

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.74.78.009

УДК 628.33:661.8

© Е.С. Дремичева, 2021

Е.С. ДРЕМИЧЕВА

канд. техн. наук, доцент,
начальник отдела НИРС,
доцент кафедры КГЭУ, г. Казань
e-mail: lenysha@mail.ru



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРФА И ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

В статье рассмотрен адсорбционный метод очистки сточных вод промышленных предприятий от ионов тяжелых металлов. Проведены экспериментальные исследования по очистке модельных растворов, содержащих ионы железа (III) и хрома (VI). В качестве сорбентов выбраны органические материалы — торф и древесные опилки. Экспериментальные исследования по оценке сорбционных свойств проводились в статических условиях. Полученные в результате экспериментов данные позволили провести расчеты равновесных и термодинамических характеристик. Построены графики зависимости эффективности очистки от продолжительности контакта сорбента с водным раствором, содержащим соли тяжелых металлов, а также адсорбционной емкости и коэффициента распределения. Оценено оптимальное время контакта сорбента и раствора. Рассмотрены модели механизмов сорбции, по проведенным расчетам были описаны механизмы сорбции ионов железа (III) и хрома (VI) на торфе и опилках.

Ключевые слова: АДСОРБЦИЯ, СТАТИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ, ИОНЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, ТОРФ, ДРЕВЕСНЫЕ ОПИЛКИ, СТЕПЕНЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, РАВНОВЕСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МОДЕЛЬ СОРБЦИИ.

Источниками появления в природной воде тяжелых металлов являются сброс недостаточно очищенных или неочищенных сточных вод, образующихся на предприятиях различных отраслей промышленности, к числу которых относят машиностроение, химическую и нефтехимическую, металлургическую промышленности и т. д. Также значительное количество ионов тяжелых металлов попадают в воду в результате коррозии оборудования. Следует отметить, что все металлы в избыточном количестве обладают токсическим действием, однако для ионов тяжелых

металлов значения предельно-допустимых концентраций чаще всего находятся в пределах 0,01 – 0,001 мг на дм^3 воды. Опасность такого вида загрязнения заключается в том, что они способны вступать в многочисленные химические и биологические реакции с живыми организмами, нанося им непоправимый вред. Поэтому рассмотренная в статье проблема очистки от ионов тяжелых металлов сточных вод перед их выбросом в природные водоемы была и остается актуальной [1–3].

В настоящее время для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов применя-

ют различные методы. Наибольшей эффективностью среди них обладают электрохимические, однако такие способы очистки весьма энергозатратные, требуют сложного в исполнении и применении оборудования и квалифицированного персонала и, следовательно, являются дорогостоящими. Кроме этого, электрохимические методы часто становятся источником высококонцентрированных отходов и вторичного загрязнения воды. Электрохимические методы очистки целесообразно применять для небольших объемов сточных вод, что в масштабах промышленного предприятия практически нереализуемо. Поэтому для очистки большого количества вод, загрязненных ионами тяжелых металлов, необходимо рассматривать варианты, предусматривающие использование отходов промышленного производства и недорогих природных материалов, сырья [1–3]. К таким методам относят метод адсорбции, который в настоящее время становится крайне востребованным [4].

Подтверждением увеличения спроса метода адсорбции является рост рынка сорбентов, выпускаемых в промышленных масштабах. За последние несколько лет выбор предлагаемых эффективных сорбентов вырос в практически 10 раз и продолжает расти в связи с увеличением исследований в данном направлении. Широкий ассортимент по составу, происхождению и качеству доказывает сложность подбора сорбента, обладающего эффективностью по примесям различной природы, чем часто бывают загрязнены сточные воды промышленных предприятий, но в то же время позволяет производить его индивидуальный подбор в зависимости от возможностей предприятия в плане регенерации или утилизации отработанного сорбента [5–10].

В данной работе были рассмотрены в качестве сорбентов органические материалы природного происхождения и отходы производств. Особенность данного типа сорбентов заключается в том, что они относительно дешевы и согласно ранее проведенным экспериментальным исследованиям обладают высокой эффективностью по отношению к ионам

тяжелых металлов, а также не нуждаются в регенерации [9].

Для выбора сорбента важно также учитывать время достижения равновесного состояния при контакте сорбента и растворенного в воде вещества. Критерием оптимальности служит время контакта, за которое сорбент проявит максимальную эффективность извлечения тяжелых металлов из воды. Основным показателем сорбционной способности сорбента является его обменная емкость: она бывает динамическая и статическая, и определяется числом эквивалентов ионов, поглощаемых единицей массы или объема сорбента [6].

В данной работе была изучена статическая обменная емкость верхового торфа из месторождения «Сосновое», находящегося в Республике Татарстан, и полученных путем переработки листовых пород деревьев опилок.

Статическая обменная емкость — равновесная емкость сорбента, определяемая в статических условиях при контакте с раствором заданного объема и состава за определенный интервал времени [11]. В данной работе была изучена статическая сорбция торфом и древесными опилками ионов тяжелых металлов Fe (III), Cr (VI).

Для приготовления модельных растворов использовались сульфат железа $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ и хромистый ангидрид CrO_3 . Навески солей брались с учетом кристаллизационной воды. Реактивы использовались качества не ниже «Чистый для анализа» (ч.д.а.) и бидистиллированная вода.

Методика эксперимента была следующей. Для проведения статического взаимодействия сорбента с растворами для каждого эксперимента навеску по 1 г насыпали в колбы объемом 500 мл, приливали по 100 мл модельного раствора с концентрацией соответствующего иона, равной 5 мг/л, и перемешивали. Перемешивание раствора с сорбентом осуществляли непрерывно с помощью магнитной мешалки с частотой вращения 1000 об/мин [12]. Растворы с сорбентами выдерживались в течение 60 минут, с шагом 20 минут производился отбор пробы раствора. Отбор пробы раствора и подготовка к анализу осуществлялись в соот-

ветствии с ПНД Ф 12.15.1-08 «Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод». Очистка растворов от мелких частичек сорбента проводилась при помощи бумажных фильтров «синяя лента» ТУ 6-09-1678-95.

Остаточное содержание ионов в фильтрате определялось на фотокалориметре КФК-3, погрешность определения не превышала 5 %. Концентрацию ионов металлов в растворах определяли колориметрическим методом. Колориметрическое определение массовой концентрации общего железа проводили в соответствии ГОСТ 4011-72 с сульфосалициловой

кислотой, хрома (VI) — по ГОСТ 31956-2012.

По значениям исходной C_1 и равновесной $C_{равн}$ концентрации ионов тяжелых металлов в воде находится эффективность очистки, %:

$$E = \frac{C_1 - C_{равн}}{C_1} 100\%.$$

Полученные результаты по эффективности очистки при взаимодействии сорбентов с модельными смесями в статических условиях представлены на рис. 1.

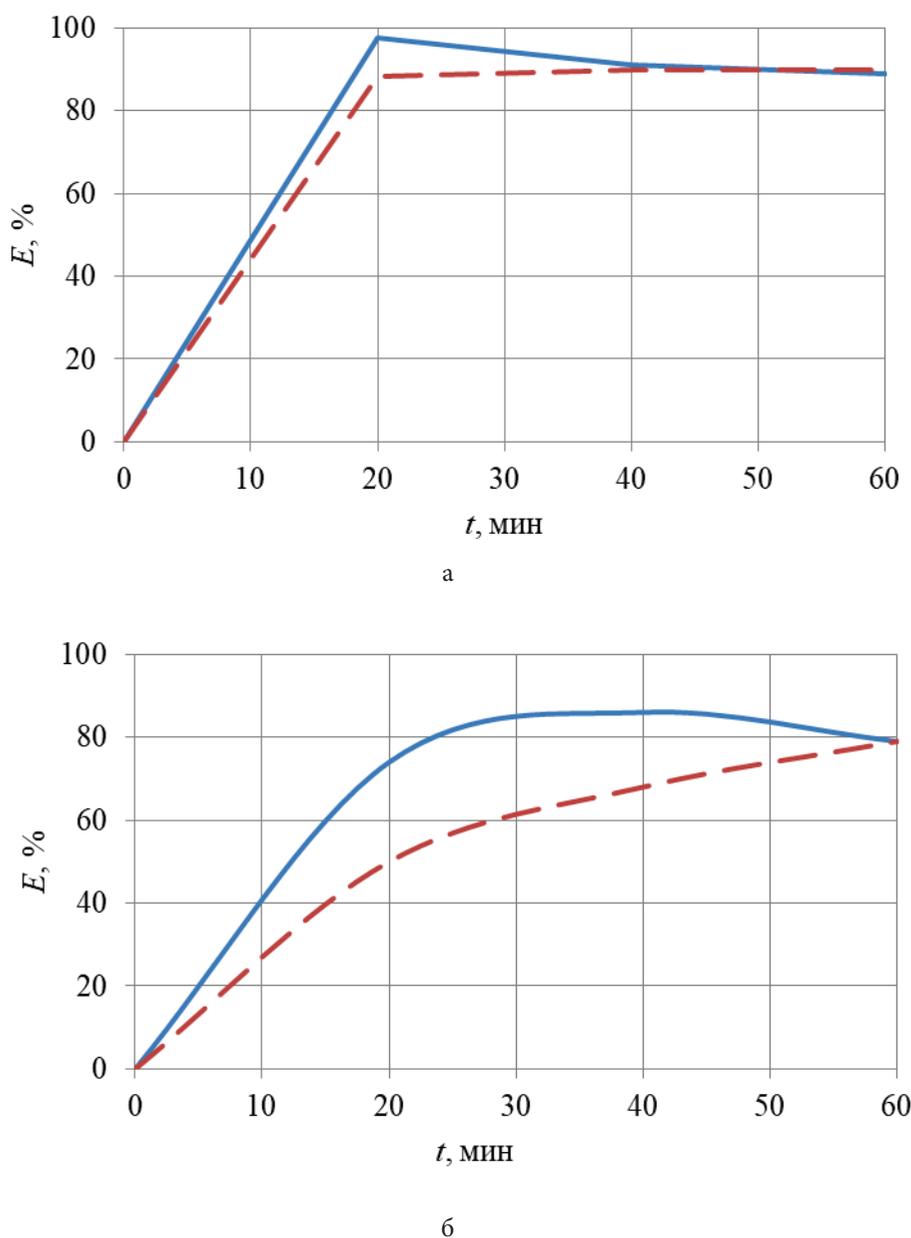


Рис. 1. Зависимость эффективности очистки от ионов тяжелых металлов от времени взаимодействия с торфом (а), опилками (б): — — Fe (III), - - - - Cr (VI)

При сорбционной очистке на торфе в течение первых 20 мин процесса наблюдается прямая пропорциональная зависимость между временем контакта и количеством поглощенного иона. Для ионов Cr^{6+} на 20-й минуте наступает сорбционное равновесие при эффективности очистки $\sim 90\%$. Для ионов Fe^{3+} на 20-й минуте контакта эффективность очистки составляет $\sim 98\%$, далее происходит процесс десорбции, который завершается на 40-й минуте, и равновесное состояние достигается также при эффективности извлечения ионов железа $\sim 90\%$.

При сорбционной очистке на древесных опилках эффективность сорбции ионов Cr^{6+} непрерывно увеличивается в течение всего времени контакта (60 мин) и достигает $\sim 80\%$. Максимальное поглощение ионов Fe^{3+} ($\sim 86\%$) наблюдается на 40-ой минуте контакта, затем наблюдается процесс десорбции; равновесие достигается при эффективности $\sim 80\%$.

По стандартной методике, разработанной ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.Ф. Федоровского» [13], по уравнению баланса рассчитывается статическая обменная емкость:

$$A \cdot m \cdot V + C_{\text{равн}} = V \cdot C_1,$$

где A — статическая обменная емкость (адсорбционная емкость), мг/г; m — масса сухого сорбента, г; V — объем приливаемой к сорбенту раствора, дм^3 ; C_1 — исходная концентрация катионов в растворе, $\text{мг}/\text{дм}^3$; $C_{\text{равн}}$ — равновесная (остаточная) концентрация катионов в фильтрате, устанавливающаяся в воде после перемешивания воды и сорбента в течение времени t , $\text{мг}/\text{дм}^3$.

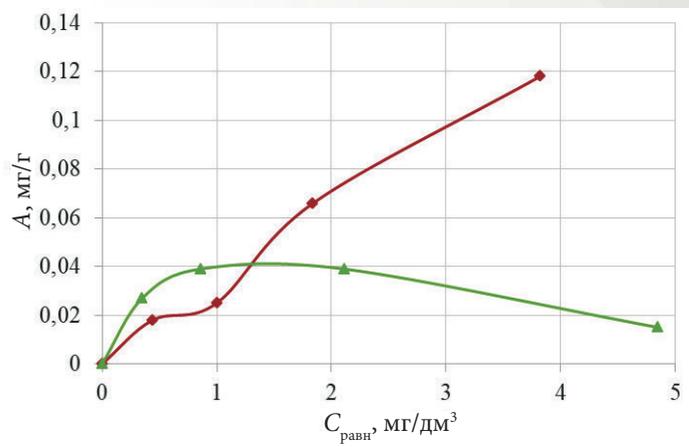
Преобразуя уравнение, получим:

$$A = (C_1 - C_{\text{равн}}) \frac{V}{m}.$$

По экспериментальным данным можно также рассчитать коэффициент распределения — отношение концентрации иона металла в сорбенте к его концентрации в растворе:

$$K_p = \frac{(C_1 - C_{\text{равн}}) V}{C_{\text{равн}} m}.$$

Результаты расчета величины сорбционной емкости и коэффициента распределения для торфа и древесных опилок представлены на рис. 2 и 3.



а

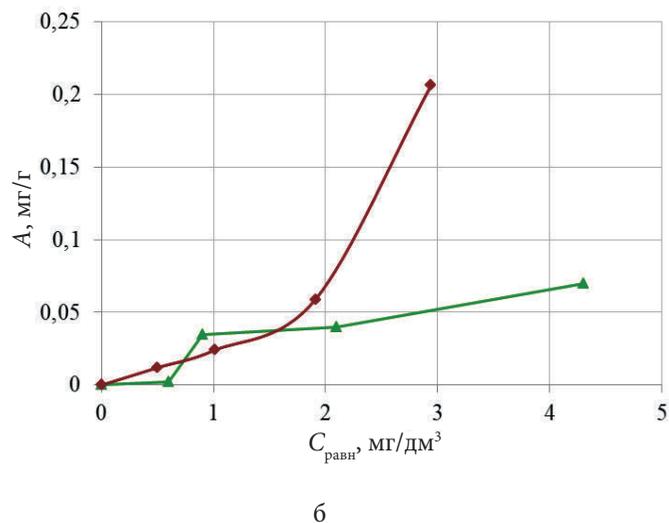


Рис. 2. Адсорбционная емкость сорбентов: а — торф, б — опилки; \blacklozenge — Fe (III), \blacktriangle — Cr (VI)

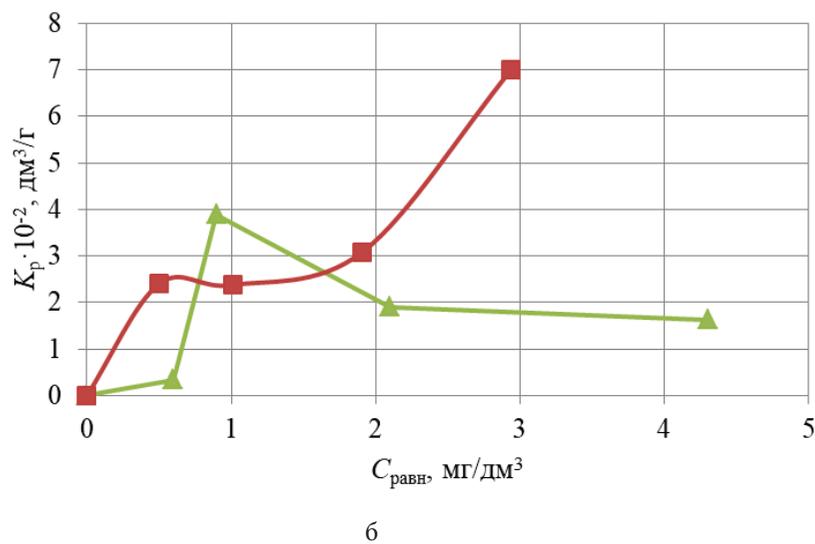
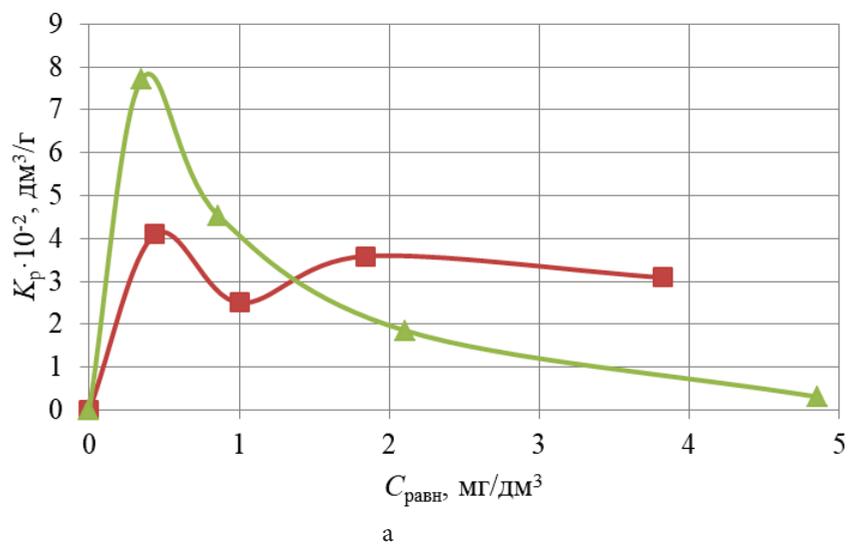


Рис. 3. Коэффициент распределения ионов в сорбентах: а — торф, б — опилки; \blacklozenge — Fe (III), \blacktriangle — Cr (VI)

Для предотвращения десорбции ионов тяжелых металлов необходимо индивидуально подбирать время контакта сорбента с водными растворами. Например, для поглощения ионов Fe (III) на торфе и опилках время контакта составляет не более 20–40 минут, а для поглощения ионов Cr (VI) на тех же сорбентах оно может быть увеличено до 60 минут. Как было указано при выборе сорбентов, их регенерация после использования нецелесообразна, их можно утилизировать сжиганием, получая при этом дополнительное количество теплоты.

При проектировании системы очистных сооружений, в число аппаратов которой входит сорбционная установка, предварительно необходимо провести термодинамический

расчет, по результатам которого подбираются параметры работы сорбционных систем на основании экспериментально определенных величин предельной сорбции, полной емкости сорбента, а также констант и энергий Гиббса [14].

Для получения термодинамических характеристик проводят обработку экспериментальных данных [14, 15], используя в основном уравнения для построения изотерм сорбции. При этом важно учитывать особенности изучаемых процессов в каждом конкретном случае.

Для определения механизма все полученные изотермы сорбции обрабатывались с помощью различных моделей (табл. 1) [14, 16].

Таблица 1

Модели механизмов адсорбции

Модель	Линейная форма	Координаты
Фрейндлиха	$\log A = \log K_F + \frac{1}{A_{\max}} \log C_{\text{равн}}$	$\log A = f(\log C_{\text{равн}})$
Ленгмюра	$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\max}} + \frac{1}{A_{\max} K_L C_{\text{равн}}}$	$\frac{1}{A} = f\left(\frac{1}{C_{\text{равн}}}\right)$
Темкина	$A = \frac{RT}{b_{TE}} \ln a_{TE} - \frac{RT}{b_{TE}} \ln C_{\text{равн}}$	$A = f(\ln C_{\text{равн}})$
Дубинина-Радушкевича	$\ln A = \ln A_{\max} - \left(\frac{RT}{E}\right)^2 \left(\ln \frac{C_s}{C_{\text{равн}}}\right)^2$	$\ln A = f\left(\ln \frac{C_s}{C_{\text{равн}}}\right)^2$
Флори-Хаггинса	$\log \frac{\theta}{C_s} = \log K_{FH} = n_{FH} \log(1 - \theta)$	$\ln A = f\left(\ln \frac{C_s}{C_{\text{равн}}}\right)^2$

По результатам обработки изотерм сорбции на торфе получены уравнения регрессии и значения коэффициентов аппроксимации по различным моделям адсорбции. Коэффициент аппроксимации (R^2) является кри-

терием соответствия изотермы адсорбции модели. Чем больше значение коэффициента аппроксимации стремится к 1, тем лучше данная модель описывает исследуемый процесс (табл. 2).

Таблица 2

Обработка изотерм сорбции на торфе

Модель	Ионы	
	Fe (III)	Cr (VI)
Фрейндлиха	$y = 0,9223x - 3,1528$ $R^2 = 0,9401$	$y = -0,1995x - 2,0438$ $R^2 = 0,2545$
Ленгмюра	$y = 1306,1x + 35,993$ $R^2 = 0,8763$	$y = -264,21x + 231,96$ $R^2 = 0,098$
Темкина	$y = 0,0085x - 0,0118$ $R^2 = 0,8879$	$y = -0,0008x + 0,0078$ $R^2 = 0,164$
Дубинина-Радущкевича	$y = -5,8817x - 4,3887$ $R^2 = 0,0409$	$y = 6,2275x - 3,8768$ $R^2 = 0,2658$
Флори-Хаггинса	$y = -8,5348x - 2,9099$ $R^2 = 0,2312$	$y = -8,2687x - 3,0783$ $R^2 = 0,9253$

Адсорбция ионов железа (III) на торфе лучше всего описывается моделью Фрейндлиха, которая характерна для многослойной сорбции. Согласно модели Фрейндлиха сорбционные центры модели обладают различными величинами энергии, вначале происходит заполнение активных сорбционных положений с максимальной энергией [17].

Для ионов хрома (VI) сорбция торфом описывается моделью Флори – Хаггинса. Данная модель применима лишь к умеренно концен-

трированным или полуразбавленным растворам, она показывает совместимость сорбента и раствора сорбтива и определяет степень покрытия поверхности адсорбента адсорбатом, что может осуществляться в спонтанном характере процесса сорбции [14].

Результаты обработки изотерм сорбции на опилках представлены в табл. 3. Критерием соответствия также служил коэффициент аппроксимации (R^2).

Таблица 3

Обработка изотерм сорбции на опилках

Модель	Ионы	
	Fe (III)	Cr (VI)
Фрейндлиха	$y = 1,5452x - 3,287$ $R^2 = 0,9452$	$y = 1,4546x - 3,6432$ $R^2 = 0,642$
Ленгмюра	$y = 2602,3x - 451,94$ $R^2 = 0,9931$	$y = 15976x - 6543,4$ $R^2 = 0,6922$
Темкина	$y = 0,0017x + 0,0009$ $R^2 = 0,7034$	$y = 0,0006x + 0,0005$ $R^2 = 0,8771$
Дубинина-Радущкевича	$y = 9,6031x - 8,2372$ $R^2 = 0,7993$	$y = 16,823x - 5,0097$ $R^2 = 0,2297$
Флори-Хаггинса	$y = 2,7044x - 0,4964$ $R^2 = 0,463$	$y = -5,4703x - 1,5778$ $R^2 = 0,5808$

Сорбцию на опилках ионов железа (III) лучше всего описывает модель Ленгмюра, т. е. адсорбция происходит на поверхности твердого тела (опилок).

Сорбцию ионов хрома (VI) описывает модель Темкина. Согласно данной модели присутствует адсорбат — межмолекулярное взаимодействие, адсорбция осуществляется с однородным распределением максимальной энергии связывания, в результате в ходе заполнения слоя из-за взаимоотталкивания ионов хрома (VI) теплота адсорбции всех молекул в слое линейно уменьшается.

Преобразуем уравнения изотерм адсорбции в линейную форму с двумя переменными: $y = kx + b$. По данным из линейного уравнения значениям коэффициентов k и b можно рассчитать основные термодинамические параметры сорбционного равновесия (табл. 4–6). На основании данных значений можно рассчитать значения энергии Гиббса:

$$\Delta G = -RT \ln K,$$

где R — универсальная газовая постоянная, T — температура адсорбции, K — постоянная адсорбционного равновесия.

Таблица 4

Коэффициенты для расчета термодинамических параметров

Модель	A_{\max}	K
Фрейндлиха	$A_{\max} = \frac{1}{k}$	$K_F = 10^b$
Ленгмюра	$A_{\max} = \frac{1}{k}$	$K_L = \frac{1}{bA_{\max}}$
Темкина	$A_{\max} = e^{\frac{RTb}{K_T}}$	$K_T = \frac{RT}{k}$
Дубинина-Радушкевича	$A_{\max} = e^b$	$K_{D-R} = -k$
Флори-Хаггинса	$A_{\max} = k$	$K_{F-H} = 10^b$

Таблица 5

Расчет термодинамической модели сорбции на торфе

Модель	ΔG_{298}^0 , кДж/моль	
	Fe (III)	Cr (VI)
Фрейндлиха	17,98	11,65
Ленгмюра	-0,89	-0,03
Темкина	-30,35	-31,34
Дубинина-Радушкевича	-4,39	-4,53
Флори-Хаггинса	16,59	17,55

Расчет термодинамической модели сорбции на опилках

Модель	ΔG_{298}^0 , кДж/моль	
	Fe (III)	Cr (VI)
Фрейндлиха	18,74	20,77
Ленгмюра	-4,33	-2,21
Темкина	-35,14	-37,72
Дубинина-Радужкевича	-5,6	-6,99
Флори-Хаггинса	2,83	8,99

Сопоставив полученные данные из таблиц, получили, что коэффициент корреляции не может быть принят за критерий, гарантирующий правильное описание механизма сорбции, необходимо учитывать и значения энергии Гиббса, полученные по термодинамическим расчетам. Поэтому сделано уточнение.

Адсорбция ионов железа (III) на торфе описываться моделью Фрейндлиха не может, т. к. по данной модели получено положительное значение энергии Гиббса, т. е. реакция не может протекать самопроизвольно. Отрицательное значение энергии Гиббса при максимальном коэффициенте корреляции наблюдается в модели Темкина. Адсорбцию ионов хрома (VI) по значению энергии Гиббса с учетом коэффициента корреляции описывает модель Дубинина-Радужкевича.

Адсорбцию на опилках ионов железа (III) описывает модель Ленгмюра, сорбцию ионов хрома (VI) — модель Темкина, как и было предположено.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что очист-

ку от ионов тяжелых металлов железа (III) и хрома (VI) в статических условиях можно осуществлять с помощью доступного материала органического происхождения — торфа или опилок лиственных пород деревьев.

По результатам проведенной работы были рассчитаны равновесные и термодинамические параметры процесса, значения которых указывают на возможность очистки на данном типе сорбентов — торфе и опилках. На основании полученных расчетных данных можно сделать вывод, что невозможно проводить описание процесса адсорбции по единой модели для одного сорбента, сорбция каждого иона тяжелого металла описывается своей моделью. Для корректного описания протекающего механизма сорбции обязательно должны быть проведены термодинамические расчеты. В дальнейшем будет рассмотрена кинетика данного процесса. Полученные новые данные позволяют расширить область представлений о механизмах взаимодействия данных типов сорбентов с водными растворами солей тяжелых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеева Е. Проблемы очистки сточных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № S2. С. 28–30.
2. Пимнева Л.А. Очистка природных и сточных вод от цветных металлов // Успехи современного естествознания. 2011. № 5. С. 99–100.
3. Двадненко М.В., Привалова Н.М., Кудяева И.Ю., Степура А.Г. Адсорбционная очистка сточных вод // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 10. С. 214–215.

4. Дремичева Е.С., Лаптедутьче Н.К. Торф как сорбент для очистки промышленных сточных вод // Вода: химия и экология. 2015. № 8 (86). С. 63–68.
5. Пролейчик А.Ю., Гапоненков И.А., Федорова О.А. Адсорбция ионов тяжелых металлов из неорганических производственных сточных вод // Экология урбанизированных территорий. 2017. № 3. С. 34–41.
6. Хлынина Н.Г., Алексейко И.С. Изучение сорбционных свойств сорбентов в статических условиях // Вестник КрасГАУ. 2008. № 1. С. 92–99.
7. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V. Sorption of heavy metal ions by cellulose modified with fullerene // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. V. 88. No. 3. P. 436–441.
8. Макаренко Н.В., Ярусова С.Б., Азарова Ю.А., Земнухова Л.А. Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов сорбентом из отходов производства риса // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2015. № 4 (182). С. 94–99.
9. Дремичева Е.С. Использование отходов сельского хозяйства для очистки сточных вод промышленных предприятий // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 4. С. 16–19.
10. Дремичева Е.С., Лаптев А.Г. Моделирование процесса сорбции при очистке сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53. № 3. С. 267–275.
11. Кирейчева Л.В., Андреева Н.П. Комплексные сорбенты для очистки сточных вод от органических соединений и ионов тяжелых металлов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2009. №1 (13). С. 43–47.
12. Дремичева Е.С. Изучение кинетики сорбции на торфе ионов железа (III) и меди (II) из сточных вод // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2017. Т. 58. № 4. С. 204–207.
13. Стандарт Российского геологического общества СТО РосГео 08-002-98 «Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Гидрометаллургические способы оценки минерального сырья. Ионообменные процессы. Методы». М., 1998. 47 с.
14. Черемисина О.В., Шенк Й., Черемисина Е.А., Пономарева М.А. Термодинамическая модель ионообменных процессов на примере сорбции церия из сложносолевых растворов // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 307–316.
15. Луцкий Д.С. Термодинамическое описание экстракции лантана олеиновой кислотой // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 299–302.
16. Линников О.Д., Родина И.В., Тютюнник А.П. и др. Механизм сорбции ионов меди фильтрующим материалом МФУ // Вода: химия и экология. 2016. № 7. С. 72–80.
17. Галимова Р.З. Очистка фенолсодержащих сточных вод нативными и модифицированными адсорбционными материалами на основе отходов сельскохозяйственного и промышленного производства: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Румия Захидовна Галимова. Казань, 2018. 128 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.74.78.009

UDC 628.33:661.8

© E.S. Dremicheva, 2021

E.S. DREMICHEVA

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Head of the Department of Scientific Research Work,
Associate Professor of the Department KSPEU, Kazan
e-mail: lenysha@mail.ru

USE OF PEAT AND WOOD SAWDUST FOR TREATMENT OF WASTEWATER FROM HEAVY METAL IONS

The article considers adsorption method of treatment of waste water of industrial enterprises from ions of heavy metals. Experimental studies were carried out on the purification of model solutions containing iron (III) and chromium (VI) ions. Organic materials are selected as sorbents — peat and sawdust. Experimental studies on the assessment of sorption properties were carried out under static conditions. The data obtained as a result of experiments made it possible to calculate equilibrium and thermodynamic characteristics. Graphs of purification efficiency and duration of contact of sorbent with aqueous solution containing salts of heavy metals, as well as adsorption capacity and distribution coefficient are constructed. Optimal contact time of sorbent and solution is estimated. Models of sorption mechanisms were considered, according to the calculations, the mechanisms of sorption of iron (III) and chromium (VI) ions on peat and sawdust were described.

Keywords: ADSORPTION, STATIC CAPACITY, HEAVY METAL IONS, PEAT, SAWDUST, EXTRACTION DEGREE, DISTRIBUTION COEFFICIENT, EQUILIBRIUM CHARACTERISTICS, THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS, SORPTION MODEL.

REFERENCES

1. Moiseeva E. Problems of waste water treatment // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2010. No. S2. P. 28–30. [In Russ.].
2. Pimneva L.A. Purification of natural and waste waters from non-ferrous metals // Successes of modern natural science [Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya]. 2011. No. 5. P. 99–100. [In Russ.].
3. Dvadenko M.V., Privalova N.M., Kudaeva I.Yu., Stepura A.G. Adsorption wastewater treatment // Modern high technologies [Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii]. 2010. No. 10. P. 214–215. [In Russ.].
4. Dremicheva E.S., Lapedulche N.K. Peat as a sorbent for industrial wastewater treatment // Water: chemistry and ecology [Voda: khimiya i ekologiya]. 2015. No. 8 (86). P. 63–68. [In Russ.].
5. Prolechnik A.Yu., Gaponenkov I.A., Fedorova O.A. Adsorption of heavy metal ions from inorganic industrial wastewater // Ecology of urbanized territories [Ekologiya urbanizirovannykh territoriy]. 2017. No. 3. P. 34–41. [In Russ.].
6. Khlynina N.G., Alekseiko I.S. Study of sorption properties of sorbents under static conditions // Bulletin of KrasSAU [Vestnik KrasGAU]. 2008. No. 1. P. 92–99. [In Russ.].
7. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V. Sorption of heavy metal ions by cellulose modified with fullerene // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. V. 88. No. 3. P. 436–441.
8. Makarenko N.V., Yarusova S.B., Azarova Yu.A., Zemnukhova L.A. Kinetics of sorption of heavy metal ions by sorbent from rice production waste // Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences [Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk]. 2015. No. 4 (182). P. 94–99. [In Russ.].
9. Dremicheva E.S. The use of agricultural waste for wastewater treatment of industrial enterprises // Ecology and Industry of Russia [Ekologiya i promyshlennost Rossii]. 2019. Vol. 23. No. 4. P. 16–19. [In Russ.].
10. Dremicheva E.S., Laptsev A.G. Modeling of the sorption process in the purification of waste water from oil products and heavy metals // Theoretical foundations of chemical technology [Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii]. 2019. Vol. 53. No. 3. P. 267–275. [In Russ.].
11. Kireicheva L.V., Andreeva N.P. Complex sorbents for purification of waste water from organic compounds and ions of heavy metals // Water treatment. Water supply [Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye]. 2009. No. 1 (13). P. 43–47. [In Russ.].
12. Dremicheva E.S. Study of the kinetics of sorption of iron (III) and copper (II) ions from wastewater on peat // Moscow University Bulletin [Vestnik Moskovskogo universiteta]. Series 2:

Chemistry. 2017. Vol. 58. No. 4. P. 204–207. [In Russ.].

13. Standard of the Russian Geological Society STO RosGeo 08-002-98 «Solid non-combustible minerals. Technological methods for the study of mineral raw materials. Hydrometallurgical methods for evaluating mineral raw materials. Ion exchange processes. Methods». М., 1998. 47 p. [In Russ.].

14. Cheremisina O.V., Shenk Y., Cheremisina E.A., Ponomareva M.A. Thermodynamic model of ion-exchange processes by the example of sorption of cerium from complex salt solutions // Notes of the Mining Institute [Zapiski Gornogo instituta]. 2019. Vol. 237. P. 307–316. [In Russ.].

15. Lutskiy D.S. Thermodynamic description of the extraction of lanthanum with oleic acid // Notes of the Mining Institute [Zapiski Gornogo instituta]. 2011. Vol. 189. P. 299–302. [In Russ.].

16. Linnikov O.D., Rodina I.V., Tyutyunnik A.P. etc. The mechanism of sorption of copper ions by filtering material MFU // Water: chemistry and ecology [Voda: khimiya i ekologiya]. 2016. No. 7. P. 72–80. [In Russ.].

17. Galimova R.Z. Purification of phenol-containing wastewater with native and modified adsorption materials based on agricultural and industrial waste: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Rumiya Zakhidovna Galimova. Kazan, 2018. 128 p. [In Russ.].

**Оформление подписки на журнал «Вестник Научного центра
ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности»
осуществляется через Агентство подписки «Урал-Пресс Кузбасс»**

Подписной индекс 80814