

УДК 628.349

DOI: 10.15372/KhUR20180404

Сорбция тяжелых металлов карбамидсодержащим сорбентом из коры осины

Е. В. ВЕПРИКОВА, Н. В. ЧЕСНОКОВ

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН,
Красноярск (Россия)**E-mail: veprikova2@mail.ru*

(Поступила 20.04.18; после доработки 13.07.18)

Аннотация

Изучена сорбционная активность карбамидсодержащего сорбента из коры осины в отношении никеля, цинка и свинца из водных растворов с различной концентрацией металлов. Выявлено влияние содержания мочевины в сорбенте из коры осины на его сорбционную активность в отношении исследуемых примесей. Показано, что адсорбционное нанесение 10.7 мас. % мочевины на носитель из коры осины приводит к увеличению емкости сорбента в 1.9–3.3 раза в зависимости от природы металла. Установлено, что полученный сорбент из коры осины характеризуется высокой сорбционной емкостью: предельная сорбция по свинцу, цинку и никелю составляет 91.17, 25.78 и 23.34 мг/г соответственно. Приведены данные по кинетике сорбции металлов и их анализа с помощью моделей псевдопервого и псевдovторого порядка. Определены значения рН водных растворов, обеспечивающие эффективную сорбцию исследованных металлов: рН 5.5–6.0 для растворов цинка и рН 5.5–7.0 для растворов свинца и никеля. Показано, что карбамидсодержащий сорбент из коры осины эффективен для очистки низкоконцентрированных растворов металлов: для растворов, содержащих 10.5 и 1.0 мг/л примесей, степень очистки составляет не менее 66.7 и 89.9 % соответственно. При изучении процессов сорбции никеля, цинка и свинца выявлена устойчивость разработанного карбамидсодержащего сорбента к вымыванию мочевины, что в сочетании с высокой сорбционной емкостью определяет перспективность его использования для доочистки воды технического назначения от примесей металлов.

Ключевые слова: кора осины, карбамидсодержащий сорбент, никель, цинк, свинец, сорбция

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами представляет опасность для устойчивого функционирования различных объектов биосферы. Основным источником их поступления служат сточные воды различных производств, стоки с полигонов хранения промышленных отходов и др. Своевременная и эффективная очистка сточных вод позволяет предотвратить попадание поллютантов в окружающую среду. Важное место в современных технологиях комплексного удаления тяжелых металлов из водных сред занимают сорбционные методы [1], причем в качестве сор-

бентов могут применяться дешевые и доступные материалы – отходы переработки агрокомплекса, деревопереработки, растительной биомассы [2–5].

Обзор литературы показал, что применение отходов деревопереработки, в том числе и отходов коры, с целью создания новых сорбентов для удаления тяжелых металлов остается перспективным направлением их утилизации [6–8]. Химическая модификация лигноцеллюлозных материалов способствует значительному увеличению сорбционной емкости сорбентов в отношении различных металлов [9, 10].

В работе [11] показано, что обработка целлюлозных отходов (древесных опилок, льно-

тресты и др.) смесью мочевины с фосфорной кислотой позволяет получать сорбенты, способные поглощать из водных растворов медь, цинк, кадмий, никель и другие металлы. Такие азотсодержащие сорбенты эффективны при очистке воздуха от примесей формальдегида и аммиака. Показано [12], что обработка коры осины водным раствором мочевины существенно улучшает ее сорбционные свойства в процессе очистки водных растворов от меди, никеля, цинка и свинца. Кроме того, уменьшается содержание полифенольных водорастворимых веществ в модифицированной коре, что повышает безопасность применения сорбента. Результаты исследований [13] доказали высокую эффективность карбамидсодержащего сорбента для удаления из водных сред меди и свинца. Приводимые в литературе данные указывают на потенциал мочевины как модифицирующего вещества для получения эффективных сорбентов на основе отходов биомассы.

Многотоннажные отходы коры осины – дешевый и доступный сырьевой ресурс для создания сорбционных материалов различного назначения. Предложен способ получения пористых подложек из коры осины, на основе которых можно конструировать различные биокomпозитные материалы [14]. Удаление полифенольных веществ придает подложкам из коры осины развитую текстуру, благодаря чему их можно применять в качестве сорбентов.

Цель работы – изучение сорбции никеля, цинка и свинца из водных растворов карбамидсодержащим сорбентом, полученным на основе коры осины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходным сырьем для получения сорбента служила воздушно-сухая кора осины. Масовое соотношение коры и луба в сырье составляло 60.6 и 39.4 мас. % соответственно. Кору измельчали на дезинтеграторе марки Nossen (Германия), отбирали фракцию 0.5–1.0 мм, обрабатывали 1 % водным раствором NaOH аналогично методике, описанной в [14]. Значение гидромодуля на стадии щелочной обработки было равно 15, на остальных стадиях – 10. Полученный образец сушили до воздушно-сухого состояния при $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$ и ис-

пользовали для нанесения мочевины сорбционным способом. Для нанесения 5.0, 7.5 и 10.7 мас. % мочевины применяли ее водные растворы с концентрацией 1.5, 3.0 и 5.0 % соответственно. Растворы мочевины содержали фоновый электролит – 1.5 мас. % NaCl. Сорбционное нанесение мочевины проводили следующим образом: в 100 см^3 подготовленного раствора вносили 2 г образца из коры; продолжительность процесса составляла 24 ч при комнатных условиях и периодическом перемешивании. По завершении процесса карбамидсодержащие образцы отфильтровывали и обрабатывали 0.25 % раствором сульфата натрия (гидромодуль 3, продолжительность обработки 30 мин). Остатки соли отмывали дистиллированной водой при следующих условиях: двукратная промывка при гидромодуле 10; продолжительность каждой промывки 45 мин; температура комнатная; перемешивание. После отделения от промывных вод карбамидсодержащие сорбенты сушили до воздушно-сухого состояния при $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Содержание мочевины в получаемых сорбентах определяли по изменению ее концентрации в исходных растворах с учетом потерь на стадиях обработки раствором сульфата натрия и промывки сорбента водой. Количественный анализ водных растворов для определения азота мочевины (по содержанию биурета) проводили фотометрическим методом согласно ГОСТ 32555–2013. Количество мочевины в сорбенте рассчитывали следующим образом:

$$Q_r = 100 (Q_{ur}^1 - Q_{ur}^2) / m \quad (1)$$

где Q_{ur}^1 – количество сорбированной мочевины, мг; Q_{ur}^2 – общее количество мочевины в промывных водах, мг; m – масса образца, мг.

Дополнительно определяли содержание азота в карбамидсодержащих сорбентах с помощью анализатора FLASH TFTM–1112 (Италия).

Сорбцию Zn^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} проводили из растворов соответствующих нитратов в статических условиях при комнатной температуре и непрерывном перемешивании. Соотношение сорбента и раствора соли металла составляло 0.2 г к 50 мл. Кинетики сорбции металлов изучали в условиях опытов с исходной концентрацией металлов в растворах 750.0 мг/л, продолжительность процесса ва-

рировала от 5 до 120 мин. В остальных экспериментах продолжительность сорбции составляла 60 мин. Влияние параметра pH растворов на сорбцию металлов изучали при pH 3.5–7.0. В остальных экспериментах кислотность растворов составляла pH 6.0. Изотермы сорбции получали с применением модельных растворов (pH 6.0) с исходной концентрацией металлов 11.5–750.0 мг/л.

Изменение концентрации Zn^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} в модельных растворах в процессе сорбции определяли атомно-абсорбционным методом на приборе Analyst-400. По этой величине общепринятым способом рассчитывали их сорбцию A . Также в растворах после сорбции определяли содержание мочевины вышеуказанным способом.

Степень заполнения поверхности сорбента F определяли по отношению сорбции A_t в момент времени t к равновесной сорбционной емкости A_p [15]:

$$F = A_t/A_p \quad (2)$$

Для обработки данных по кинетике сорбции Zn^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} применяли модели псевдопервого

$$A_t = A_p (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

и псевдovторого порядка [15]:

$$t/A_t = (k_2 A_p^2)^{-1} + t/A_p \quad (4)$$

где A_t – сорбция в момент времени t , мг/г; A_p – равновесная сорбция, мг/г; t – время, мин; k_1 – константа скорости сорбции модели псевдопервого порядка, мин⁻¹; k_2 – константа скорости сорбции модели псевдovторого порядка, г/(мг · мин).

По уравнению изотермы сорбции Ленгмюра, приведенному к линейному виду, методом наименьших квадратов вычислены соответствующие коэффициенты для процессов сорбции исследуемых металлов [12]:

$$A^{-1} = (A_{\infty} K_L)^{-1} C_p^{-1} + A_{\infty}^{-1} \quad (5)$$

где A – сорбция, мг/г; A_{∞} – предельная сорбция, мг/г; C_p – равновесная концентрация Zn^{2+} (Ni^{2+} , Pb^{2+}) мг/л; K_L – константа уравнения Ленгмюра, л/мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что увеличение сорбции исследуемых металлов сорбентом из коры осины зависит от содержания в нем мочевины и природы исследуемого иона металла (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1

Сорбционная емкость сорбента из коры осины при различном содержании в нем мочевины

Содержание мочевины в сорбенте, мас. %	Сорбция ⁺ , мг/г		
	Ni ²⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺
0	9.74	10.37	14.47
5.0	9.84	11.08	15.44
7.5	12.28	17.65	24.31
10.7	18.25	22.43	47.55

Примечание. Продолжительность сорбции 60 мин, pH 6.0, исходная концентрация металлов 750.0 мг/л.

При увеличении содержания мочевины в сорбенте до 7.5 мас. % сорбция цинка и свинца возрастает в 1.7 раза, а никеля – в 1.26 раза. Максимальное количество мочевины, которое удалось нанести адсорбционным способом, составило 10.7 мас. %. При этом сорбционная емкость сорбента в отношении никеля, цинка и свинца возросла в 1.9, 2.2 и 3.3 раза соответственно (см. табл. 1).

Повышение сорбции металлов сорбентом, содержащим мочевины, обусловлено ее способностью образовывать комплексные соединения с исследуемыми металлами. Так, в литературе описаны комплексы цинка, содержащие от 1 до 2 молекул мочевины [16, 17]. Комплексы с никелем могут содержать в координационной сфере до 10 молекул мочевины [18]. По-видимому, именно различие в составе комп-

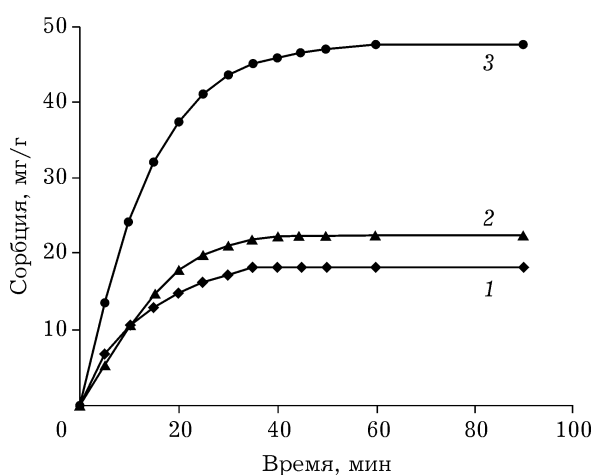


Рис. 1. Кинетика сорбции металлов карбамидсодержащим сорбентом из коры осины: 1 – никель, 2 – цинк, 3 – свинец.

лексов определяет разную сорбционную емкость карбамидсодержащего сорбента в отношении Ni^{2+} и Zn^{2+} .

Анализ данных рис. 1 показывает, что равновесие в случае сорбции никеля и цинка карбамидсодержащим сорбентом (10.7 мас. % мочевины) устанавливается быстрее (в течение 40 мин) по сравнению с процессом сорбции свинца. В случае сорбции Pb^{2+} равновесие достигается через 60 мин. Период полусорбции никеля составляет 8, свинца – 9.5, цинка – 11 мин.

Представление полученных результатов в координатах $F - t^{1/2}$ выявило, что сорбция никеля характеризуется максимальной степенью заполнения поверхности сорбента в период времени до 900 с (рис. 2).

Линейный характер начальных участков зависимостей $F - t^{1/2}$ указывает на значительный вклад внутридиффузионных процессов на сорбцию исследуемых металлов карбамидсодержащим сорбентом из коры осины.

Последующее искривление и появление линейных участков с меньшим углом наклона свидетельствует о том, что диффузия в порах сорбента ограничивает общую скорость процессов сорбции металлов [15, 19]. Очевидно, такое влияние более значимо в случае сорбции свинца, на что указывает выраженный пологий участок зависимости степени заполнения поверхности сорбента F от $t^{1/2}$

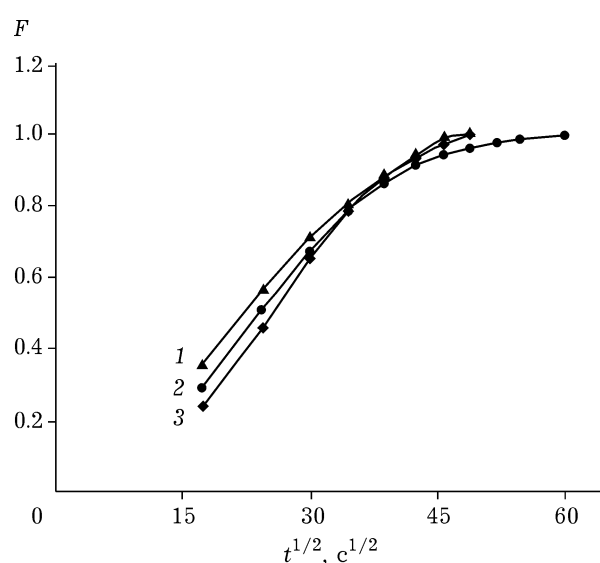


Рис. 2. Зависимость степени заполнения поверхности (F) карбамидсодержащего сорбента из коры осины от периода полусорбции металла $t^{1/2}$: 1 – никель, 2 – цинк, 3 – свинец.

(см. рис. 2, кривая 3). Выявленное влияние диффузионных процессов на сорбцию Pb^{2+} обусловлено его ионным радиусом, равным 1.21 Å (по Полингу) и превышающим ионные радиусы Ni^{2+} и Zn^{2+} (0.69 и 0.74 Å соответственно) в среднем в 1.7 раза. Очевидно, размер ионов свинца в большей мере затрудняет их транспорт к центрам адсорбции в порах сорбента, поэтому для достижения сорбционного равновесия необходимо в 1.2 раза больше времени по сравнению с сорбцией никеля и цинка.

Следует отметить, что полученные для никеля, цинка и свинца зависимости степени заполнения поверхности от $t^{1/2}$ не выходят из начала координат (см. рис. 2). Отрезки времени, отсекаемые на оси абсцисс при условии $F = 0$ и равные 12, 83 и 36 с для Ni^{2+} , Zn^{2+} и Pb^{2+} соответственно, могут быть обусловлены транспортом ионов металлов через диффузионный слой на поверхности сорбента. Таким образом, на сорбцию исследуемых металлов влияет совокупность процессов внешней и внутренней диффузии [15, 19].

Мочевина, находящаяся на поверхности сорбента из коры осины, способна образовывать с исследуемыми металлами комплексные соединения, что также может влиять на скорость сорбционных процессов. Для определения лимитирующей стадии применен графоаналитический метод обработки экспериментальных данных по кинетике сорбции исследуемых металлов с помощью моделей псевдопервого (уравнение (3)) и псевдвторого (уравнение (4)) порядка. Согласно модели псевдопервого порядка лимитирующей стадией являются диффузионные процессы. Модель псевдвторого порядка предполагает, что химическое взаимодействие лимитирует процесс сорбции. Линейный характер зависимостей в координатах $\lg(A_p - A_t) - t$ или $t/A_t - t$ указывает на возможность применения моделей псевдопервого или псевдвторого порядка для интерпретации полученных кинетических данных. Следует отметить, что эти модели наиболее часто используются для описания процессов сорбции металлов на различных сорбентах [15, 19, 20].

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по кинетике сорбции Ni^{2+} , Zn^{2+} и Pb^{2+} выбранными моделями приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Параметры кинетических уравнений сорбции никеля, цинка и свинца карбамидсодержащим сорбентом из коры осины (исходная концентрация металлов в растворе 750.0 мг/л)

Металл	$A_p^{экс}$, мг/г	Псевдопервый порядок			Псевдовторой порядок		
		A_p , мг/г	K , мин ⁻¹	R^2	A_p , мг/г	K , г/(мг · мин)	R^2
Никель	18.25	40.54	0.1566	0.816	25.06	0.0029	0.998
Цинк	22.43	28.93	0.0923	0.994	38.61	0.0009	0.956
Свинец	47.55	55.49	0.0875	0.999	60.61	0.0012	0.989

Примечание. Здесь и в табл. 3: $A_p^{экс}$ и A_p – экспериментальное и расчетное значения равновесной сорбции соответственно; R^2 – коэффициент детерминации.

Сравнение коэффициентов детерминации R^2 и расчетных значений равновесной сорбции A_p показало, что кинетика сорбции цинка и свинца достоверно описывается моделью псевдопервого порядка (см. табл. 2). В сочетании с данными рис. 2 это подтверждает, что их сорбция контролируется диффузионными процессами. Кинетика сорбции никеля соответствует модели псевдовторого порядка ($R^2 = 0.998$), что говорит о влиянии его химического взаимодействия с сорбентом на общую скорость процесса. Учитывая установленный для Ni^{2+} характер зависимости $F - t^{1/2}$, можно предположить, что его сорбция карбамидсодержащим сорбентом из коры осины протекает в смешанном режиме.

Установлено, что для описания кинетики сорбции никеля из растворов с меньшей концентрацией более подходит модель псевдопервого порядка. В случае аппроксимации кинетических данных моделью псевдовторого порядка получены высокие коэффициенты детерминации, но наблюдается большее расхождение зна-

чений расчетной и экспериментальной равновесной сорбции (табл. 3). Вероятно, с уменьшением содержания никеля в растворе растет влияние диффузионных процессов на его сорбцию.

Процессы поглощения Ni^{2+} , Zn^{2+} и Pb^{2+} из растворов с исходной концентрацией металлов 11.5–750.0 мг/л (рН 6.0) описываются изотермами I типа по классификации БЭТ, что указывает на монослойную сорбцию этих ионов (рис. 3).

Данные табл. 4 показывают, что полученные изотермы с высокой степенью аппроксимации согласуются с уравнением Ленгмюра.

В случае сорбции никеля и цинка экспериментальные значения максимальной сорбции $A_{макс}^{экс}$ близки к расчетным значениям предельной сорбции A_{∞} . Их соотношение равно 0.78 и 0.87 соответственно, что свидетельствует о высокой степени заполнения сорбционного слоя в изученных условиях. Сравнение констант равновесия K_L позволяет предположить, что поглощение цинка сорбентом из коры осины характеризуется большей теплотой сорбции по сравнению с другими металлами [2].

ТАБЛИЦА 3

Параметры кинетических уравнений сорбции никеля из растворов с различной исходной концентрацией карбамидсодержащим сорбентом из коры осины

Исходная концентрация Ni^{2+} , мг/л	$A_p^{экс}$, мг/г	Псевдопервый порядок			Псевдовторой порядок		
		A_p , мг/г	K , мин ⁻¹	R^2	A_p , мг/г	K , г/(мг · мин)	R^2
200.0	11.75	12.78	0.0894	0.995	18.98	0.0028	0.989
400.0	16.22	18.28	0.0914	0.997	24.15	0.0024	0.991

Примечание. Обозн. см. табл. 2.

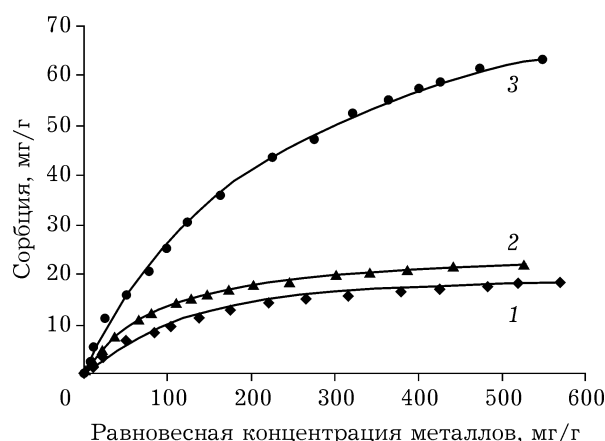


Рис. 3. Изотермы сорбции металлов из водных растворов карбамидсодержащим сорбентом из коры осины: 1 – никель, 2 – свинец, 3 – цинк. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные.

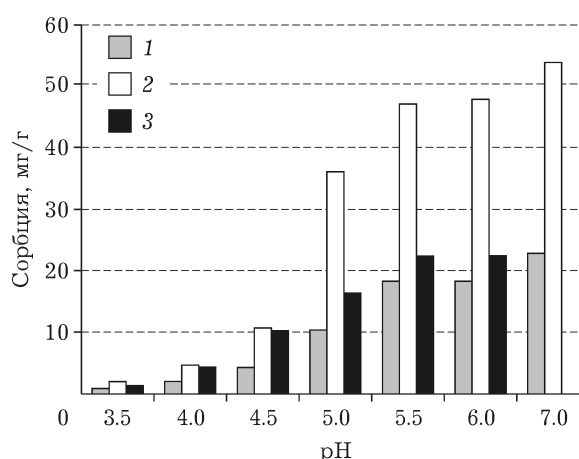


Рис. 4. Зависимость сорбции металлов карбамидсодержащим сорбентом из коры осины от pH модельных растворов: 1 – никель, 2 – свинец, 3 – цинк.

Установлено, что характер влияния pH растворов на сорбцию исследуемых металлов на карбамидсодержащем сорбенте из коры осины не зависит от их природы (рис. 4).

Существенное уменьшение сорбции никеля, цинка и свинца наблюдается при уменьшении параметра pH от pH 5.0 до pH 3.5. Уже при снижении с pH 5.5 до pH 5.0 сорбция никеля уменьшается в 1.8 раза, а свинца и цинка – всего лишь в 1.3 и 1.4 раза соответственно. Такое различие наблюдается и при pH 4.5. Это хорошо согласуется со значениями ионных индексов исследуемых металлов, которые отражают степень вовлечения ионов в электростатические взаимодействия [12]. Никель характеризуется максимальным значением этого параметра по сравнению с другими металлами. Очевидно, что эффекты взаимодействия

Ni^{2+} с поверхностью сорбента, степень протонирования которой будет увеличиваться с повышением кислотности растворов, в большей мере затрудняют его сорбцию.

С повышением кислотности растворов растет и степень протонирования мочевины, находящейся на поверхности сорбента из коры осины. Это препятствует присоединению ионов металлов к атому кислорода карбонильной группы мочевины, что также негативно влияет на их сорбцию разработанным сорбентом.

Карбамидсодержащий сорбент из коры осины характеризуется очень низкой сорбционной емкостью по исследованным металлам при pH 3.5 – не более 1.8 мг/г (см. рис. 4), поэтому их применение для очистки кислых сточных вод нецелесообразно. Для эффективного удаления никеля и свинца из водных

ТАБЛИЦА 4

Параметры изотермы Ленгмюра для сорбции никеля, цинка и свинца карбамидсодержащим сорбентом из коры осины

Сорбируемые металлы	$A_{\text{макс}}^{\text{экс}}$, мг/г	Параметры изотермы		
		A_{∞} , мг/г	$K_L \cdot 10^{-2}$	R^2
Никель	18.25	23.34	0.736	0.979
Цинк	22.43	25.78	1.14	0.993
Свинец	47.55	91.17	0.41	0.995

Примечание. $A_{\text{макс}}^{\text{экс}}$ – экспериментальная максимальная сорбция; R^2 – коэффициент детерминации.

растворов можно рекомендовать интервал значений рН 5.5–7.0, а для цинка – рН 5.5–6.0. Следует отметить, что для цинка понижение кислотности возможно только до рН 6.3. Далее начинается выпадение осадка гидроксида, что ведет к искажению результатов по определению сорбционной емкости, поскольку концентрация металла в растворе изменялась за счет осаждения и собственно сорбции. Из-за невозможности отделить осадок от частиц сорбента не удалось разделить вклад этих процессов в изменение концентрации цинка в растворах с рН > 6.3, что необходимо для определения сорбционной емкости изучаемого сорбента. По той же причине нецелесообразно снижать кислотность растворов рН > 7.4 в случае никеля и свинца.

Известно, что применение сорбентов на основе лигноцеллюлозного сырья наиболее эффективно для очистки растворов с низкой концентрацией токсичных металлов (1.0–10.5 мг/л) [21, 22]. Такие растворы моделируют стоки некоторых технологических процессов – промывные воды переработки металлосодержащего вторичного сырья, гальванопроизводств и др.

Установлено, что степень очистки растворов от никеля и цинка растет по мере уменьшения их исходного содержания, а на очистку от свинца концентрация растворов слабо влияет (табл. 5). Данные табл. 5 получены для растворов никеля и свинца с рН 7.0, а цинка – с рН 6.0.

Карбамидсодержащий сорбент из коры осины наиболее эффективен для очистки модельных растворов с концентрацией металлов, равной 1.0 мг/л. При этом степень очист-

ки для различных металлов примерно одинакова. Отметим, что в этом случае разработанный сорбент по способности удалять цинк и свинец превосходит окисленный активный уголь БАУ_{ок}, свойства которого приведены в работе [21].

Следует отметить, что независимо от условий проведения экспериментов по сорбции металлов (концентрации металлов, продолжительности и значений рН) мочевины не переходит в раствор, а это говорит о ее прочном закреплении на поверхности сорбента из коры осины. В сочетании с высокой сорбционной емкостью это определяет потенциал карбамидсодержащего сорбента из коры осины для доочистки воды от примесей никеля, цинка и свинца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что адсорбционное нанесение мочевины на носитель из коры осины позволяет получать сорбент, способный поглощать никель, цинк и свинец из водных растворов с различной концентрацией металлов. Введение 10.7 мас. % мочевины повышает его сорбционную емкость в отношении никеля, цинка и свинца в 1.9, 2.2 и 3.3 раза соответственно. По способности сорбироваться на полученном материале металлы образуют следующий ряд: $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$. Исследования показали, что равновесие в процессе сорбции никеля и цинка достигается через 40 мин, а свинца – через 60 мин.

Установлено, что эффективная сорбция свинца и никеля происходит при кислотности водных растворов рН 5.5–7.0, а цинка – при рН 5.5–6.0. Показано, что карбамидсодержащий сорбент из коры осины эффективен для очистки низкоконцентрированных растворов металлов: степень очистки составляет не менее 66.7 % для растворов, содержащих 10.5 мг/л примесей металлов, и не менее 89.9 % – с концентрацией 1.0 мг/л.

Устойчивость сорбента к вымыванию мочевины и высокая сорбционная емкость определяют перспективность его применения для доочистки воды технического назначения от примесей никеля, цинка и свинца.

ТАБЛИЦА 5

Результаты очистки низкоконцентрированных модельных растворов от никеля, цинка и свинца карбамидсодержащим сорбентом из коры осины

Металл	Степень очистки, %		
	Исходная концентрация C_0 , мг/л		
	10.5	5.5	1.0
Никель	66.7	73.6	89.9
Цинк	76.2	85.7	91.2 (63.8)*
Свинец	90.4	91.4	92.6 (86.6)*

* Приведены значения степени очистки для БАУ_{ок} [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лупандина Н. С., Свергузова Ж. А. // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 4. С. 19–22.
- 2 Никифорова Т. Е., Козлов В. А. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52, № 3. С. 243–271.
- 3 Алексеева А. А., Шайхиев И. Г., Степанова С. В. // Изв. Уфимского научного центра РАН. 2015. № 3. С. 19–30.
- 4 Masato Igura, Masanori Okazaki. // J. Hazardous Materials. 2010. Vol. 178. P. 686–692.
- 5 Garcia A., Barrera N., Camacho G. P. // Environ. Monitoring and Assessment. 2014. Vol. 186, Iss. 10. P. 6207–6221.
- 6 Родионова Д. С., Широких Т. В., Девятерикова С. В., Казиенков С. А., Земцова Е. А., Мусихина Т. А. // Adv. Sci. 2017. № 3. С. 78–85.
- 7 Su W., Yang Y., Dai H., Jiang L. // BioResources. 2015. Vol. 10, Iss. 4. P. 6993–7008.
- 8 Pingping Su, Kim Granholm, Andrey Pranovich, Leo Harju, Bjarne Holmbom, Ari Ivaska // Wood Sci. Technol. 2013. Vol. 47, Iss. 5. P. 1086–1097.
- 9 Дейнеко И. П., Симонова А. Н. // Химия раст. сырья. 2015. № 3. С. 35–42.
- 10 Kong W., Ren J., Wang S., Chen Q. // BioResources. 2014. Vol. 9, Iss. 2. P. 3184–3196.
- 11 Жукова И. Л., Орехова С. Е., Хмылко Л. И. // Экология и пром-сть России. 2009. № 6. С. 30–33.
- 12 Хохотва А. П. // Химия и технология воды. 2010. Т. 32, № 6. С. 604–612.
- 13 Pyasova R. R., Gametdinova Yu. M., Massalimov I. A., Mustafin A. G. // Russian J. Phys. Chem. 2017. Vol. 11, Iss. 4. P. 704–707.
- 14 Веприкова Е. В., Королькова И. В., Чесноков Н. В., Кузнецов Б. Н. // Журн. Сиб. фед. ун-та. Химия. 2017. Т. 10, № 4. С. 501–513.
- 15 Teixeira R. N. P., Souse Neto V. O., Oliveira J. T., Oliveira T. C., Melo D. Q., Siela M. A. A., Nascimento R. T. // BioResources. 2013. Vol. 8, Iss. 3. P. 3556–3573.
- 16 Фурманова Н. Г., Реснявский В. Ф., Сулайманкулова Д. К., Жоробекова Ш. Ж., Сулейманкулов К. С. // Кристаллография. 2001. Т. 46, № 1. С. 58–62.
- 17 Furmanova N. G., Resnyanski V. F., Sulaimankulov K. S., Sulaimankulova D. K., Zhorobekova Sh. Zh. // Crystallography Reports. 1998. Vol. 43, No. 2. P. 234–236.
- 18 Харитонов Ю. Я. // Соров. образов. журн. 1996. № 1. С. 48–56.
- 19 Li-e Liu, Jindun Liu, Hongping Li, Haoqin Zhahg, Jie Liu, Hongquen Zhang // BioResources. 2012. Vol. 7, Iss. 3. P. 3555–3572.
- 20 Буравлев И. Ю., Кондратюк Е. В., Комарова Л. Ф. // Химия и технология воды. 2013. Т. 35, № 3. С. 203–211.
- 21 Веприкова Е. В., Кузнецова С. А., Чесноков Н. В. // Журнал Сиб. фед. ун-та. Химия. 2015. Т. 8, № 2. С. 501–513.
- 22 Багровская Н. А., Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Линин С. А. // Химия уст. разв. 2006. Т. 14, № 1. С. 1–7.