объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $m$  — масса навески сорбента, г.

Определение химического состава отходов тростника до и после проведения процесса сорбционной очистки сточных вод от ионов меди проводили с помощью метода ИК-спектроскопии. Анализ образцов проводили на ИК-Фурье микроскопе Nicolet in 10 в диапазоне волнового числа 4000–400 см<sup>-1</sup>. Подготовка образцов осуществлялась путем прессования смеси образца отхода и КВг в соотношении 1:50 в пресс-форме. Регистрация ИК-спектров проводилась при 32-х кратном сканировании разрешении 4 см<sup>-1</sup> [9].

### Результаты исследований

На основании проведенных исследований установлено, что влажность отхода составляет 3,15 %, что соответствует литературным данным для целлюлозосодержащих материалов, находящихся в условиях естественной влажности. Зольность отхода составила 12,79 %, что указывает

на содержание органических и минеральных веществ, способных разлагаться при температуре 600 °С. Это подтверждают литературные данные [10].

Полученные результаты исследования состава отходов тростника подтвердились с помощью ИК-спектроскопии. Установлено, что на ИК-спектре исследуемого образца отходов тростника наблюдается полоса поглощения в диапазоне 3550–3100 см<sup>-1</sup>, указывающая на присутствие в составе исследуемых материалов гидроксильных групп О–Н, участвующих в образовании меж- и внутримолекулярных водородных связей (полоса 3421 см<sup>-1</sup>). Симметричные валентные колебания метиленовых групп в составе образцов отходов тростника характерны для полосы поглощения, наблюдаемой в диапазоне волнового числа 3000–2800 см<sup>-1</sup> (полоса 2918 см<sup>-1</sup>).

Основные полосы поглощения фиксируются при волновых числах от 2000 см<sup>-1</sup> до 600 см<sup>-1</sup>, поэтому в работе представлен фрагмент ИК-спектра для исходного образца отходов тростника (рис. 1).

Установлено, что в диапазоне волнового числа 2250–2090 см<sup>-1</sup> наблюдается полоса поглощения (полоса 2196 см<sup>-1</sup>), которая указывает на наличие функциональных групп кремнийорганических соединений. На наличие симметричных валентных колебаний ангидридов карбоновых кислот (С=О) указывает полоса поглощения 1849 см<sup>-1</sup>.

В составе отходов тростника присутствует полоса поглощения (полоса 1736 см<sup>-1</sup>), указывающая на валентные колебания связи С=О карбоксильных групп, что свидетельствует о присутствии гемицеллюлозы. На наличие лигнина в составе исследуемого образца сорбционного материала указывает совокупность полос поглощения (1602, 1510, 1461 см<sup>-1</sup>). Валентные колебания метиленовых групп в составе образцов отходов тростника наблюдаются при полосе поглощения 1426 см<sup>-1</sup>. На наличие деформационных колебаний С–Н связи указывают полосы при 1376 см<sup>-1</sup> и 1261 см<sup>-1</sup>. Деформационные веерные колебания связи СН<sub>2</sub> наблюдаются при полосе поглощения 1327 см<sup>-1</sup>. О наличии асимметричных валентных колебаний моста С–О–С свидетельствует полоса 1169 см<sup>-1</sup>. Валентные колебания С–О связи вторичной спиртовой группы С<sub>2</sub>Н–ОН и глюкопиранозного кольца отражает полоса поглощения 1128 см<sup>-1</sup>. Полоса поглощения при волновом числе 1011 см<sup>-1</sup> указывает на наличие валентных колебаний С–О-связи в первичной спиртовой группе. Полосы 898 и 870 см<sup>-1</sup> свидетельствуют о присутствии колебаний в спектрах β-гликозидных структур отхода.

Для оценки изменений в структуре отхода, имеющих место после сорбции ионов металла, в работе получены ИК-спектры отработанного сорбционного материала. В этом случае основные полосы поглощения также фиксируются в диапазоне волнового числа от 2000 см<sup>-1</sup> до 600 см<sup>-1</sup> (рис. 2).

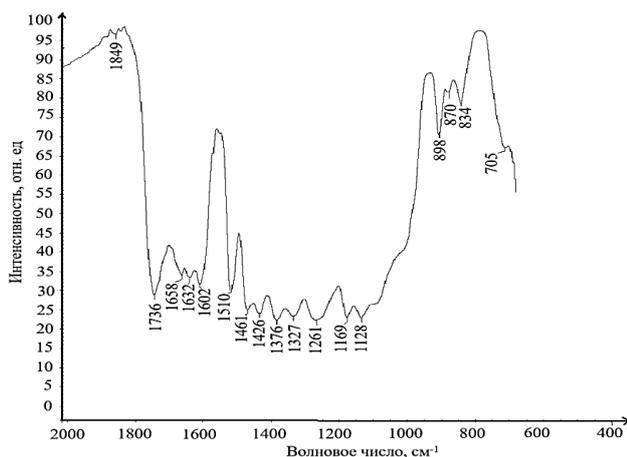


Рис. 1. Фрагмент спектров инфракрасного поглощения отходов тростника

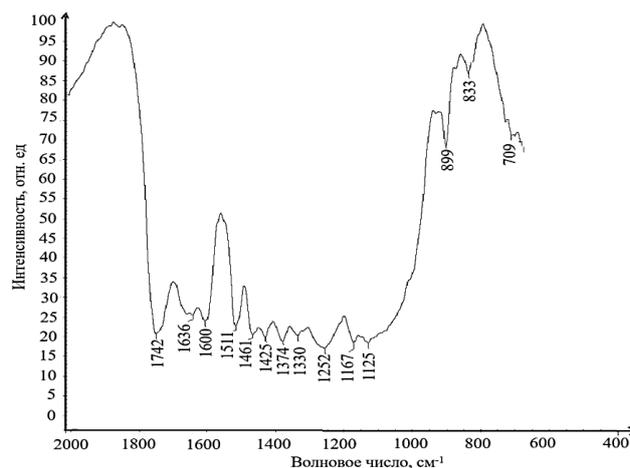


Рис. 2. Фрагмент спектров инфракрасного поглощения отходов тростника после взаимодействия с ионами меди

Установлено, что после взаимодействия отходов тростника с ионами меди наблюдается смещение полос поглощения на ИК-спектре в области валентных колебаний, характерных для гидроксильных групп, кремнийорганических соединений и ангидридов карбоновых кислот, глюкопиранозного кольца, в связях C=O в сложноэфирной группе гемицеллюлозы, C=C, C–N (функциональные группы лигнина), C–O вторичной спиртовой группы. При этом в структуре отработанного сорбента исчезает полоса поглощения, указывающая на наличие валентных колебаний ангидридов карбоновых кислот (C=O) в области волнового числа  $1849\text{ см}^{-1}$  и появляется полоса ( $2340\text{ см}^{-1}$ ), которая указывает на наличие колебаний аминогрупп ( $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{NH}_2^+$ ,  $\text{NH}^+$ ). Следовательно, во взаимодействии сорбента с ионами тяжелых металлов принимают участие гидроксильные, карбоксильные и метиленовые группы отходов тростника.

Для определения особенностей взаимодействия между сорбционным материалом и извлекаемым ионом металла, в работе получена изотерма сорбции, отражающая изменение сорбционной емкости сорбента ( $A$ , моль/г) от равновесной концентрации меди в воде ( $C_p$ , моль/дм<sup>3</sup>) (рис. 3).

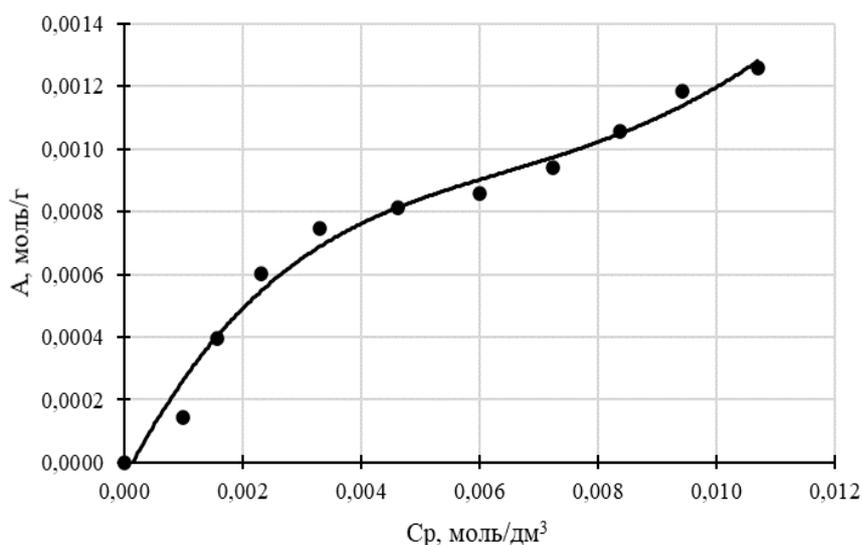


Рис. 3. Изотерма сорбции ионов меди на отходах тростника

Установлено, что при низких концентрациях ионов меди ( $0\text{--}0,0014\text{ моль/дм}^3$ ) сорбционная емкость стремительно увеличивается, что объясняет высокую эффективность сорбента на начальной стадии процесса очистки сточных вод. При дальнейшем увеличении равновесной концентрации ( $0,002\text{--}0,012\text{ моль/дм}^3$ ) рост сорбционной емкости замедляется, что может быть связано с насыщением активных центров на поверхности сорбента. Анализ полученных результатов позволил установить, что для описания экспериментальных результатов наилучшим образом подходит модель Фрейндлиха. Указанная модель используется для описания адсорбции на гетерогенной поверхности сорбента, а адсорбционные центры на поверхности сорбционного материала обладают различными величинами энергии [11]. Коэффициент корреляции полученной зависимости сорбционной модели  $R^2$  равен  $0,873$ , параметр  $n$ , указывающий на интенсивность взаимодействия адсорбент – адсорбат, —  $1,328$ , константа равновесия уравнения Фрейндлиха  $K_F$  —  $0,045$ .

## Выводы

Установлено, что отходы тростника могут рассматриваться в качестве сорбционных материалов и найти применение в практике очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Результаты исследований структуры исходного и отработанного сорбента с помощью

метода ИК-спектроскопии показали, что во взаимодействии сорбционного материала с ионами меди принимают участие гидроксильные, карбоксильные и метиленовые группы. Полученная изотерма сорбции наиболее близко описывается уравнением Фрейндлиха.

#### Список источников

1. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики): учебник / А. И. Родионов [и др.]. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. 800 с.
2. Кислицына С. Н. Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности: учеб. пособ. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
3. Закон Республики Беларусь Об обращении с отходами, 20 июня 2007 г., № 271-З; в ред. от 29 дек. 2023 г. № 333-З [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271> (дата обращения: 19.05.2025).
4. Сорбционные свойства и природа взаимодействия целлюлозосодержащих полимеров с ионами металлов / Т. Е. Никифорова [и др.] // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 5–14.
5. Сольватационно-координационный механизм сорбции ионов тяжелых металлов целлюлозосодержащим сорбентом из водных сред / Т. Е. Никифорова [и др.] // Химия растительного сырья. 2010. № 4. С. 23–30.
6. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь: Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p&p1=1> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Жарская Т. А., Лихачева А. В. Мониторинг окружающей среды. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособ. Минск: БГТУ, 2006. 214 с.
8. Лихачева А. В., Шибека Л. А. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособ. Минск: БГТУ, 2011. 204 с.
9. Практикум по колебательной спектроскопии: учебное пособ. / В.Е. Ситникова [и др.]. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 173 с.
10. Функциональное использование биомассы тростника зимней заготовки в регионах Нижнего Поволжья / Н. А. Соколова [и др.] // Проблемы региональной экологии. 2020. № 5. С. 25–30.
11. Зеленцов В. И., Дацко Т. Я. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия – фтор // Электронная обработка материалов. 2012. № 48(6). С. 65–73.

#### References

1. Rodionov A. I., Klushin V. N., Sister V. G. *Tehnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti (Osnovy envayronmentalistiki)* [Technological processes of environmental safety (Fundamentals of environmental studies)]. Kaluga, Publishing house of N. Bochkareva, 2000, 800 p.
2. Kislitsyna S. N. *Sposobyi pererabotki othodov derevoobrabatyvayushey promyshlennosti* [Methods of processing waste of the woodworking industry]. Penza, PSUAS, 2016, 140 p.
3. *Zakon Respubliki Belarus` Ob obrashhenii s otxodami, 20 iyunya 2007 g., No. 271-Z* [On waste management: Law of the Republic of Belarus, June 20, 2007, No. 271-Z]. (In Russ). Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271> (date of access: 05/19/2025).
4. Nikiforova T. E., Bagrovskaya N. A., Kozlov V. A., Liliin S. A. Sorbcionnye svoystva i priroda vzaimodeystviya cellyulozosoderzhashih polimerov s ionami metallov [Sorptions properties and nature of interaction of cellulose-containing polymers with metal ions]. *Himiya rastitel'nogo syrya* [Chemistry of plant raw materials], 2009, No. 1, pp. 5–14. (In Russ).
5. Nikiforova T. E., Kozlov V. A., Modina E. A. Solvatsionno-koordinatsionnyj mehanizm sorbcii ionov tyazhelyh metallov cellyulozosoderzhashim sorbentom iz vodnyh sred [Solvation-coordination mechanism of sorption of heavy metal ions by a cellulose-containing sorbent from aqueous media]. *Himiya rastitel'nogo syrya* [Chemistry of plant raw materials], 2010, No. 4, pp. 23–30. (In Russ).
6. *Ob utverzhenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus': postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', 9 sent. 2019 g., No. 3-T* [On Approval, Enactment of the National Classifier of the Republic of Belarus: Decision of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 9 September. 2019, No. 3-T.]. (In Russ.). Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p&p1=1> (accessed 20.05.2025).
7. Zharskaya T. A., Likhacheva A. V. *Monitoring okruzhayushchej sredy* [Environmental monitoring]. Minsk, BSTU, 2006, 214 p.
8. Likhacheva A. V., Shibeka L. A. *Himiya okruzhayushchej sredy* [Environmental chemistry]. Minsk: BSTU, 2011, 204 p.
9. Nosenko T. N., Sitnikova V. E., Strelnikova I. E., Fokina M. I. *Praktikum po kolebatel'noj spektroskopii* [Practical training in vibrational spectroscopy]. Saint Petersburg, ITMO University, 2021, 173 p.

10. Sokolova N. A., Kostin V. E., Khlobzhava I. N., Gamaga V. V., Vasenyev I. I. *Funkcionalnoe ispolzovanie biomassy trostnika zimnej zagotovki v regionah Nizhnego Povolzhya* [Functional use of reed biomass of winter harvesting in the lower Volga regions]. *Problems of regional ecology*, 2020, No. 5, pp. 25–30. (In Russ).
11. Zelentsov V. I., Datsko T. Y. *Primenenie adsorbcionnyh modelej dlya opisaniya ravnovesiya v sisteme oksigidroksid alyuminiya – fluor* [Application of adsorption models to describe the equilibrium in the aluminum oxyhydroxide — fluorine system]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing of materials], 2012, No. 48(6), pp. 65–73. (In Russ).

#### ***Информация об авторах***

**Д. В. Мытько** — инженер;

**Л. А. Шибeka** — кандидат химических наук, доцент.

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

**D. V. Mytsko** — engineer;

**L. A. Shibeka** — candidate of chemical sciences, associate professor.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.

The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.