



Научная статья

УДК 544.7

DOI: 10.52957/27821900_2022_03_17

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ МЕДИ СОРБЕНТОМ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНОГО ВОЛОКНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО L-АРГИНИНОМ

Т. Е. Никифорова, Д. А. Вокурова, А. Р. Софронов

Татьяна Евгеньевна Никифорова, д-р хим. наук, доцент; Дарья Андреевна Вокурова, магистрант; Артемий Романович Софронов, магистрант

Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия, tatianaenik@mail.ru, fresh-limon@mail.ru, artemijsofronov@gmail.com

Ключевые слова:

льняное волокно, модифицирование, L-аргинин, метaperиодат натрия, сорбция, ионы Си (II)

Аннотация: В данной работе исследован процесс извлечения ионов Си(II) из водных растворов целлюлозосодержащими сорбентами: нативным и модифицированным L-аргинином льняным волокном. Экспериментальные кинетические кривые сорбции ионов меди обработаны в рамках моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков. Высокий коэффициент корреляции (0,99) был получен в случае использования модели кинетики псевдо-второго порядка. Результаты обработки изотерм сорбции согласно модели Ленгмюра, свидетельствуют о применимости данной модели для описания процесса сорбции ионов меди сорбентами целлюлозной природы. В результате проведения двухступенчатого химического модифицирования через стадию окисления льняного волокна периодатом натрия и последующего модифицирования L-аргинином получен новый сорбент, который может быть использован для очистки водных растворов от ионов тяжелых металлов. Приведены СЭМ-изображения и элементный анализ исходного и модифицированного образцов льняного волокна. Изменения, произошедшие в льняном волокне в ходе модификации, подтверждают ИК-спектры. Полученный сорбент по своим сорбционным характеристикам значительно превосходит нативное льняное волокно, о чем свидетельствуют значения предельной сорбционной емкости.

Для цитирования:

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, вып. 3. С. 17-26. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2022tom3no3>

Введение

В настоящее время важнейшим источником загрязнения окружающей среды являются ионы тяжелых металлов, содержащиеся в промышленных сточных водах предприятий различных отраслей промышленности, включая химическую, нефтехимическую, горнодобывающую и др. Тяжелые металлы способны накапливаться в окружающей



среде, поскольку, в отличие от органических загрязнителей, не разлагаются микроорганизмами. Высокое содержание тяжелых металлов в объектах экосистемы, таких как растения, водоемы, почва, способствуют их накоплению в питьевой воде, пищевом сырье и продукты питания, с которыми они попадают в организм человека, тем самым нанося серьезный вред здоровью.

Токсическое действие тяжелых металлов носит неспецифический характер, они способны соединяться с белками, нуклеотидами, коферментами, фосфолипидами, т.е. практически со всеми типами веществ, участвующими в метаболизме клеток [1, 2].

Поэтому необходимо разрабатывать эффективные методы очистки воды и водных растворов различной природы от ионов тяжелых металлов. Современные технологии удаления тяжелых металлов включают химическое осаждение, сорбцию и мембранную фильтрацию. Среди этих технологий сорбция является наиболее распространенным подходом для удаления ионов тяжелых металлов из растворов с высокой эффективностью и простотой эксплуатации [3].

В последние годы большой интерес представляет разработка сорбентов на основе многотоннажных побочных продуктов или отходов сельского хозяйства, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности. Основными преимуществами сорбции ионов тяжелых металлов с использованием биосорбентов по сравнению с традиционными методами очистки являются: более низкая стоимость, доступность, простота утилизации, эффективность очистки, возможность регенерации сорбентов и извлечения металла.

К числу достоинств сорбентов на основе отходов сельскохозяйственного производства можно отнести возобновляемость и безопасность – они являются экологически чистыми и биологически инертными по отношению к очищаемым средам [4]. Однако сорбенты в нативном состоянии, как правило, обладают недостаточно высокой сорбционной емкостью. Поэтому актуальным вопросом является модификация сорбентов на основе вторичного целлюлозосодержащего сырья [5-7].

Для увеличения сорбционной способности целлюлозосодержащих сорбентов их модифицируют различными способами, такими как химические, физические, физико-химические и биохимические [8]. Авторы работы [9] предложили способ удаления ионов тяжелых металлов из водных источников с использованием целлюлозы, модифицированной наночастицами серебра и цинка. Сорбент, полученный путем термической обработки рисовой лузги, проявляет высокие сорбционные свойства по отношению к ионам меди (II) и цинка (II) [10]. Древесная целлюлоза, модифицированная многоосновными карбоновыми кислотами и поливинилпирролидоном, способна эффективно извлекать ионы Cu^{2+} , Co^{2+} и Ni^{2+} из водных растворов [11]. Широкие возможности для разработки сорбентов открывает получение привитых сополимеров целлюлозы с различными мономерами [12].

В последние годы внимание исследователей привлекает льняное волокно, производимое как в нашей стране, так и за рубежом, и различные продукты его переработки. Для получения сорбентов можно использовать модифицированные отходы льняной муки [13], а также короткое льняное волокно, представляющее собой побочный продукт переработки льна. В его состав входят целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, пектиновые вещества и др., содержащие различные функциональные группы, играющие важную роль в процессе адсорбции ионов тяжелых металлов. Отмечается, что электроотрицательность,



радиус гидратированного иона и взаимодействие ионов с функциональными группами (-COOH, -OH, -OCH₃) являются основными факторами, влияющими на процесс биосорбции, эффективность которой также сильно зависит от pH водного раствора, времени контакта, исходной концентрации металлов и концентрации биосорбента [14-16]. Было обнаружено, что эффективность необработанного льняного волокна как сорбента достигает, соответственно, 8,32; 13,35 и 7,12 мг/г [15], а также 9,9; 10,7 и 8,4 мг/г по ионам Cu²⁺, Pb²⁺ и Zn²⁺ [16]. Для повышения сорбционной емкости короткого льняного волокна его модифицируют различными способами [17, 18].

Целью данной работы является разработка нового целлюлозосодержащего сорбента на основе короткого льняного волокна путем его модифицирования.

Основная часть

Объекты исследования и используемые реактивы. В качестве объекта исследования было выбрано льняное волокно (ГОСТ 9394-76. Волокно льняное короткое. Технические условия), 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) [19].

Для очистки от примесей льняное волокно предварительно кипятили в 5%-ном водном растворе NaHCO₃ в течение 30 мин при модуле раствор/сорбент 20, промывали дистиллированной водой до pH=7 и высушивали до постоянного веса.

Реактивы марки «х.ч», используемые в экспериментах: NH₂C(NH₂)NH(CH₂)₃CH(NH₂)-COOH (L-аргинин), NaIO₄ (йоднокислый натрий), CuSO₄·5H₂O (медь (II) сернокислая).

Кинетика и изотермы сорбции. Кинетику сорбции ионов тяжелых металлов исследовали в статических условиях при периодическом перемешивании методом ограниченного объема раствора. Начальная концентрация ионов металлов составляла 1,5·10⁻⁴ моль/л. Через определенные промежутки времени раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем текущую концентрацию ионов металлов (C_τ) методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе 210 VGP. Сорбционную емкость сорбента в каждый конкретный момент времени (q, мг/г) рассчитывали по формуле

$$q = \frac{(C_0 - C_\tau) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где C₀ – начальная концентрация ионов металла в растворе, мг/л; C_τ – концентрация ионов металла в момент времени τ, мг/л; m – масса навески сорбента, г; V – объем раствора, л.

При снятии изотермы сорбции в условиях установившегося равновесия в системе определяли равновесную концентрацию ионов металла в растворе и рассчитывали равновесную сорбционную емкость (A, моль/кг):

$$A = \frac{(C_0 - C)}{m} \cdot V, \quad (2)$$

где C₀ и C – начальная и равновесная концентрация ионов металла соответственно, моль/л; m – масса навески сорбента, кг; V – объем раствора, л.



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

ИК–спектры нативного и модифицированного льняного волокна регистрировали при помощи ИК-спектрометра с преобразованием Фурье Avatar 360 FT-IR ESP в интервале $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Образцы для анализа готовили путем механического измельчения и последующего тщательного растирания сорбента в агатовой ступке со спектрально чистым KBr.

Модифицирование льняного волокна. С целью улучшения поглотительных свойств льняного волокна была проведена его химическая модификация L-аргинином. Разработанный способ включает окисление целлюлозы льна метапериодатом натрия с образованием диальдегидцеллюлозы и ее последующую обработку L-аргинином.

Окисление льняной целлюлозы натриевой солью йодной кислоты с образованием диальдегидцеллюлозы проводили следующим образом. Навеску льняного волокна помещали в колбу с притертой пробкой и заливали 0,1 н. водным раствором NaIO_4 ($\text{pH}\approx 2$) при модуле раствор/сорбент 15–50. Колбу тщательно встряхивали и помещали в темное место, периодически отбирали пробы для определения остаточной концентрации ионов IO_4^- в растворе. После окончания реакции окисления метапериодатом натрия нерастворимую фракцию отделяли декантацией от раствора, промывали последовательно 1–1,2 л воды с добавлением соляной кислоты ($\text{pH}=1$), 1–1,2 л смеси ацетон/вода и высушивали. Затем проводили модификацию полученной диальдегидцеллюлозы в льняном волокне L-аргинином. Для этого льноволокно, окисленное NaIO_4 , помещали в колбу с 1%-ным раствором L-аргинина при модуле 1:50 и выдерживали при температуре $40\text{--}45\text{ }^\circ\text{C}$ и $\text{pH}=7\text{--}10$ в течение 45–60 мин при непрерывном перемешивании реакционной смеси. После охлаждения продукты реакции промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и высушивали.

Обсуждение результатов

Для определения параметров, характеризующих сорбционные свойства модифицированного льняного волокна, были получены кинетические кривые сорбции ионов Cu(II) . Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

Согласно полученным данным, модифицированное льняное волокно, по сравнению с немодифицированным, значительно эффективнее извлекает ионы меди. Время достижения адсорбционного равновесия в гетерогенной системе «водный раствор сульфата меди – сорбент» составляет 15 минут.

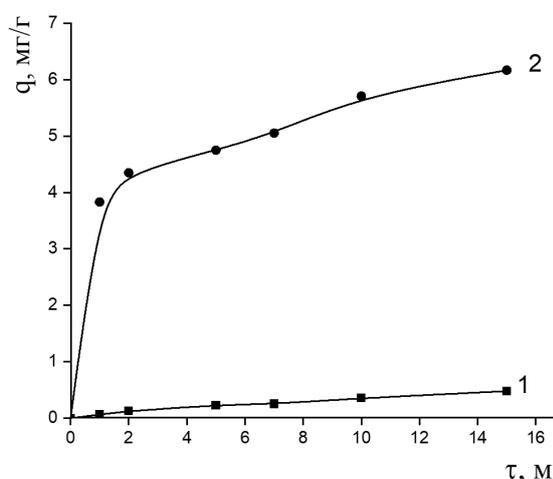


Рис. 1. Кинетика сорбции ионов Cu(II) из водных растворов льняным волокном: 1 – немодифицированным; 2 – модифицированным L-аргинином



Для определения порядка реакции экспериментальные данные были обработаны с использованием кинетических моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка методом наименьших квадратов с помощью программы OriginPro. Кинетические параметры сорбции ионов меди нативным и модифицированным L-аргинином льняным волокном из водных растворов, найденные в результате обработки кинетических кривых сорбции ионов Cu (II), представлены в табл. 1. Полученные данные для нативного и модифицированного льняного волокна показывают, что обработка моделью псевдо-второго порядка является наиболее корректной, коэффициенты корреляции при этом составляют 0,99.

Таблица 1. Кинетические параметры сорбции ионов меди нативным и модифицированным L-аргинином льняным волокном из водных растворов

Cu (II)	Модель псевдо-первого порядка			Модель псевдо-второго порядка		
	q_e , мг/г	k_1 , мг·мин/г	R^2	q_e , мг/г	k_1 , мг·мин/г	R^2
Нативное льняное волокно	0,74	0,24	0,95	0,736	1,03	0,99
Модифицированное льняное волокно	5,36	0,195	0,92	5,78	5,8	0,99

Для определения и сравнения максимальной сорбционной емкости (A_∞) образцов нативного и модифицированного льна были получены изотермы сорбции ионов Cu (II) из водного раствора (рис. 2).

Полученные экспериментальные данные можно описать уравнением изотермы адсорбции Ленгмюра:

$$A = \frac{A_\infty \cdot K \cdot C_e}{(1 + K \cdot C_e)}, \quad (3)$$

где A_∞ – предельная, или максимальная, сорбционная емкость полимера по данному металлу, моль/кг; K – концентрационная константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность процесса сорбции, л/моль; C_e – равновесная концентрация сорбата, моль/л.

Линеаризация изотермы сорбции по уравнению (2) позволяет графически определить в уравнении Ленгмюра величины A_∞ и K из опытных данных по распределению исследуемого сорбата в гетерофазной системе водный раствор – сорбент.

$$\frac{C_e}{A} = \frac{C_e}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty \cdot K}. \quad (4)$$

Результаты обработки изотермы сорбции ионов меди по модели Ленгмюра методом наименьших квадратов представлены в табл. 2.

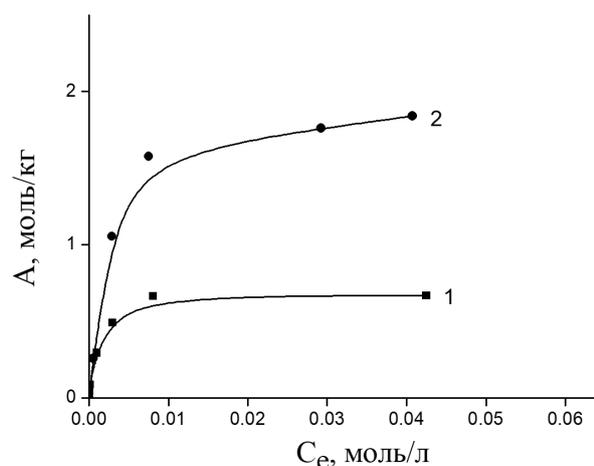


Рис. 2. Изотермы сорбции ионов Cu (II) льняным волокном: 1 – нативным; 2 – модифицированным L-аргинином

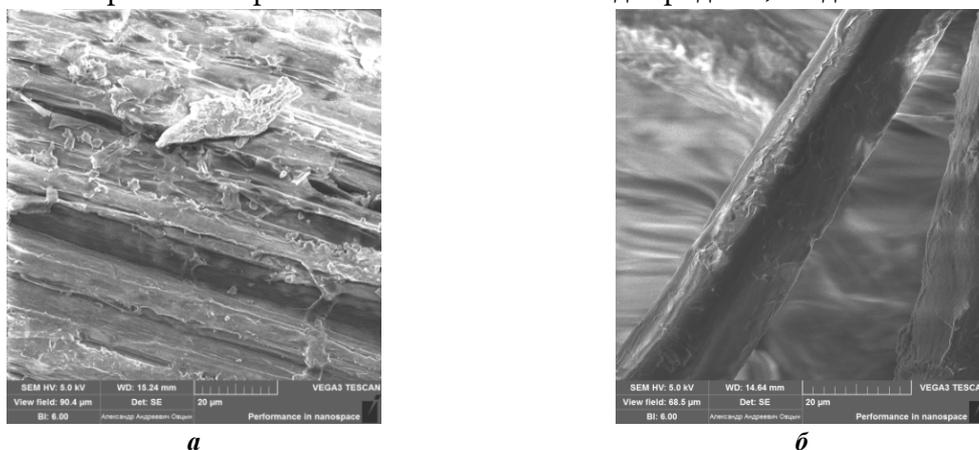
**Таблица 2.** Параметры обработки изотерм сорбции ионов Cu (II) по модели Ленгмюра

Сорбент	$1/A_{\infty}$	$1/A_{\infty} \cdot K$	Коэффициент корреляции	A_{∞} , моль/кг
Нативное льняное волокно	$1,462 \pm 1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,83
Модифицированное льняное волокно	$0,515 \pm 0,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$	0,99	1,84

Результаты, полученные при обработке изотермы сорбции с использованием модели адсорбции Ленгмюра, свидетельствуют, что предельная сорбционная емкость льняного волокна (A_{∞}) увеличивается для ионов Cu (II) с 0,83 до 1,84 моль/кг при обработке L-аргинином.

Исследование поверхности образцов исходного льняного волокна и льняного волокна, окисленного метапериодатом натрия, методом СЭМ при помощи сканирующего электронного микроскопа «VEGA3 SB» показало, что под воздействием модификации изменяется микрорельеф поверхностного слоя образцов (рис. 3, а, б).

Поверхность нативного льняного волокна (см. рис. 3, а), неоднородная, с большим количеством складок и включений, что связано с тем, что льняные волокна сформированы из элементарных волокон, скрепленных между собой лигнином, пектином и аморфными полимерами вторичной клеточной стенки. При окислении периодатом натрия нативного образца (см. рис. 3, б), наблюдается сглаживание структуры волокна и удаление с поверхности различных включений, что приводит к изменению поверхностного слоя. Поверхность сорбента становится более однородной, гладкой.

**Рис. 3.** СЭМ-изображения поверхности льняного волокна: а – нативное льняное волокно; б – льняное волокно, окисленное метапериодатом натрия

Элементный состав льняного волокна до и после окисления метапериодатом натрия, а также до и после сорбции ионов Cu (II) представлен на рис. 4 и 5 соответственно. Содержание кислорода в образце окисленного льняного волокна (см. рис. 4, б) заметно возрастает по сравнению с исходным образцом (см. рис. 4, а), при этом сорбция ионов меди окисленным образцом (см. рис. 5, б) практически отсутствует, в то время как на поверхности нативного волокна обнаружено 1,78% Cu. Это свидетельствует о получении в процессе метапериодатного окисления диальдегидцеллюлозы, не способной сорбировать ионы металлов.

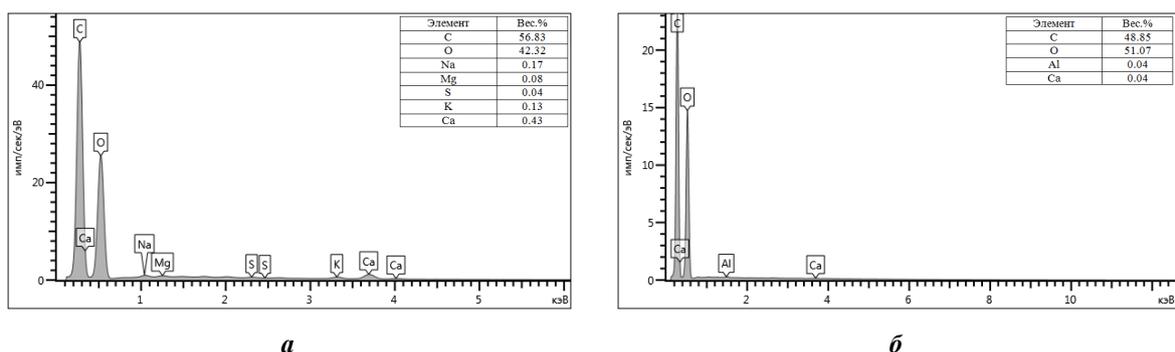


Рис. 4. Элементный анализ образцов льняного волокна: *а* – нативное льняное волокно; *б* – окисленное льняное волокно

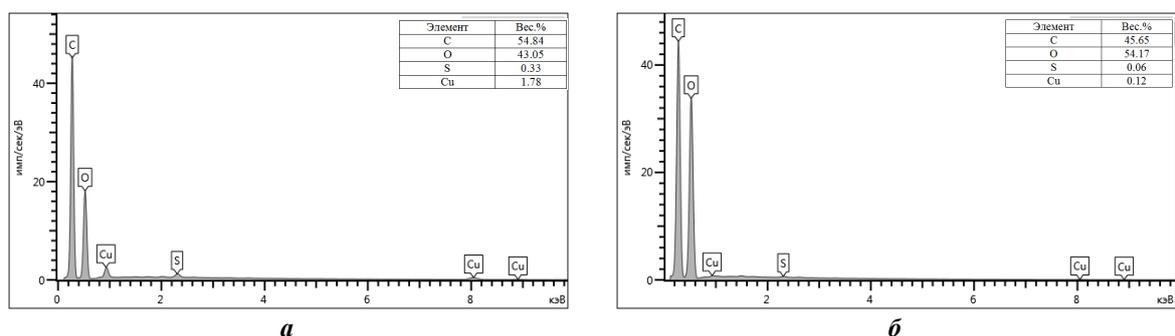


Рис. 5. Элементный анализ образцов льняного волокна после сорбции ионов меди (II): *а* – нативное льняное волокно; *б* – окисленное льняное волокно

Для подтверждения образования диальдегидцеллюлозы при обработке льняного волокна в растворе метапериодата натрия были сняты ИК-спектры льняного волокна исходного и окисленного в растворе NaIO_4 (рис. 6, спектры 1-2). Сравнение полученных ИК-спектров свидетельствует о том, что в процессе окисления в льняном волокне произошли заметные изменения. Так, в спектре льняного волокна, содержащего диальдегидцеллюлозу, наблюдается увеличение интенсивности и небольшой сдвиг полосы поглощения, отвечающей валентным колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ в альдегидах и кислотах, по отношению к спектру исходного льняного волокна, из положения 1632 см^{-1} в положение 1638 см^{-1} . При этом в спектре окисленного образца исчез пик при 1739 см^{-1} , присутствовавший в спектре нативного льна, отвечающей валентным колебаниям карбонильной группы для карбоновых кислот. Таким образом, ИК-спектр окисленного льняного волокна указывает на появление в составе окисленного сорбента альдегидных групп.

ИК-спектр 3 на рис. 6 получен для льняного волокна, окисленного NaIO_4 и обработанного L-аргинином. Сравнение ИК-спектра окисленного льна со спектром льна, окисленного и обработанного L-аргинином, позволяет выявить следующие отличия. В спектре 3 льняного волокна, окисленного и модифицированного L-аргинином, отмечается сдвиг полосы поглощения по сравнению со спектром окисленного льняного волокна из положения 1638 см^{-1} в положение 1648 см^{-1} , который может быть обусловлен валентными колебаниями карбонильной группы для альдегидов и карбоновых кислот, а также деформационными колебаниями связи $\text{N}-\text{H}$ в амидах. Кроме того, в ИК-спектре льняного волокна, модифицированного L-аргинином, по сравнению с ИК-спектром окисленного



льна наблюдается существенный сдвиг полосы поглощения из положения 1280 см^{-1} в положение 1271 см^{-1} , где проявляются валентные колебания связи C–N в амидах.

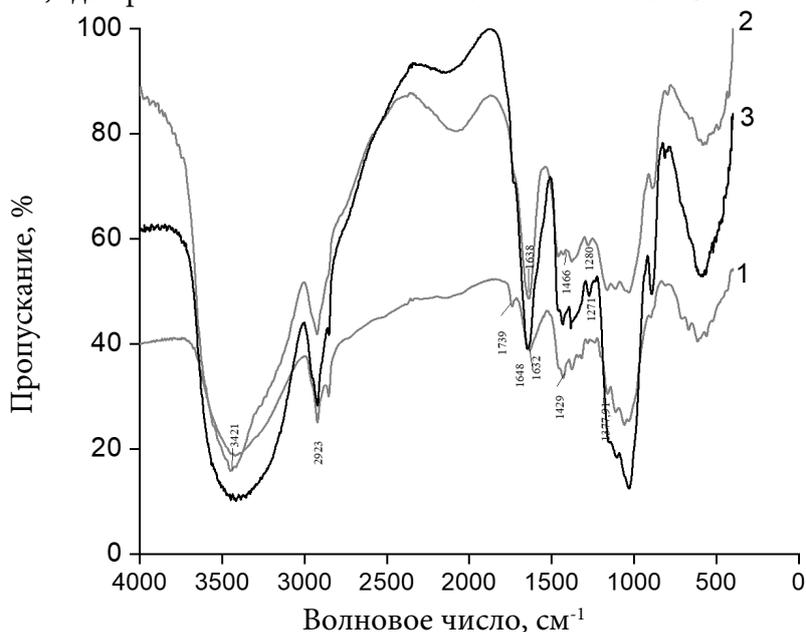


Рис. 6. ИК-спектры льняного волокна: 1 - нативное льняное волокно; 2 - окисленное льняное волокно; 3 - льняное волокно, окисленное и обработанное L-аргинином

Поэтому можно утверждать, что при модифицировании сорбента на его поверхности происходит закрепление L-аргинина. Взаимодействие аминокислоты L-аргинина с альдегидными группами целлюлозы льна осуществляется с образованием амидной связи и увеличением содержания карбоксильных групп в структуре волокон, что подтверждается данными ИК-спектров.

Выводы и рекомендации

Получен сорбент для очистки водных растворов от ионов тяжелых металлов химическим модифицированием льняного волокна и исследованы его сорбционные свойства по отношению к ионам Cu (II).

Показано, что модифицирование природного полисахаридного материала включало окисление льняного волокна метапериодатом натрия и последующую обработку образовавшейся диальдегидцеллюлозы L-аргинином. Это способствует созданию на поверхности полисахаридного материала в процессе модифицирования сорбционно-активных функциональных групп.

Модифицированное L-аргинином льняное волокно обладает хорошими равновесно-кинетическими характеристиками и может быть использовано в качестве сорбента для очистки водных растворов от ионов тяжелых металлов.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР. Тема № FZZW-2020-0010.



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 // *J. Mol. Liq.* 2019. Vol. 290. 111197. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111197.
2. **Lindholm-Lehto P.** Biosorption of heavy metals by lignocellulosic biomass and chemical analysis // *BioRes.* 2019. Vol. 14(2). P. 4952–4995. DOI: 10.15376/biores.14.2.Lindholm-Lehto.
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. Vol. 42. P. 102-148. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102148
4. **Tursi A.** A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion // *Biofuel Res. J.* 2019. Vol. 6, P. 962–979. DOI: 10.18331/BRJ2019.6.2.3.
5. **Joseph L., Jun B.-M., Flora J.R.V., Park C.M., Yoon Y.** Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: a review // *Chemosphere.* 2019. Vol. 229. P. 142-159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
6. **Ravikumar L.** The Use of New Chemically Modified Cellulose for Heavy Metal Ion Adsorption and Antimicrobial Activities // *Journal of Water Resource and Protection.* 2015. № 7(06). C. 530-545. DOI: 10.4236/jwarp.2015.76042
7. **Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Loginova V.A.** Peculiarities of the adsorption of heavy-metal ions from aqueous media by modified cellulose // *Adsorption Science & Technology.* 2014. Vol. 32, № 5. P. 389-402. DOI: 10.1260/0263-6174.32.5.389.
8. **Lindholm-Lehto P.** Biosorption of heavy metals by lignocellulosic biomass and chemical analysis // *BioRes.* 2019. Vol. 14(2). P. 4952–4995. DOI: 10.15376/biores.14.2.Lindholm-Lehto.
9. **Ali A., Mannan A., Hussain I., Hussain I.** Effective removal of metal ions from aqueous solution by silver and zinc nanoparticles functionalized cellulose: Isotherm, kinetics and statistical supposition of process // *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management.* 2017. № 9. P.1-11. DOI: 10.1016/j.enmm.2017.11.003.
10. **Meretin R.N., Nikiforova T.E.** Investigation of the reactivity of the surface of a carbon-containing silicate sorbent of plant origin // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. Vol. 64, № 11. P. 147-155. DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6408
11. **Никифорова Т.Е., Вокурова Д.А.** Сорбция ионов тяжелых металлов целлюлозным сорбентом из водных растворов // *От химии к технологии шаг за шагом.* 2022. Т. 3, вып. 1. С. 8-20. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2022tom3no1>
12. **Kumar R., Sharma R.Kr., Singh A.P.** Cellulose based grafted biosorbents - Journey from lignocellulose biomass to toxic metal ions sorption applications - A review // *Journal of Molecular Liquids.* 2017. Vol. 232. P. 62-93. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.050>
13. **Podstawczyka D., Witek-Krowiak A., Dawieca A., Bhatnagar A.** Biosorption of copper(II) ions by flax meal: Empirical modeling and process optimization by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) simulation // *Ecological Engineering.* 2015. Vol. 83. P. 364-379. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.004>
14. **Kajeiou M., Alem A., Mezghich S., Ahfi 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. Vol. 260. P. 127-505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127505>
15. **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 biosorbent for treatment of heavy metal, dye and organic matter contaminated industrial wastewater // *Industrial Crops & Products.* 2021. Vol. 174. P. 114-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114195>
16. **Abbar B., Alem A., Marcotte S., Pantet A., Ahfi N.-D., Bizet L., Duriatti D.** Experimental investigation on removal of heavy metals (Cu²⁺, Pb²⁺, and Zn²⁺) from aqueous solution by flax fibres // *Process Safety and Environmental Protection.* 2017. Vol. 109. P. 639–647. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.05.012>.



17. **Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Натарева С.В., Дубкова Е.А.** Влияние плазменного модифицирования на сорбционные свойства льняного волокна // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т.57, вып. 3. С. 91-97.
18. **Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Odintsova O.I.** Regularities of Copper (II) and Nickel (II) Distribution in an Aqueous Solution - Modified Flax Fiber Heterophase System // *Russian Journal of General Chemistry*. 2017. Vol. 87, № 9. P. 2204-2211. DOI: 10.1134/S107036321709047X.
19. **Кричевский Г.Е.** Химическая технология текстильных материалов: учебник для вузов. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы технологии. Волокна. Загрязнения. Подготовка текстильных материалов. М.: РосЗИТЛП, 2000. 436 с.

Поступила в редакцию 01.07.2022

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к опубликованию 12.09.2022