



Научная статья

УДК 544.723.21

DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-3-61-71

СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НОВОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО СОРБЕНТА ИЗ ЛЬНЯНОГО ВОЛОКНА

Т. Е. Никифорова, А. Р. Софронов

Татьяна Евгеньевна Никифорова, д.х.н., доцент; Артемий Романович Софронов, аспирант

Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

tatianaenik@mail.ru, artemijsofronov@gmail.com

Ключевые слова:
льняное волокно, ионы
меди, таурин, сорбция,
модификация

Аннотация. Данное исследование направлено на разработку модифицированного сорбента из отходов производства льна и изучение его сорбционных свойств по отношению к ионам Си (II). Модификация проводилась в два этапа, первым этапом являлось окисление целлюлозы льняного волокна метaperиодатом натрия до диальдегидцеллюлозы, второй этап состоял в присоединении таурина для повышения сорбционных характеристик модифицированного сорбента. Представлены условия проведения реакции периодатного окисления льняного волокна и обработки полученной диальдегидцеллюлозы таурином. Определены сорбционные характеристики модифицированного сорбента в сравнении с исходным льняным волокном. Кинетические исследования позволили установить время достижения сорбционного равновесия в гетерофазной системе «водный раствор соли металла - сорбент» и определить порядок реакции с использованием моделей кинетики псевдопервого и псевдвторого порядков. Изотермы сорбции, полученные в ходе экспериментов, были обработаны по модели Ленгмюра. Предельная сорбционная емкость по сравнению с исходным льняным волокном выросла в 3 раза. Улучшение равновесных и кинетических характеристик льняного волокна происходит в результате появления в его структуре новых сорбционных центров, что подтверждается данными ИК-спектроскопии.

Для цитирования:

Никифорова Т.Е., Софронов А.Р. Сорбционные свойства нового модифицированного сорбента из льняного волокна // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 61-71
URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5357/view>

Введение

В настоящее время основные загрязнители водных ресурсов включают ионы тяжелых металлов, содержащиеся в промышленных стоках предприятий химической, нефтехимической, горнодобывающей и других отраслей. Тяжелые металлы накапливаются в окружающей среде, так как, в отличие от органических веществ, не разлагаются микроорганизмами. Высокие концентрации тяжелых металлов в стоках



предприятий приводят к их накоплению в питьевой воде, пищевом сырье и продуктах питания, что, в свою очередь, ведет к их накоплению в организме человека, причиняя значительный вред здоровью.

Токсическое действие тяжелых металлов характеризуется неспецифичностью, так как они способны связываться с белками, нуклеотидами, коферментами, фосфолипидами и практически всеми веществами, участвующими в метаболических процессах в организме [1, 2]. Это обуславливает необходимость разработки новых и более эффективных методов очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов. Современные технологии удаления тяжелых металлов включают химическое осаждение, восстановление, электрокоагуляцию, электродиализ, обратный осмос, мембранную фильтрацию, ионный обмен и адсорбцию. Среди этих методов сорбция является наиболее распространенной благодаря высокой эффективности и простоте применения [3].

В последние годы особый интерес вызывает разработка сорбентов на основе побочных продуктов или отходов сельского хозяйства, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности [4]. Помимо биосорбентов на основе натуральных компонентов существует большое количество синтетических сорбентов, например, на основе цеолитов [5]. Основные преимущества использования биосорбентов для удаления ионов тяжелых металлов по сравнению с традиционными методами включают более низкую стоимость, доступность, простоту утилизации, эффективность очистки, возможность регенерации сорбентов. К преимуществам сорбентов на основе сельскохозяйственных отходов относятся их возобновляемость и экологическая безопасность, поскольку они являются экологически чистыми и биологически нейтральными по отношению к очищаемым средам [6]. Однако сорбенты в нативном состоянии обладают, как правило, невысокой сорбционной емкостью, что делает актуальной задачу модификации сорбентов на основе вторичного целлюлозосодержащего сырья.

Для повышения сорбционной способности целлюлозосодержащих сорбентов применяются различные методы модификации, включая химические, физические, физико-химические и биохимические [4]. В работе [7] предложен метод удаления ионов тяжелых металлов из водных растворов с использованием целлюлозы, модифицированной полиэтиленполиамином. Сорбент, полученный путем термической обработки рисовой лузги, демонстрирует высокие сорбционные свойства по отношению к ионам меди (II) и цинка (II) [8]. Перспективным направлением в разработке целлюлозных сорбентов является получение привитых сополимеров целлюлозы с различными мономерами [9].

В последние годы внимание исследователей привлекает льняное волокно, которое производится в больших объемах как в нашей стране, так и за рубежом, а также различные продукты его переработки. Для создания сорбентов можно использовать модифицированные отходы производства льняной муки [10] и короткое льняное волокно, являющееся отходом переработки льна. Это волокно включает целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин, пектиновые вещества и другие компоненты, содержащие разнообразные функциональные группы, оказывающие значительное влияние на



процесс адсорбции ионов тяжелых металлов. Установлено, что радиус гидратированного иона, электроотрицательность и взаимодействие ионов с функциональными группами (-COOH, -OH, -OCH₃) являются ключевыми факторами, влияющими на процесс биосорбции, эффективность которого также зависит от pH водного раствора, времени контакта, исходной концентрации металлов и концентрации самого биосорбента [11-12]. Для повышения сорбционной емкости льняного волокна его, аналогично другим целлюлозным материалам, можно модифицировать различными методами [13-15].

На сегодняшний день в различных странах отмечается тенденция к использованию однолетних растений как источника целлюлозы (лен, джут, конопля, кенаф и т.д.) [13]. В нашей стране лен является основным конкурентом хлопка. В последнее время наблюдается рост производства текстильной продукции из льняных волокон, что сопровождается увеличением количества отходов этих производств, таких как короткие волокна и одревесневшая часть стеблей льна (костра), которые представляют собой альтернативный источник целлюлозы.

Целлюлоза (клетчатка) является одним из самых распространенных природных полимеров и основным компонентом клеточных стенок растений, обеспечивая механическую прочность и эластичность растительных тканей. Макромолекулы целлюлозы состоят из элементарных звеньев D-глюкозы (в пиранозной форме), соединенных 1,4-β-гликозидными связями в линейные неразветвленные цепи.

Разработка целлюлозных сорбентов и исследование их сорбционных свойств представляют собой важную практическую и научную задачу. Поиск соединений с высокой сорбционной способностью по отношению к тяжелым металлам и создание на их основе наполнителей для водоочистного оборудования являются актуальными направлениями исследований. Целлюлоза вызывает большой интерес благодаря своим преимуществам, таким как доступность, возобновляемость и биоразлагаемость.

Целью данного исследования является создание нового целлюлозосодержащего сорбента на основе льняного волокна путем модификации таурином для улучшения его сорбционных свойств.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования было выбрано короткое льняное волокно (ГОСТ 9394-76), представляющее собой вторичный продукт переработки льняной промышленности следующего состава, %: (целлюлоза (75-78), гемицеллюлоза (9,4-11,9), лигнин (3,8), пектиновые вещества (2,9-3,2), воскообразные вещества (2,7), азотсодержащие вещества в расчете на белки (1,9-2,1), минеральные вещества (1,3-2,8) [16].

Модифицирующим агентом служил таурин (IUPAC: 2-аминоэтансульфоновая кислота) – серосодержащая аминокислота. Сульфогруппа является достаточно активным сорбционным центром, чем и обусловлен выбор данной аминокислоты [17].

Для очистки от примесей и повышения сорбционной способности данный объект предварительно кипятили с 10%-м раствором NaOH. Время выдержки составляет 30 минут, при этом модуль раствор/сорбент равен 20. Затем сорбент промывали дистиллированной водой до нейтрального pH 7 и высушивали до постоянного веса.



Данный способ модифицирования льняного волокна таурином состоит из двух основных этапов:

- окисление целлюлозы льняного волокна метапериодатом натрия с образованием диальдегидцеллюлозы;
- модифицирование диальдегидцеллюлозы таурином.

Для приготовления разбавленных растворов использовалась дистиллированная вода.

Предварительно очищенное волокно (2,5 г) смешивали с 250 мл 0,1 н. раствора NaIO_4 .

Реакцию проводят в течении 48 часов при периодическом перемешивании в непрозрачной колбе, при температуре 23-25 °С и рН 3-4, поскольку окислительные свойства метапериодата проявляются именно в кислой среде. При рН выше 4,6 метапериодат превращается в нерастворимый парапериодат.

По окончании реакции периодатного окисления нерастворимую фракцию отфильтровывали от раствора продуктов реакции и последовательно промывали 1–1,2 л воды с добавлением раствора соляной кислоты до рН ~ 1, затем 1–1,2 л смеси ацетон/вода: 1/8 и в конце 1–1,2 л дистиллированной воды.

Следующим этапом модифицирования целлюлозы льняного волокна явилась обработка альдегидных групп окисленного льняного волокна таурином ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_3\text{S}$).

Навеску обработанного волокна с содержанием альдегидных групп 8,8% массой 2 г помещали в колбу, содержащую 5%-й раствор таурина (модуль сорбент : раствор – 1 : 50). Количество альдегидных групп определяли йодометрическим методом, описанным в [18]. Процесс модифицирования проводят в течение 45-60 мин при температуре 60-70 °С и рН 7-10, при непрерывном перемешивании. После охлаждения продукты реакции промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции.

Используемое оборудование: спектрофотометр U-2001 (Япония), атомно-абсорбционный спектрометр 210 VGP, ИК-спектрометр Avatar 360 FT-IR E.S.P.

Кинетику сорбции ионов тяжелых металлов исследовали в статических условиях при перемешивании методом ограниченного объема раствора [19].

Сорбционную емкость сорбента в каждый конкретный момент времени τ рассчитывали по формуле:

$$q = \frac{C_0 - C_\tau}{m} \cdot V,$$

где q – сорбционная емкость, мг/г;

C_0 – начальная концентрация ионов металла, мг/л;

C_τ – концентрация ионов металла в момент времени τ , мг/л;

m – масса навески сорбента, г;

V – объем раствора, мл.

Степень извлечения α определяли следующим образом:

$$\alpha = \frac{C_0 - C_\tau}{C_0} \cdot 100\%,$$

При снятии изотермы сорбции в условиях установившегося равновесия в системе определяли равновесную концентрацию ионов металла в растворе (C) и рассчитывали равновесную сорбционную емкость:



$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V,$$

где A – равновесная сорбционная емкость, моль/кг;

C – равновесная концентрация ионов металла, моль/л.

Относительная погрешность экспериментов рассчитывалась на основании экспериментальных данных, в которых каждая точка представляет собой среднее значение из двух параллельных опытов [20]. Погрешность эксперимента не превышала 10 %.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

Основная часть

В качестве окислителя выбран метапериодат натрия, так как, в отличие от других окислителей, таких как гипохлорит натрия, перекись водорода, озон, бихромат калия, перманганат калия и т.д., метапериодат натрия обладает специфичностью, не разрывая полимерных цепей молекулы целлюлозы. Метапериодат натрия воздействует на две -ОН группы при C_2 и C_3 с образованием альдегидных групп и параллельным разрывом С-С связи между ними, образуя диальдегидцеллюлозу. Реакцию окисления проводили при рН 3-4, поскольку окислительные свойства периодата проявляются в кислой среде. При рН выше 4,6 метапериодат натрия превращается в нерастворимый парапериодат. Схема окисления целлюлозы метапериодатом натрия представлена на рис. 1(а). Далее полученную диальдегидцеллюлозу обрабатывали таурином, который при рН ~ 7 находится в состоянии цвиттер-иона (рис. 1 (б)):

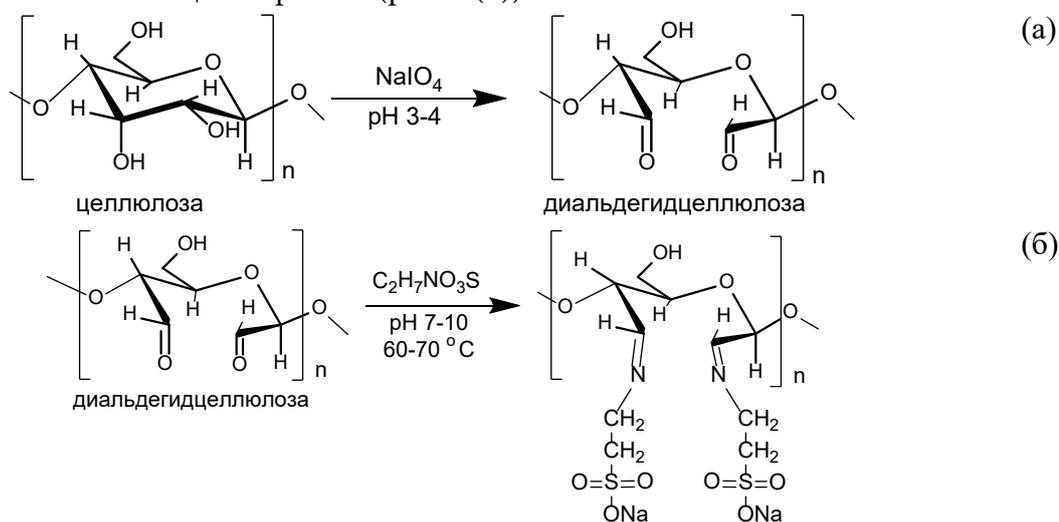


Рис. 1. Схема окисления целлюлозы метапериодатом натрия с образованием диальдегидцеллюлозы (а) и присоединения к диальдегидцеллюлозе таурина (б)

Для определения кинетических характеристик модифицированного сорбента были получены кинетические кривые сорбции ионов $Cu(II)$ из водного раствора сульфата меди исходным льняным волокном и волокном, модифицированным таурином. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

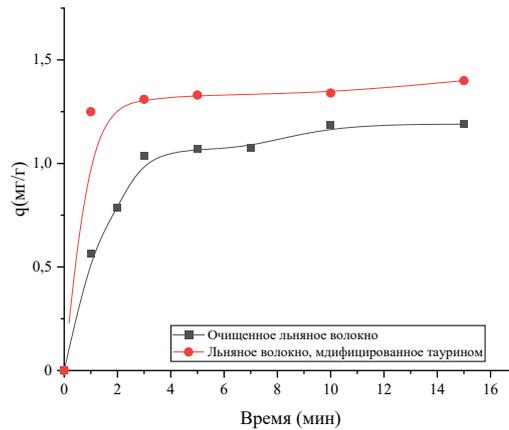


Рис. 2. Кинетические кривые сорбции ионов меди из водного раствора исходным и модифицированным льняным волокном

Обработка кинетических кривых сорбции ионов Cu(II) исходным волокном и модифицированным сорбентом в рамках моделей кинетики псевдопервого и псевдвторого порядков представлена на рис. 3 и 4 и таблице 1.

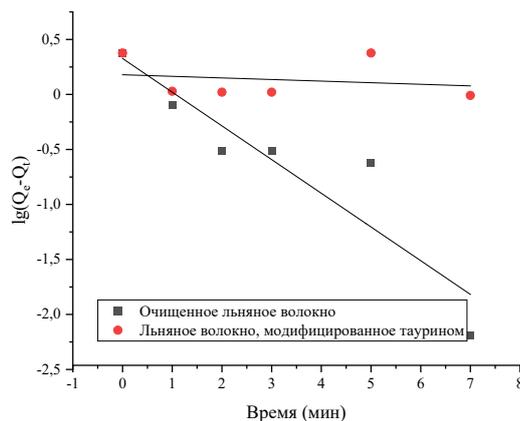


Рис. 3. Кинетика псевдопервого порядка сорбции ионов меди из водного раствора исходным и модифицированным льняным волокном

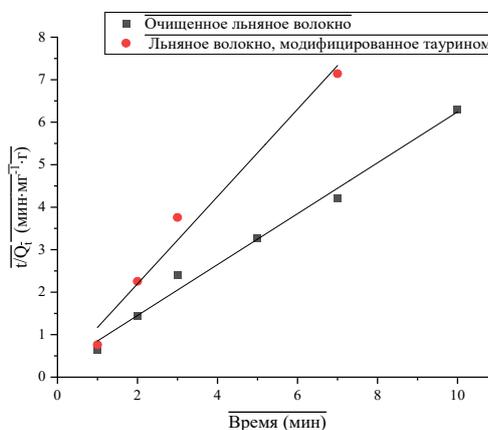


Рис. 4. Кинетика псевдвторого порядка сорбции ионов меди из водного раствора исходным и модифицированным льняным волокном



Таблица 1. Результаты обработки кинетических кривых сорбции ионов меди из водного раствора исходным и модифицированным льняным волокном моделями химической кинетики

Кинетическая модель	Результаты обработки	Нативное льняное волокно	Модифицированное льняное волокно
псевдопервого порядка	q_e , мг/г	$0,740 \pm 0,090$	$0,07 \pm 0,002$
	k_1 , 1/мин	$0,244 \pm 0,030$	$0,00031 \pm 0,0001$
	R^2	0,95	0,82
псевдовторого порядка	q_e , мг/г	$0,736 \pm 0,050$	$1,4 \pm 0,070$
	k_2 , г/(мг•мин)	$1,028 \pm 0,400$	$2,99 \pm 0,500$
	R^2	0,99	0,99

Для определения максимальной сорбционной емкости (A_∞) исходного и модифицированного волокна были получены изотермы сорбции ионов Cu(II) из водного раствора при 293 К. Экспериментальные изотермы представлены на рис. 5.

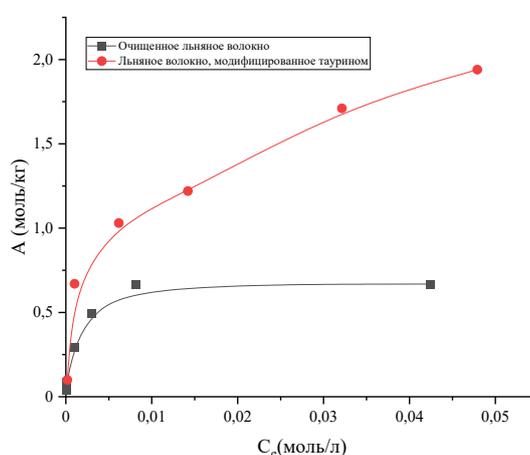


Рис. 5. Изотермы сорбции ионов меди из водного раствора исходным и модифицированным льняным волокном

Результаты обработки изотерм сорбции ионов меди по модели Ленгмюра приведены на рис. 6 и в таблице 2.

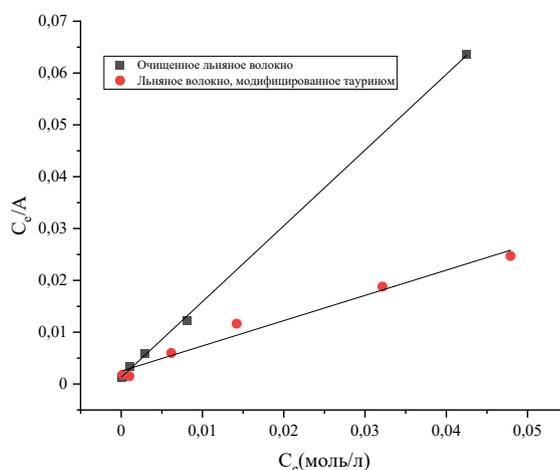


Рис. 6. Обработка изотерм сорбции ионов меди из водного раствора модифицированным сорбентом и исходным волокном



Таблица 2. Параметры обработки изотерм сорбции ионов меди исходным и модифицированным льняным волокном по модели Ленгмюра методом наименьших квадратов

Сорбент	$1/A_{\infty} \cdot K$	$1/A_{\infty}$	Коэффициент корреляции	A_{∞} , моль/кг
Исходное льняное волокно	$0,00129 \pm 2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \pm 0,02$	0,99	0,68
Модифицированное волокно	$0,00249 \pm 8,8 \cdot 10^{-4}$	$0,49 \pm 0,04$	0,99	2,04

Улучшение адсорбционных свойств льняного волокна, модифицированного таурином, объясняется появлением в результате обработки новых функциональных групп в структуре волокна, которые эффективно связывают ионы тяжелых металлов. Для выявления таких изменений были получены ИК-спектры очищенного льняного волокна до и после модификации таурином (рис. 7).

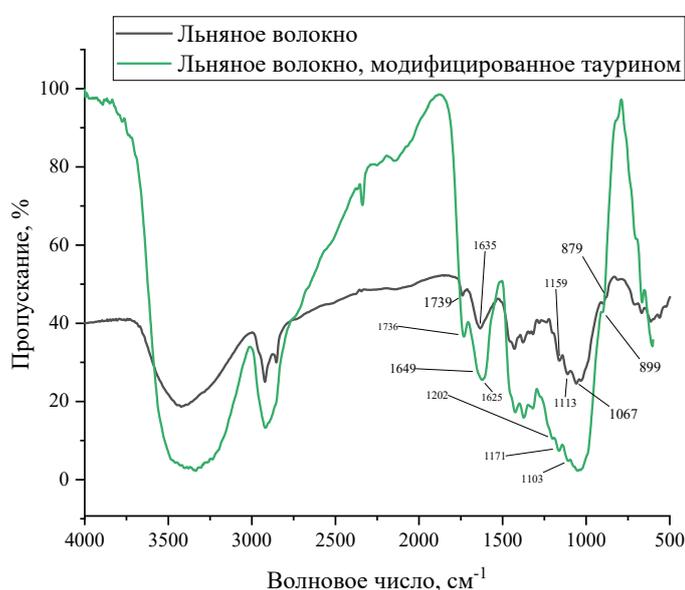


Рис. 7. ИК-спектры исходного и модифицированного льняного волокна

Как видно из рис. 7, в результате модифицирования сорбента существенные изменения наблюдаются в области $1750\text{--}1650\text{ см}^{-1}$, где проявляются колебания карбонильной группы. Так, полоса 1739 см^{-1} в спектре исходного льняного волокна смещается в положение 1736 см^{-1} в спектре модифицированного льняного волокна. Это объясняется тем, что в результате окисления целлюлозы льна метапериодом натрия происходит образование альдегидных групп, которые далее участвуют во взаимодействии с таурином, как показано на рис. 1 (а, б). В области $1690\text{--}1635\text{ см}^{-1}$ проявляются также колебания связи $C=N$ в непредельных азотсодержащих соединениях, о чем свидетельствует появление небольшого пика при 1649 см^{-1} в спектре модифицированного сорбента.

Изменения в области спектра $1650\text{--}1620\text{ см}^{-1}$ и $1300\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ обусловлены деформационными и валентными колебаниями связи $C-N$. Полоса из положения 1635 см^{-1} в спектре исходного льняного волокна смещается в положение 1625 см^{-1} в спектре волокна, модифицированного таурином, а полоса при 1159 см^{-1} в спектре



немодифицированного льна проявляется при 1171 см^{-1} в спектре модифицированного образца. Поэтому можно утверждать, что при модифицировании сорбента на его поверхности происходит закрепление азотсодержащего соединения.

Различия в областях $1100\text{-}1000\text{ см}^{-1}$ и $880\text{-}840\text{ см}^{-1}$ ИК- спектров исходного и модифицированного льняного волокна обусловлены колебаниями C-SO₃H группы и связи S-O [21], из чего можно сделать вывод о присоединении сульфогрупп в процессе модифицирования. Подтверждением присоединения сульфогрупп служит смещение пиков в спектре исходного льняного волокна из положений 1113 см^{-1} и 879 см^{-1} , соответственно, в положения 1103 см^{-1} и 899 см^{-1} для модифицированного сорбента.

Таким образом, результаты ИК- спектроскопии подтверждают, что при использовании предложенного способа обработки протекает химическое взаимодействие модифицирующих агентов с целлюлозой льняного волокна, приводящее к появлению в процессе окисления льняного волокна метапериодатом натрия альдегидных групп, к которым затем происходит присоединение таурина.

В процессе модифицирования целлюлоза льняного волокна последовательно превращается в диальдегидцеллюлозу, затем – в производное соединение с таурином. Это обуславливает появление новых сорбционно-активных групп в структуре сорбентов, способных эффективно связывать ионы тяжелых металлов. Процесс сорбции ионов Cu (II) происходит по механизму, показанному на схеме (рис. 8):

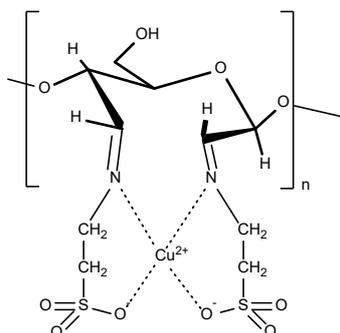


Рис. 8. Схема сорбции ионов Cu (II) модифицированным сорбентом

Выводы

В ходе данного исследования был разработан новый эффективный сорбент для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов путем модифицирования короткого льняного волокна таурином с предварительным окислением целлюлозы льняного волокна до диальдегидцеллюлозы.

Были исследованы кинетика и равновесие сорбции ионов Cu(II) из водных растворов CuSO₄. Кинетические кривые сорбции ионов меди были обработаны в рамках моделей псевдопервого и псевдвторого порядков. Наиболее корректно процесс сорбции описывается моделью псевдвторого порядка.

Установлено, что экспериментальные изотермы сорбции ионов меди(II) хорошо описываются уравнением Ленгмюра. Обработка изотерм в линейной форме этого уравнения позволила определить предельную сорбционную емкость льняного волокна, модифицированного таурином, которая составила 2,04 моль/кг.



Представленные ИК-спектры свидетельствуют о произошедших в процессе модифицирования изменениях в составе льняного волокна, окисленного метапериодатом натрия и модифицированного таурином, по сравнению с исходным льняным волокном.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР. Тема № FZZW-2024-0004.

This work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZZW-2024-0004).

Список источников

1. **Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C.** A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: current trends and future perspectives // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. No. 290. Pp. 111-197.
2. **Lindholm-Lehto P.** Biosorption of heavy metals by lignocellulosic biomass and chemical analysis // *Bio Resources*. 2019. No. 14. Pp. 4952-4995.
3. **Yadav S., Yadav A., Bagotia N., Sharma A.K., Kumar S.** Adsorptive potential of modified plant-based adsorbents for sequestration of dyes and heavy metals from wastewater - A review // *Journal of Water Process Engineering*. 2021. No. 42. Pp. 102-148.
4. **Dawn S.S, Vishwakarma V.** Recovery and recycle of wastewater contaminated with heavy metals using adsorbents incorporated from waste resources and nanomaterials - A review // *Chemosphere*. 2021. Vol. 273. 129677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129677>.
5. **Gordina N.E., Prokofev V.Y., Hmylova O.E., Kul'pina Y.N.** Effect of ultrasound on the thermal behavior of the mixtures for the LTA zeolite synthesis based on metakaolin // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. V. 129, No. 3. Pp. 1415-1427.
6. **Tursi A.** A review on biomass: importance, chemistry, classification and conversion // *Biofuel Research*. 2019. No. 6. Pp. 962-979.
7. **Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Вокурова Д.А., Иванов С.Н.** Влияние модифицирования льняного волокна полиэтиленполиамином на сорбцию ионов Cu(II) и Cd(II) // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества)*. 2023. Т. LXVII. № 3. С. 63-72. DOI: 10.6060/RJ.2023673.9.
8. **Меретин Р.Н., Никифорова Т.Е.** Исследование реакционной способности поверхности углеродсодержащего силикатного сорбента растительного происхождения // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 147-155. DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6408.
9. **Thakur V., Sharma E., Guleria A., Sangar S., Singh K.** Modification and management of lignocellulosic waste as an ecofriendly biosorbent for the application of heavy metal ions sorption // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 32. Part 4. Pp. 608-619, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.756.
10. **Никифорова Т.Е., Вокурова Д.А., Софронов А.Р.** Извлечение ионов меди сорбентом на основе льняного волокна, модифицированного L-аргинином // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2022. Т. 3, № 3. С. 17-26. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5031/view> DOI: 10.52957/27821900_2022_03_17 (дата обращения 08.06.2024).
11. **Kajeiou M., Alem A., Mezghich S., Ahfir N.-D., Mignot M., Devouge-Boyer C., Pantet A.** Competitive and non-competitive zinc, copper and lead biosorption from aqueous solutions onto flax fibers // *Chemosphere*. 2020. No. 260. Pp. 127-505.
12. **Dey P., Mahapatra B.S., Juyal V.K., Pramanick B., Negi M.S., Paul J., Singh S.P.** Flax processing waste – A low-cost, potential bio sorbent for treatment of heavy metal, dye and organic matter contaminated industrial wastewater // *Industrial Crops & Products*. 2021. No. 174. Pp. 114-195.



13. **Razak M.R., Yusof N.A., Aris A.Z., Nasir H.M., Haron Md.J., Ibrahim N.A., Johari I.S., Kamaruzaman S.** Phosphoric acid modified kenaf fiber (K-PA) as green adsorbent for the removal of copper (II) ions towards industrial waste water effluents // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. V. 147. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2019.104466.
14. **Liu Y., Qiao L., Wang A., Li Y., Zhao L., Du K.** Tentacle-type poly(hydroxamic acid)-modified macroporous cellulose beads: Synthesis, characterization, and application for heavy metal ions adsorption // *Journal of Chromatography A*. 2021. V. 1645. Pp. 462098. DOI: 10.1016/j.chroma.2021.462098.
15. **Hussain D., Khan S.A., Alharthi S.S., Khan T.A.** Insight into the performance of novel kaolinite-cellulose/cobalt oxide nanocomposite as green adsorbent for liquid phase abatement of heavy metal ions: Modelling and mechanism // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. V. 15. No. 7. P. 103925. DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.103925.
16. **Кричевский Г.Е.** Химическая технология текстильных материалов: учебник для вузов в 3-х томах. Т. 1. Теоретические основы технологии. Волокна. Загрязнения. Подготовка текстильных материалов. – М.: РосЗИТЛП, 2000. - 436 с.
17. **Yoshinari N., Kuwamura N., Kojima T., Konno T.** Development of coordination chemistry with thiol-containing amino acids // *Coordination Chemistry Reviews*. 2023. V. 474. P. 214857. DOI: 10.1016/j.ccr.2022.214857.
18. **Васильев В.П.** Аналитическая химия. В 2 книгах. Кн. 2. Физико-химические методы анализа: учебник для химико–технологических специальностей ВУЗов. 6-е изд. - М.: Высшая школа, 2004. – 383 с.
19. **Кокотов Ю.А., Пасечник В. А.** Равновесие и кинетика ионного обмена. - Л.: Химия, 1970. – 336 с.
20. **Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – М.: Высшая школа, 1985. - 327 с.
21. **Тарасевич Б.Н.** ИК спектры основных классов органических соединений // Справочные материалы. МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2012. – 55 с.

Поступила в редакцию 21.08.2024

Одобрена после рецензирования 04.09.2024

Принята к опубликованию 04.09.2024