



ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ХЛОПКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ АНТРАНИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ НА СОРБЦИЮ ИОНОВ Cu(II) И Fe(II)

Т. Е. Никифорова

Татьяна Евгеньевна Никифорова, д-р хим. наук, доцент

Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия, tatianaenik@mail.ru

Ключевые слова: хлопковая целлюлоза, модифицирование, антралиловая кислота, сорбция, ионы Cu(II) и Fe(II)

Аннотация. В работе выполнено модифицирование хлопковой целлюлозы антралиловой кислотой для получения нового сорбента, способного эффективно извлекать ионы тяжелых металлов из водных растворов. Модифицирование проводили в две стадии: на первой стадии получали диальдегидцеллюлозу за счет окисления целлюлозы метапериодатом натрия; на второй стадии диальдегидцеллюлозу обрабатывали антралиловой кислотой с получением готового сорбента. Определены оптимальные условия модифицирования хлопковой целлюлозы для достижения максимальной сорбции ионов железа(II) и меди(II). Исследованы равновесно-кинетические характеристики исходной и модифицированной хлопковой целлюлозы. Проведена обработка результатов кинетического эксперимента в рамках моделей кинетики псевдо-первого и псевдо-второго порядков. Сняты изотермы сорбции, проведена их обработка в рамках модели Ленгмюра и определены величины предельной сорбционной емкости (A_{∞}). Показано, что модифицирование хлопковой целлюлозы позволяет заметно повысить ее сорбционную емкость. Установлено, что A_{∞} модифицированного сорбента примерно в 4-5 раз превосходит предельную сорбционную емкость нативной хлопковой целлюлозы по отношению к ионам Cu(II) и Fe(II). Получены и сопоставлены ИК-спектры целлюлозы, модифицированной антралиловой кислотой, и нативной целлюлозы. Получены СЭМ-изображения структуры поверхности исходной хлопковой целлюлозы и модифицированного сорбента.

Для цитирования:

Никифорова Т.Е. Влияние химического модифицирования хлопковой целлюлозы антралиловой кислотой на сорбцию ионов Cu(II) и Fe(II) // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 30-39. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/issue/view/2023-4-3>

Введение

В настоящее время во всем мире наблюдается рост загрязнения окружающей среды вредными веществами различной природы – тяжелыми металлами, радионуклидами, нефтепродуктами и др. В работах, посвященных проблемам загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, отмечается их высокая токсичность для живых организмов уже в относительно низких концентрациях, а также способность к биоаккумуляции [1]. Поступление их в окружающую среду обусловлено работой различных отраслей



промышленности, автотранспорта, котельных, мусоросжигающих установок и сельского хозяйства. К естественным источникам загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами относятся извержения вулканов, разрушение горных пород и др. [2]. Для снижения экологической опасности различных производств разрабатываются и находят применение разнообразные методы удаления тяжелых металлов из сточных вод, таких как адсорбция, осаждение, ионный обмен, мембранная очистка, электрокоагуляция, электроосаждение и др. [3].

Весьма эффективным методом очистки воды, загрязненной ионами тяжелых металлов, является сорбционный метод, который позволяет извлекать загрязнения в сравнительно широком диапазоне концентраций. Сорбционный метод представляет собой перспективный подход в очистке сточных вод с экологической точки зрения. На сегодняшний день наиболее используемым адсорбентом является активированный уголь благодаря его высокой удельной поверхности. Однако применение активированного угля ограничено из-за высокой стоимости процесса его производства и регенерации. Поэтому актуальной задачей является поиск новых, более дешевых и эффективных сорбционных материалов [4].

Среди сорбентов неорганической природы широко используются мезопористый кремнезем, цеолит, магнитные адсорбенты, глинозем, глина. Современные способы синтеза минеральных сорбентов приведены в работах [5–7].

В последнее время наибольшее внимание было уделено биосорбентам полисахаридной природы, особенно агропромышленным отходам, образующимся в изобилии в процессе переработки сельскохозяйственного сырья. Сорбенты на основе растительной биомассы, в частности сельскохозяйственные отходы, широко используются исследователями как альтернатива традиционным сорбентам, благодаря их дешевизне, доступности, возобновляемости, биоразлагаемости и наличию у них сорбционного потенциала. Возможность применения в промышленных условиях и экономическая эффективность являются ключевыми факторами, играющими наиболее важную роль при подборе наиболее подходящего сорбента для биосорбции тяжелых металлов из водных стоков [8].

Адсорбционная способность биосорбентов может быть значительно улучшена химическими, физическими или биохимическими методами. Сообщается об использовании отходов агропромышленного комплекса как в немодифицированном (рисовая шелуха, хитозан, кофейный жмых, пшеничные отруби, соевая мука, измельченные косточки оливы, яблочные выжимки, биомасса грибов, дрожжи, биомасса водорослей и бактерий), так и в модифицированном виде (сахарный тростник, модифицированные пшеничные отруби, модифицированные кокосовые отходы, модифицированные отходы кожуры апельсина, модифицированные опилки, модифицированная яичная скорлупа), являющихся наиболее изученными адсорбентами [9–10].

Одним из основных преимуществ биосорбентов является то, что они нетоксичны и безопасны для человека, окружающей среды. Биосорбенты способны особенно эффективно удалять тяжелые металлы в низких концентрациях и сравнительно широко используются с этой целью [11].



Сорбционные материалы могут быть как водорастворимыми, так и нерастворимыми в воде, в том числе шитыми, они могут применяться в виде мембран, волокон, гелей или шариков [12–13]. Следует отметить, что гибридные материалы также представляют большой интерес для удаления катионов металлов из водных растворов. Включение неорганических материалов, таких как кремнезем, например, может улучшить диффузию или физические свойства, повысить стабильность сорбентов и облегчить разделение в конце процесса сорбции [14].

Известно, что эффективность сорбента зависит как от площади его удельной поверхности, так и от количества и вида сорбционных центров [14–16]. Полимерные сорбенты, несущие кислотные группы (карбоксильные, сульфогруппы и др.), вызывают большой интерес. В зависимости от характера функциональных групп, полимерный сорбент может проявлять либо хелатные свойства, либо выступать в качестве полиэлектролита, что определяет механизм связывания ионов металлов [16]. Таким образом, разработка и применение биополимерных сорбентов с кислотными функциональными группами для удаления ионов тяжелых металлов из водных растворов, в том числе из сточных вод, является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка сорбента на основе хлопковой целлюлозы, обладающего высокими сорбционными характеристиками, для эффективной очистки водных сред от ионов тяжелых металлов.

Основная часть

При выполнении экспериментальной части работы в качестве сорбента использовали хлопковую целлюлозу (ГОСТ 595-79). Для очистки от примесей целлюлозу кипятили в течение 30 минут с 5%-ным раствором NaHCO_3 при модуле раствор/сорбент 20, затем промывали дистиллированной водой до $\text{pH} = 7$ и высушивали до постоянного веса. Воздушно сухие образцы целлюлозы имели влажность 8,5%.

В качестве модифицирующих агентов использовали метапериодат натрия NaIO_4 и антраниловую кислоту $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$, для приготовления модельных растворов в экспериментах по сорбции использовали сульфаты железа и меди $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, все реактивы степени чистоты «х.ч.».

Модифицирование хлопковой целлюлозы антраниловой кислотой проводили в два этапа:

- окисление целлюлозы метапериодатом натрия с образованием диальдегидцеллюлозы;
- модифицирование диальдегидцеллюлозы антраниловой кислотой.

Окисление целлюлозы метапериодатом натрия и определение содержания альдегидных групп в сорбенте было выполнено, как описано в [17]. Полученная в ходе периодатного окисления диальдегидцеллюлоза [18] была в последующем обработана антраниловой кислотой. Для этого окисленную хлопковую целлюлозу с содержанием альдегидных групп 12% в количестве 1 г помещали в колбу, содержащую 1%-ный раствор антраниловой кислоты (модуль раствор/сорбент 50). Процесс модифицирования проводили в течение 45–60 мин при температуре 40–45 °С и $\text{pH} = 7–10$ при непрерывном перемешивании. После охлаждения модифицированный сорбент промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции и высушивали.



Кинетика и равновесие сорбции. Кинетику сорбции ионов тяжелых металлов исследовали в статических условиях при перемешивании методом ограниченного объема раствора [19]. Начальная концентрация ионов металлов (C_0) составляла $1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Через определенные промежутки времени раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем текущую концентрацию ионов металлов (C_t) методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе 210VGP.

Степень извлечения ионов металлов (α , %) определяли следующим образом:

$$\alpha = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100. \quad (1)$$

Для получения изотерм сорбции в серию пробирок помещали навески сорбента массой 0,1 г и заливали их 10 мл водного раствора сульфата металла с концентрациями металла в интервале $1,5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ моль/л и выдерживали при перемешивании до установления состояния равновесия. Затем раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем равновесную концентрацию ионов металла (C) методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе 210VGP.

Равновесную сорбционную емкость A (моль/кг) определяли по формуле

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

где C – равновесная концентрация ионов металла, моль/л; m – масса навески сорбента, г; V – объем раствора, л.

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

Обсуждение результатов

Для определения времени достижения сорбционного равновесия в гетерофазной системе «целлюлозный сорбент – водный раствор сульфата металла» были получены кинетические кривые сорбции ионов $\text{Cu}(\text{II})$ и $\text{Fe}(\text{II})$. Результаты эксперимента представлены на рис. 1.

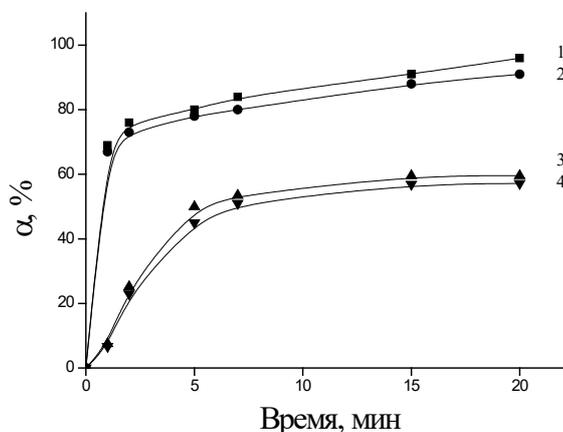


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции ионов Cu^{2+} (1, 3) и Fe^{2+} (2, 4) из водных растворов нативной (3, 4) и модифицированной (1, 2) хлопковой целлюлозой



Из рис. 1 видно, что степень извлечения ионов тяжелых металлов заметно возрастает в случае использования целлюлозы, модифицированной антралиловой кислотой, по сравнению с нативной целлюлозой. При этом время достижения сорбционного равновесия составляет 20 минут.

Для определения порядка реакции экспериментальные данные были обработаны с использованием кинетических моделей псевдо-первого (3) и псевдо-второго (4) порядков:

$$q_t = q_{eq} (1 - e^{-k_1 t}), \quad (3)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 \cdot q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}}}. \quad (4)$$

Результаты обработки кинетических кривых сорбции ионов тяжелых металлов нативной и модифицированной хлопковой целлюлозой в рамках моделей кинетики псевдо-первого и псевдо-второго порядков, выполненной с помощью программы Origin, представлены в табл. 1. Следует отметить, что наиболее высокие коэффициенты корреляции (0,99) получены при обработке данных кинетического эксперимента с использованием модели псевдо-второго порядка.

Таблица 1. Результаты обработки кинетических кривых сорбции ионов тяжелых металлов нативной и модифицированной хлопковой целлюлозой в рамках моделей химической кинетики

Ион металла	Равновесное значение сорбции	Модель псевдо-первого порядка			Модель псевдо-второго порядка		
	q_e , мг/г	q_e , мг/г	k_1 , мин ⁻¹	R^2	q_e , мг/г	k_2 , мг/мин/г	R^2
Немодифицированная целлюлоза							
Cu(II)	0,55	0,46	0,18	0,80	0,64	0,29	0,99
Fe(II)	0,53	0,49	0,18	0,89	0,62	0,23	0,99
Целлюлоза, модифицированная антралиловой кислотой							
Cu(II)	0,93	0,61	0,27	0,98	0,95	1,17	0,99
Fe(II)	0,87	0,69	0,25	0,97	0,81	1,08	0,99

Для определения предельной сорбционной емкости нативной хлопковой целлюлозы и целлюлозы, модифицированной антралиловой кислотой, были получены изотермы сорбции ионов Cu(II), Fe(II) из водных растворов их сульфатов. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Полученные экспериментальные данные можно описать уравнением изотермы адсорбции Ленгмюра

$$A = \frac{A_\infty \cdot K \cdot C_e}{(1 + K \cdot C_e)} \quad (5)$$

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

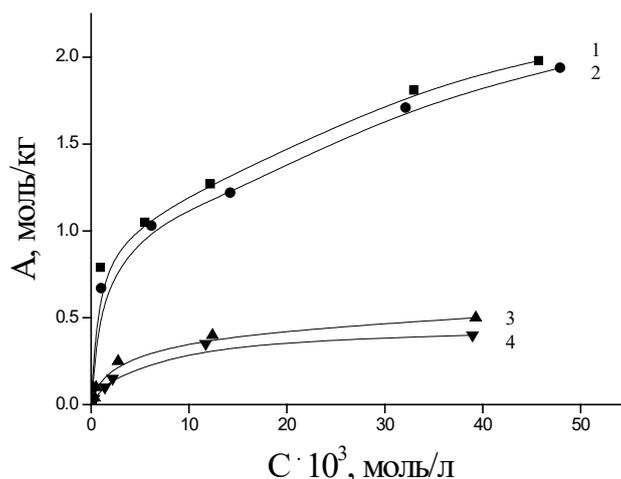


Рис. 2. Изотермы сорбции Cu^{2+} (1, 3) и Fe^{2+} (2, 4) из водных растворов нативной (3, 4) и модифицированной (1, 2) хлопковой целлюлозой

Линеаризация изотерм сорбции согласно уравнению

$$\frac{C_e}{A} = \frac{C_e}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty \cdot K} \quad (6)$$

позволяет графически определить в уравнении Ленгмюра величины A_∞ и K из опытных данных по распределению исследуемого сорбата в гетерофазной системе «водный раствор – целлюлозный сорбент».

Результаты обработки изотерм сорбции ионов тяжелых металлов по модели Ленгмюра нативной хлопковой целлюлозой и хлопковой целлюлозой, модифицированной антраниловой кислотой, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры обработки изотерм сорбции ионов тяжелых металлов нативной и модифицированной хлопковой целлюлозой по модели Ленгмюра методом наименьших квадратов

Катион металла	K , л/моль	$1/A_\infty$	Коэффициент корреляции	A_∞ , моль/кг
Немодифицированная целлюлоза				
Cu(II)	909,1	$2,0 \pm 0,02$	0.99	0.50
Fe(II)	961,5	$2,5 \pm 0,02$	0.99	0.40
Целлюлоза, модифицированная антраниловой кислотой				
Cu(II)	217,4	$0,50 \pm 0,03$	0.99	2,00
Fe(II)	325,5	$0,51 \pm 0,04$	0.98	1,96

Экспериментальные данные по сорбции ионов меди и железа нативной и модифицированной хлопковой целлюлозой хорошо аппроксимируются уравнением Ленгмюра. Как следует из данных, представленных на рис. 2 и в таблице 2, предельная сорбционная емкость (A_∞) хлопковой целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой, в четыре раза превосходит A_∞ нативной целлюлозы по ионам Cu(II) и примерно в пять раз – по ионам Fe(II) . Полученные значения $A_\infty \approx 2$ моль/кг при сорбции ионов Cu(II) и Fe(II) модифицированной целлюлозой свидетельствуют, что данный сорбент обладает хорошей связывающей способностью по отношению к этим металлам.



Существенный рост предельной сорбционной емкости модифицированной хлопковой целлюлозы по сравнению с нативной целлюлозой можно объяснить тем, что в результате модификации в структуре волокон появляются новые функциональные группы, способные эффективно связывать ионы тяжелых металлов.

Анализ ИК-спектров. Для обнаружения новых сорбционных центров, образовавшихся на поверхности сорбента в процессе модифицирования, были получены ИК-спектры исходной хлопковой целлюлозы, а также целлюлозы, окисленной метапериодатом натрия (диальдегидцеллюлозы), и целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой (рис. 3, кривые 1-3).

Сравнение полученных ИК-спектров позволяет выявить различия в исследуемых образцах целлюлозы. В области $1780\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ наличие полос поглощения обусловлено валентными колебаниями связи $\text{C}=\text{O}$ для альдегидов, кетонов и карбоновых кислот. В этой области наблюдается смещение пика при 1729 см^{-1} в положение 1741 см^{-1} для образца целлюлозы, модифицированного антраниловой кислотой, по сравнению с исходной целлюлозой, что обусловлено появлением в его структуре карбоксильных групп.

В спектре диальдегидцеллюлозы наблюдается сдвиг полосы из положения 1640 см^{-1} для исходной хлопковой целлюлозы в положение 1632 см^{-1} , связанный с появлением альдегидных групп в процессе окисления целлюлозы метапериодатом натрия.

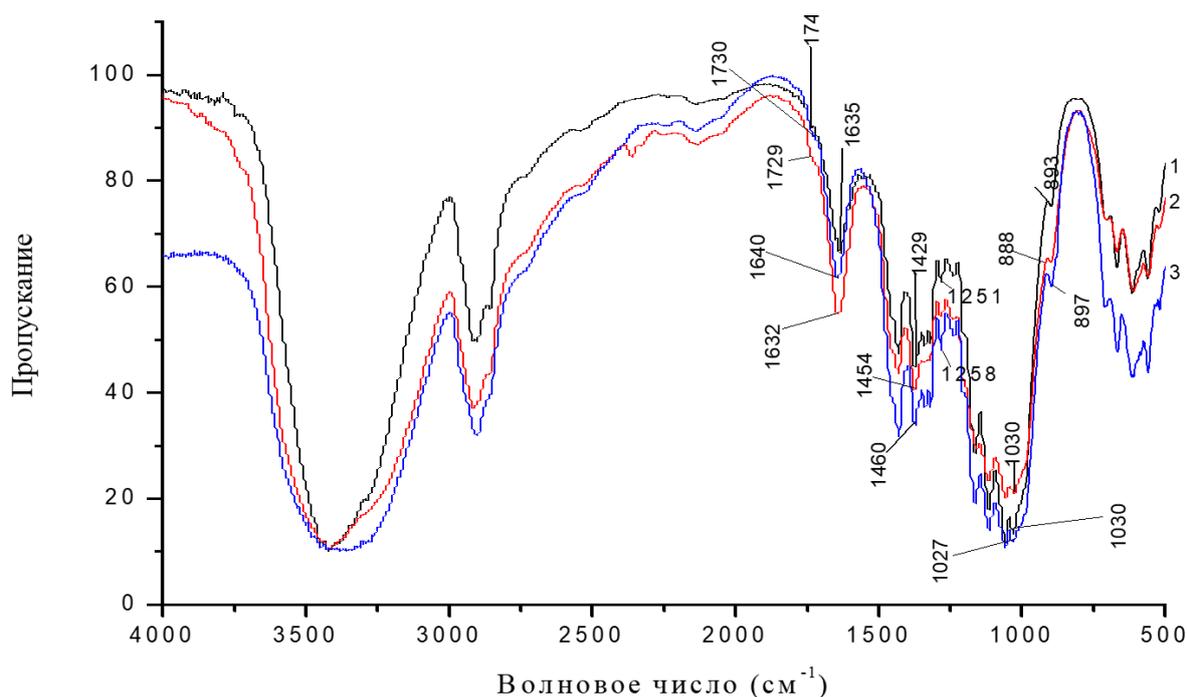


Рис. 3. ИК-спектры нативной хлопковой целлюлозы (1), диальдегидцеллюлозы (2), целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой (3)

Изменения также наблюдаются в спектре целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой, по сравнению со спектром исходной целлюлозы, в области $1300\text{--}1250\text{ см}^{-1}$, где проявляются валентные колебания связи $\text{C}\text{--}\text{N}$ в амидах. Поэтому можно утверждать, что при модифицировании сорбента на его поверхности происходит закрепление антраниловой кислоты. Таким образом, результаты ИК-спектроскопии подтверждают, что модифицирование целлюлозы антраниловой кислотой через стадию



образования диальдегидцеллюлозы приводит к появлению новых сорбционно-активных групп в структуре сорбентов.

Микроскопическое исследование структуры сорбентов. Исследование структуры поверхности исходной хлопковой целлюлозы и модифицированного сорбента методом электронной микроскопии показало, что в результате модификации изменяется микро-рельеф поверхности сорбента. Так, поверхность исходной хлопковой целлюлозы (рис. 4, а): однородна и с малым количеством складок. При модификации антраниловой кислотой поверхность сорбента становится более шероховатой, наблюдается обилие складок и чешуек (рис. 4, б), что свидетельствует об изменении поверхностного слоя.

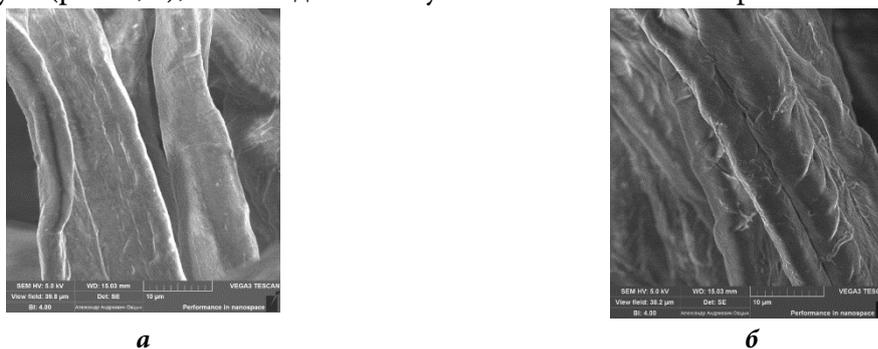


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности исходной хлопковой целлюлозы (а) и поверхности хлопковой целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой (б)

В результате модификации получен сорбент с отличной от исходной хлопковой целлюлозы структурой, характеризующийся повышенными сорбционными свойствами по отношению к ионам тяжелых металлов.

Выводы

Разработан новый эффективный сорбент для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов путем последовательной обработки хлопковой целлюлозы метапериодатом натрия и антраниловой кислотой. Исследован процесс сорбции ионов тяжелых металлов на хлопковой целлюлозе и модифицированном образце. Обнаружено, что сорбционные характеристики модифицированного сорбента по отношению к ионам Cu^{2+} и Fe^{2+} значительно превышают таковые для нативной хлопковой целлюлозы. Установлено, что кинетика сорбции ионов тяжелых металлов исследуемыми сорбентами наиболее адекватно (с коэффициентом корреляции 0,99) описывается моделью кинетики псевдо-второго порядка. Экспериментальные изотермы сорбции ионов меди и железа хорошо описываются в рамках модели Ленгмюра. Установлено, что предельная сорбционная емкость хлопковой целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой, возрастает по сравнению с нативной хлопковой целлюлозой для ионов Cu^{2+} и Fe^{2+} с 0,5 и 0,4 моль/кг до 2 и 1,96 моль/кг соответственно.

ИК-спектры образцов исходной целлюлозы и целлюлозы, модифицированной антраниловой кислотой, свидетельствуют о появлении в структуре сорбента новых сорбционно-активных групп.



Микроскопические исследования по методу СЭМ показывают наличие изменений структуры поверхности сорбционного материала на основе хлопковой целлюлозы по сравнению с исходным образцом.

Благодарности

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. Humelnicu D., Lazar M.M., Ignat M., Dinu I.A., Dragan E.S., Dinu M.V. Removal of heavy metal ions from multi-component aqueous solutions by eco-friendly and low-cost composite sorbents with anisotropic pores // *J. Haz. Mat.* 2019. Vol. 381. 120980. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120980>
2. 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. 102148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102148>
3. Agarwal A., Upadhyay U., Sreedhar I., Singh S.A., Patel C.M. A review on valorization of biomass in heavy metal removal from wastewater // *J. Water Proc. Eng.* 2020. Vol. 38. 101602. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101602>
4. Meseldzija S., Petrovic J., Onjia A., Volkov-Husovic T., Nesic A., Vukelic N. Utilization of agro-industrial waste for removal of copper ions from aqueous solutions and mining-wastewater // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2019. Vol. 75. P. 246–252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.031>
5. Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е. Исследование стадий термической обработки и гидротермальной кристаллизации при получении гранулированного цеолита NAA из механоактивированного метакеолина // *Журнал прикладной химии.* 2013. Т. 86, № 3. С. 360-366.
6. Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е., Жидкова А.Б. Синтез гранулированных цеолитов со структурой NAA из каолина // *Изв. вузов. Химия и химическая технология.* 2011. Т. 54, № 12. С. 77-80.
7. 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. Vol. 129, no. 3. P. 1415-1427.
8. Saavedra M.I., Miñarro M.D., Angosto J.M., Fernández-López J.A. Reuse potential of residues of artichoke (*Cynara scolymus* L.) from industrial canning processing as sorbent of heavy metals in multimetallic effluents // *Industrial Crops & Products.* 2019. Vol. 141. 111751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111751>
9. Shrestha R., Ban S., Devkota S., Sharma S., Joshi R., Tiwari A.P., Kim H.Y., Joshi M.K. Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review // *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2021. Vol. 9, iss. 4. 105688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105688>
10. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Родионова М.В., Модина Е.А. Сорбция ионов цинка продуктами, содержащими целлюлозную и белковую составляющие // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2009. Т. 52. Вып. 3. С. 27-31.
11. Nazaripour M., Reshadi M.A.M., Mirbagheri S.A., Nazaripour M., Bazargan A. Research trends of heavy metal removal from aqueous environments // *Journal of Environmental Management.* 2021. Vol. 287. 112322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112322>
12. Kozlov V.A., Nikiforova T.E., Loginova V.A., Koifman O.I. Mechanism of protodesorption – exchange of heavy metal cations for protons in a heterophase system of H₂O-H₂SO₄-MSO₄ – cellulose sorbent // *Journal of Hazardous Materials.* 2015. Vol. 299, P. 725-732. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.004.



13. **Singha B., Das S.K.** Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013. Vol. 107. P. 97–106. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.060>
14. **Никифорова Т.Е., Козлов В.А.** Сопоставление моделей сорбции катионов меди (II) и никеля (II) из водных растворов хлопковой целлюлозой // *Журнал физической химии*. 2012. Т. 86, № 10. С. 1724-1729.
15. **Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Исляйкин М.К.** Кислотно-основные взаимодействия и комплексообразование при извлечении катионов меди (II) из водных растворов целлюлозным сорбентом с участием поливинилпирролидона // *Журнал физической химии*. 2012. Т. 86, № 12. С. 1974-1984.
16. **Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Islyaikin M.K.** Acid-base interactions and complex formation while recovering copper(ii) ions from aqueous solutions using cellulose adsorbent in the presence of polyvinylpyrrolidone // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2012. Vol. 86, № 12. P. 1836-1846.
17. **Beaugeard V., Muller J., Graillet A., Ding X., Robin J.-J., Monge S.** Acidic polymeric sorbents for the removal of metallic pollution in water: A review // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. Vol. 152 (3). 104599. URL: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104599>
18. **Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Софронов А.Р.** Влияние химического модифицирования хлопковой целлюлозы аминокислотой на сорбцию ионов Cu(II) и Fe(II) // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2023. Т. 4, вып. 1. С. 32-42. URL: <http://chemintech.ru/index.php/tor/2023-4-1>
19. **Klemm D., Philipp B., Heinze D., Heinze U. and Wagenknecht W.** Comprehensive cellulose chemistry. Vol. 1: Fundamentals and Analytical Methods. Wiley-WCH, Weinheim, Germany, 1998. 282 p.
20. **Кокотов Ю.А., Пасечник В.А.** Равновесие и кинетика ионного обмена. Л.: Химия, 1970. 336 с.
21. **Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.

Поступила в редакцию 10.08.2023

Одобрена после рецензирования 18.08.2023

Принята к опубликованию 08.09.2023