

СОРБЦИЯ ПИРИДИН-3-КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ Fe-СОДЕРЖАЩИМ СУЛЬФОКАТИОНИТОМ КУ-2

© 2021 г. Г. Н. Альтшулер^{a,*}, Е. В. Остапова^a, О. Г. Альтшулер^{a,b}

^a Российская академия наук, Сибирское отделение, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии, Кемерово, Россия

^b Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

*e-mail: altshulerh@gmail.com

Поступила в редакцию 08.10.2020 г.

После доработки 04.12.2020 г.

Принята к публикации 04.12.2020 г.

Исследовано равновесное распределение пиридин-3-карбоновой кислоты и железа (III) между водным раствором и сульфокатионитом КУ-2. Концентрации индивидуальных компонентов в растворе рассчитаны по программе HySS 2009, в полимерной фазе они определены на основе материального баланса сорбционных процессов. Показано, что в полимерной фазе анионы пиридин-3-карбоновой кислоты (L^-) входят в состав комплексных катионов $[FeL]^{2+}$ и $[H_2L]^+$. Определены константы равновесия ионного обмена и лигандной сорбции с участием пиридин-3-карбоновой кислоты, сульфокатионита КУ-2, протонов и катионов железа (III).

Ключевые слова: сульфокатионит КУ-2, пиридин-3-карбоновая кислота, катионы железа (III), лигандная сорбция, ионный обмен, константа равновесия

DOI: 10.31857/S0044453721080045

Пиридин-3-карбоновая кислота ($C_6H_5NO_2$, никотиновая кислота, витамин B₃, ниацин, HL) играет радикальную роль в обмене веществ в организме человека, выступая в качестве важного предшественника окислительно-восстановительных коферментов – никотинамидадениндинуклеотида и никотинамидадениндинуклеотид-фосфата – ключевых компонентов в клеточных метаболических реакциях [1, 2]. Включение биологически активной субстанции в наноконтейнеры создает неограниченные возможности для консервации лекарственных препаратов, изменения их фармакокинетических свойств, векторной доставке лекарственного средства в очаг патологического поражения. Мы предположили [3], что инкапсуляция пиридин-3-карбоновой кислоты в ионообменниках позволит осуществлять целевую доставку лекарственного вещества только в желудок или кишечник при пероральном введении. Известно [4], что элементарное звено сульфокатионита КУ-2-8 (сульфированного сополимера стирола с дивинилбензолом) является наноконтейнером для пиридин-3-карбоновой кислоты (рис. 1). Изучены кинетика десорбции пиридин-3-карбоновой кислоты из катионита КУ-2-8 [5], термодинамика и кинетика сорбции пиридин-3-карбоновой кислоты на анионите АВ-17-8 [6, 7].

Пиридинкарбоновые кислоты в растворах участвуют в протолитических реакциях [8], взаимодействуют с переходными и тяжелыми металлами с образованием комплексных соединений

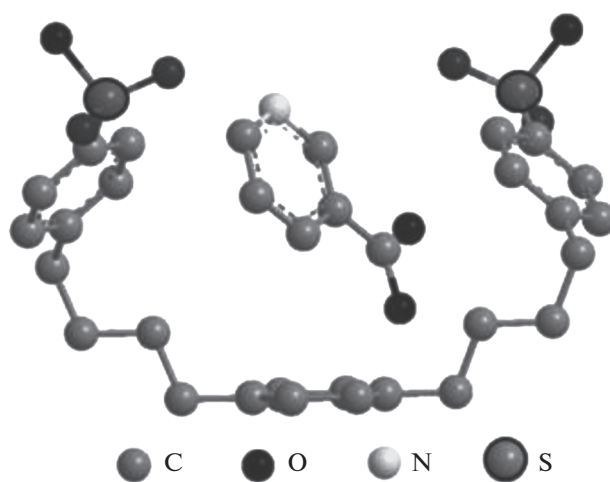


Рис. 1. Структура наноконтейнера (элементарного звена сульфокатионита КУ-2), содержащего пиридин-3-карбоновую кислоту [2], минимизированная по внутренней энергии в рамках программы MORAC 2016.

[9–13], что может оказывать как положительное, так и разрушительное влияние на живой организм. Показано [14], что стабильность комплексов пиридин-3-карбоновой кислоты в водных растворах возрастает в ряду катионов Cd(II) , $\text{Co(II)} < \text{Ni(II)} < \text{Cu(II)} < \text{Fe(III)}$, достигая наибольшего значения для катионов железа (III).

Для создания препаратов пролонгированного действия на основе пиридин-3-карбоновой кислоты представляет интерес изучение сорбции пиридин-3-карбоновой кислоты из многокомпонентных водных растворов сульфокатионитом КУ-2, содержащим катионы металлов. Цель данной работы – определение стехиометрии комплексов пиридин-3-карбоновой кислоты с катионами Fe^{3+} в фазе сульфокатионита КУ-2 и значений констант равновесия сорбционных процессов с участием пиридин-3-карбоновой кислоты, Fe^{3+} , H^+ на основе экспериментальных данных о равновесном распределении компонентов между сульфокатионитом и водным раствором.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сульфокатионит КУ-2 – сульфированный сополимер стирола с 4% дивинилбензола. Полная динамическая ионообменная емкость составляет 5.0 экв. на 1 г Н-формы сухого полимера. Полимер кондиционировали последовательной обработкой растворами NaCl , NaOH , HCl и H_2O по известной методике [15] подготовки ионитов и затем промывали дистиллированной водой до рН фильтрата 5.5. Пиридин-3-карбоновая кислота соответствовала требованиям Международной фармакопеи [16], содержала не менее 99.0% основного вещества. Растворы электролитов готовили из $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ квалификации “ч.д.а.”, HCl , NaCl , NaOH – квалификации “х.ч.”.

Равновесное распределение компонентов между водными растворами пиридин-3-карбоновой кислоты, хлорида железа (III) и сульфокатионитом КУ-2 изучали динамическим методом при температуре 298 К. Через ионообменную колонку, заполненную Н- или Fe(III) -формой полимера, пропускали многокомпонентные водные растворы до установления равновесия (до совпадения составов, рН исходного раствора и фильтрата). Интервал концентраций пиридин-3-карбоновой кислоты составлял 0.001–0.01 моль/л. После достижения состояния равновесия проводили десорбцию пиридин-3-карбоновой кислоты дистиллированной водой.

Для получения Fe(III) -формы полимера через ионообменную колонку, содержащую сульфокатионит КУ-2 в Н-форме, пропускали раствор 0.1 М FeCl_3 при рН 1.5–2.5. Концентрацию пиридин-3-карбоновой кислоты в растворах определяли с помощью спектрофотометра СФ-46 при

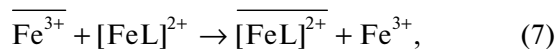
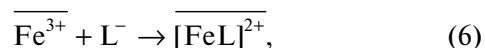
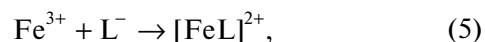
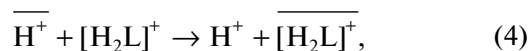
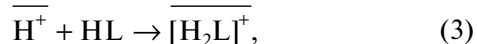
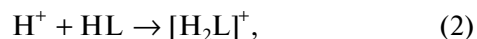
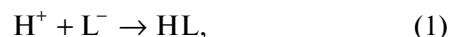
$\lambda = 262.7$ нм, рН 6.86. Эквивалентную долю компонента в полимере \bar{x}_i рассчитывали как отношение количества эквивалентов компонента i к общему содержанию эквивалентов противоионов в сульфокатионите.

ИК-фурье-спектры получены на спектрометре “Инфралюм ФТ-801” в таблетках с КВг. Соотношение компонентов в растворе рассчитаны с использованием компьютерной программы HySS 2009 (Hyperquad Simulation and Speciation) [17].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что в водном растворе пиридин-3-карбоновая кислота может находиться в виде молекул HL , катионов $[\text{H}_2\text{L}]^+$ и анионов (L^-), анионы пиридин-3-карбоновой кислоты образуют с катионами Fe^{3+} комплексы состава 1:1 [14]. В водном растворе смеси пиридин-3-карбоновой кислоты с хлоридом железа (III) могут присутствовать молекулы HL и Fe(OH)_3 , катионы Fe^{3+} , $[\text{FeOH}]^{2+}$, $[\text{Fe(OH)}_2]^+$, $[\text{FeL}]^{2+}$, $[\text{H}_2\text{L}]^+$ и H^+ , анионы L^- и OH^- . Концентрации всех компонентов в водном растворе смеси пиридин-3-карбоновой кислоты и соли железа (III) позволяет рассчитать программа HySS 2009. Например, расчетный состав водного раствора, содержащего 0.01 моль/л пиридин-3-карбоновой кислоты и 0.003 моль/л FeCl_3 , приведен на рис. 2.

В рассмотренных в данной работе гетерогенных системах, включающих сульфокатионит, водный раствор пиридин-3-карбоновой кислоты и соли железа (III), могут протекать реакции



Здесь и далее черта означает принадлежность к полимерной фазе.

По данным о константах равновесий (1)–(8) можно рассчитать противоионный состав сульфокатионита КУ-2, приведенного в равновесие с многокомпонентным водным раствором, содержащим пиридин-3-карбоновую кислоту и хлорид железа (III). Значения констант равновесий (1), (2), (5), (8) известны (табл. 1). Константа равнове-

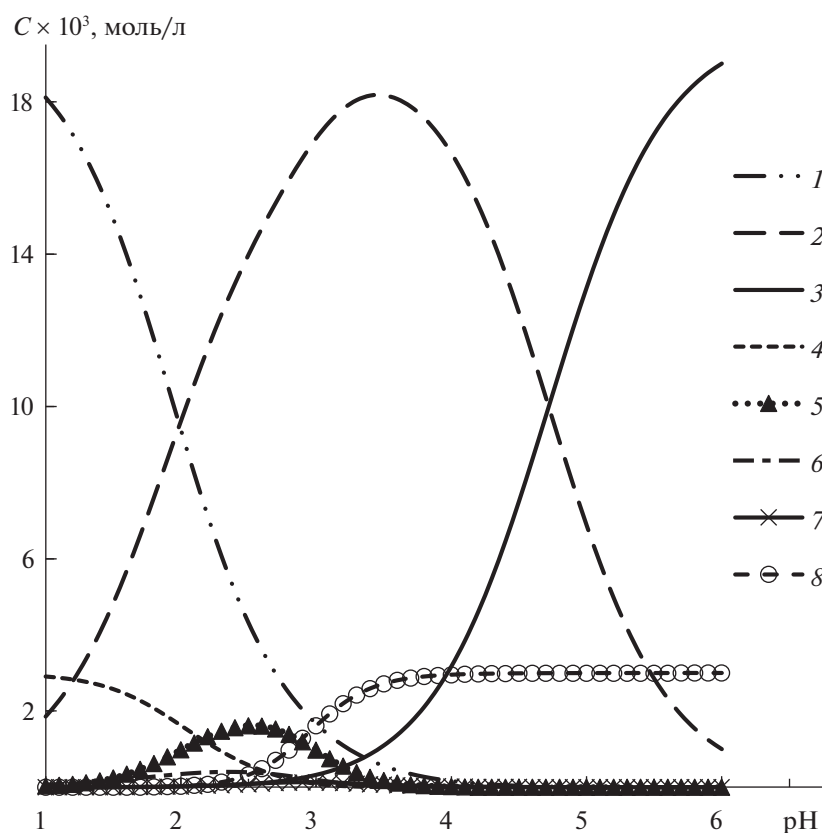


Рис. 2. Зависимости концентрации компонентов в растворе, содержащем 0.01 моль/л пиридин-3-карбоновой кислоты и 0.003 моль/л FeCl_3 , от pH: $[\text{H}_2\text{L}]^+$ (1); HL (2); L^- (3); Fe^{3+} (4); $[\text{FeL}]^{2+}$ (5); $[\text{FeOH}]^{2+}$ (6); $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ (7); $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (8).

сия (3) лигандной сорбции пиридин-3-карбоновой кислоты Н-формой катионита равна произведению констант равновесий (2) и (4), т.е. $K_{(3)} = K_{(2)}K_{(4)}$. Значения константы равновесия ионного обмена (4), рассчитанные по экспериментальным данным о равновесном распределении катионов H^+ и $[\text{H}_2\text{L}]^+$ между КУ-2 и водным раствором, приведены на рис. 3. Как видно, в исследованном интервале составов полимера значение константы ионного обмена $K_{(4)}$ составляет 3.5 ± 0.7 . Следовательно, $\lg K_{(3)} = \lg(K_{(2)}K_{(4)}) = 2.8 \pm 0.1$.

Принимая во внимание, что в изученном интервале значений pH растворов:

а) концентрации $\text{Fe}(\text{OH})_3$, HL, H^+ , $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ в полимере и концентрации $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в растворе стремятся к нулю;

б) полная концентрация пиридин-3-карбоновой кислоты в полимере равна сумме концентраций комплексных катионов $[\text{FeL}]^{2+}$, $[\text{H}_2\text{L}]^+$;

в) полная концентрация железа в полимере равна сумме концентраций катионов Fe^{3+} , $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ и $[\text{FeL}]^{2+}$;

г) полная концентрация противоионов в катионите (E), рассчитанная в молях однозарядных катионов в дм^3 полимерной фазы, равна сумме концентраций H^+ , Fe^{3+} , $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{FeL}]^{2+}$ и $[\text{H}_2\text{L}]^+$, рассчитаем эквивалентные доли компо-

Таблица 1. Константы равновесия реакций комплексообразования, лигандной сорбции и ионного обмена с участием пиридин-3-карбоновой кислоты, протонов и катионов железа (III)

Равновесие	$\lg K$	Источник
(1)	4.62	[18]
(2)	2.23	[18]
(3)	2.8 ± 0.1	Данная работа
(4)	3.5 ± 0.7	Данная работа
(5)	4.52	[19]
(6)	4.42 ± 0.05	Данная работа
(7)	1.0 ± 0.1	Данная работа
(8)	-2.70	[20]

Погрешности рассчитаны с доверительной вероятностью 0.95.

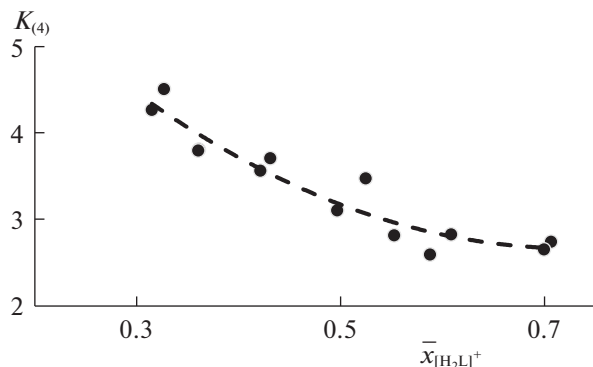


Рис. 3. Зависимость константы равновесия $K_{(4)}$ ионного обмена H^+ на $[H_2L]^+$ от эквивалентной доли катиона $[H_2L]^+$ в КУ-2 при 298 К.

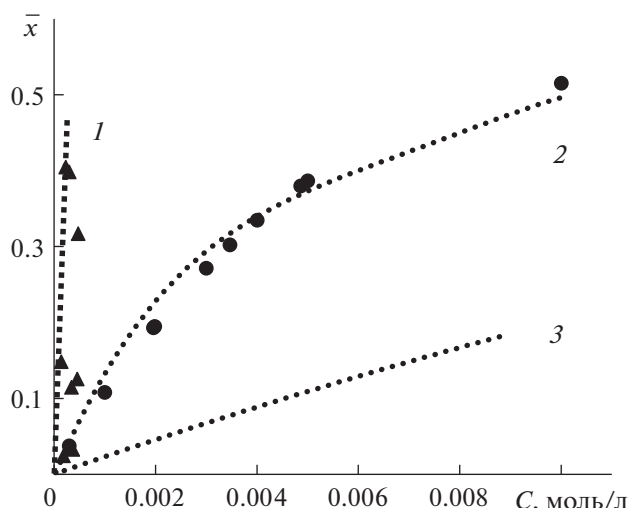


Рис. 4. Зависимости эквивалентной доли соединений пиридин-3-карбоновой кислоты в КУ-2 от молярности различных форм кислоты в водном растворе: эквивалентная доля комплексов $[FeL]^{2+}$ в полимере от молярности анионов пиридин-3-карбоновой кислоты L^- в растворе (1); суммарная доля пиридин-3-карбоновой кислоты в полимере от ее суммарной молярности в растворе (2); эквивалентная доля катионов пиридин-3-карбоновой кислоты $[H_2L]^+$ в полимере от молярности молекул HL в растворе (3). Кривые – расчет по константам равновесия (уравнения (9), (10)), маркеры – эксперимент.

нентов в полимере $\bar{x}_{[H_2L]^+}$, $\bar{x}_{[FeL]^{2+}}$, $\bar{x}_{[FeOH]^{2+}}$ по уравнениям:

$$\bar{x}_{[H_2L]^+} = \frac{K_{(2)}K_{(4)}\bar{C}_H C_{HL}}{E}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{[FeL]^{2+}} &= \\ &= \frac{2K_{(5)}K_{(7)}C_L}{K_{(2)}K_{(4)}C_{HL}\bar{C}_H/\bar{C}_{Fe} + 2K_{(5)}K_{(7)}C_L + 2K_{(8)}C_{OH}}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{[FeOH]^{2+}} &= \\ &= \frac{2K_{(8)}C_{OH}}{K_{(2)}K_{(4)}C_{HL}\bar{C}_H/\bar{C}_{Fe} + 2K_{(5)}K_{(7)}C_L + 2K_{(8)}C_{OH}}. \quad (11) \end{aligned}$$

Здесь C_i и \bar{C}_i – концентрация компонента i в растворе и полимере соответственно, моль/л.

На рис. 4 представлены зависимости эквивалентной доли в полимере компонентов, содержащих пиридин-3-карбоновую кислоту, от концентрации различных форм кислоты в водном растворе, рассчитанные с использованием значений констант равновесий, приведенных в табл. 1. Как видно, расчетные и экспериментальные данные практически совпадают. Это подтверждает правильность выбора реакций (1)–(8) и значений констант (табл. 1) для описания состояния термодинамического равновесия в многокомпонентной гетерофазной системе, содержащей КУ-2 и водный раствор смеси пиридин-3-карбоновой кислоты с хлоридом железа (III). Поэтому по константам равновесий комплексообразования, лигандной сорбции и ионного обмена, приведенным в табл. 1, можно провести расчет равновесного состава раствора, необходимого для получения сульфокатионита КУ-2 с заданным противоионным составом. Например, можно рассчитать состав равновесного раствора, позволяющего получить сульфокатионит КУ-2, в котором вся обменная емкость будет занята комплексами пири-

дин-3-карбоновой кислоты с железом ($[FeL]^{2+}$), т.е. сумма эквивалентных долей остальных компонентов (\bar{x}_{H^+} , $\bar{x}_{Fe^{3+}}$, $\bar{x}_{[FeOH]^{2+}}$ и $\bar{x}_{[H_2L]^+}$) будет стремиться к нулю, а соотношение металл/кислота в полимере будет равно 1 : 1. Согласно расчетам по уравнениям (9)–(11), полимер, содержащий в качестве противоионов только комплекс $[FeL]^{2+}$ ($\bar{x}_{[FeL]^{2+}} \rightarrow 1$), может быть получен из H- и Fe(III)-форм КУ-2, приведенных в равновесие с растворами, имеющими соотношение молярностей катионов $H^+ : [H_2L]^+ : Fe^{3+} : [FeL]^{2+}$, равное 1 : 1 : 0.16 : 0.1. Вычисления по программе HySS 2009 показывают, что этим требованием удовлетворяет водный раствор 0.02 М пиридин-3-карбоновой кислоты и 0.003 М железа (III) при pH 2.0.

Для экспериментального подтверждения правильности выполненных расчетов катионит КУ-2 в исходных H- или Fe(III)-формах поместили в ионообменные колонки и привели в равновесие с водными растворами расчетного состава. Анализ равновесного распределения пиридин-3-карбоновой кислоты и железа (III) между водным раствором и сульфокатионитом КУ-2 (табл. 2) показывает, что независимо от исходной противоионной формы в катионите, приведенном в равновесие с водным раствором, имеющими соотношение молярностей катионов $H^+ : [H_2L]^+ :$

Таблица 2. Равновесные составы раствора и сульфокатионита КУ-2, содержащего комплекс пиридин-3-карбоновой кислоты (HL) и железа (III) (ϵ – полная емкость колонки)

КУ-2	ϵ , мэкв	Равновесный раствор			Содержание в полимере		
		[HL], моль/л	[Fe(III)], моль/л	pH	[Fe(III)], ммоль	[HL], ммоль	[Me]/[A]
H-форма	4.0	0.02	0.00305	2.05	2.00	2.05	0.98
Fe(III)-форма	4.0	0.02	0.0028	2.06	1.97	2.08	0.95

Таблица 3. Волновые числа полос поглощения в фурье-ИК-спектрах пиридин-3-карбоновой кислоты (HL), ее натриевой соли (NaL) и сульфокатионита КУ-2 в различных противоионных формах в диапазоне 1800–1000 cm^{-1}

HL	NaL	КУ-2 в противоионной форме				Отнесение
		H ⁺	[H ₂ L] ⁺	Fe ³⁺	[FeL] ²⁺	
1712 s	–	–	1728 s	–	–	$\nu_{\text{st}}(\text{C}=\text{O})$ - группы COOH [21–23]
–	1613 s	–	–	–	1640 s	$\nu_{\text{st as}}(\text{COO}^-)$ [24, 25]
1596 s	1558 s	–	1602 w	–	1597 s	колебания пиридинового кольца [24]
1416 s	1407 s	–	1411 s	–	1421 s	$\nu_{\text{st sy}}(\text{COO}^-)$ [24, 26]
–	–	1212 s	1212 s	–	1214 s	колебания в сульфокатионите на полистирол-дивинилбензольной матрице [27]
–	–	1150 s	1160 s	1148 s	1153 s	
–	–	1125 s	1125 s	1125 s	1125 s	
–	–	1033 s	1033 s	1034 s	1033 s	
–	–	1006 s	1006 s	1006 s	1006 s	

Обозначения: s – сильная полоса, w – слабая полоса, st – валентные колебания, as – асимметричные колебания, sy – симметричные колебания.

: $\text{Fe}^{3+} : [\text{FeL}]^{2+}$, равное 1 : 1 : 0.16 : 0.1, все обменные центры заняты двухзарядным комплексом пиридин-3-карбоновой кислоты с железом. Содержание комплекса $[\text{FeL}]^{2+}$ в сульфокатионите КУ-2 составляет 44.5% от массы полимера.

В табл. 3 представлено отнесение полос в Фурье-ИК-спектре образца сульфокатионита КУ-2 в $[\text{FeL}]^{2+}$ -форме. Как видно, в спектрах КУ-2 (независимо от типа противоиона) интенсивные полосы в области 1000–1200 cm^{-1} отвечают колебаниям в сульфокатионите на полистирол-дивинилбензольной матрице.

В спектрах всех соединений, содержащих пиридин-3-карбоновую кислоту, присутствуют полосы в диапазоне 1407–1421 cm^{-1} ($\nu_{\text{st sy}} \text{COO}^-$) и около 1600 cm^{-1} (колебания пиридинового кольца). Интенсивная полоса 1712 cm^{-1} в спектре пиридин-3-карбоновой кислоты HL, соответствующая валентным колебаниям C=O группы COOH, смещается до значения 1728 cm^{-1} в спектре КУ-2, содержащем катионы протонированной пиридин-3-карбоновой кислоты $[\text{H}_2\text{L}]^+$. Эта полоса исчезает в спектре полимера в $[\text{FeL}]^{2+}$ -форме. В спектре кристаллической натриевой соли пиридин-3-карбоновой кислоты (NaL) отсутствует полоса 1712 cm^{-1} , но содержится интенсивная по-

лоса 1613 cm^{-1} , соответствующая валентным колебаниям COO^- . В спектре полимера, содержащем в качестве противоионов комплексы железа с анионами пиридин-3-карбоновой кислоты ($[\text{FeL}]^{2+}$), полоса $\nu_{\text{st as}}(\text{COO}^-)$ смещается до значения 1640 cm^{-1} . Фурье-ИК-спектры показывают, что в полимерной фазе анионы (L^-) координируются с катионами Fe^{3+} через карбоксилатные атомы кислорода, образуя комплексные катионы $[\text{FeL}]^{2+}$.

Таким образом, из данных материального баланса сорбционных процессов и Фурье-ИК-спектроскопии следует, что в фазе сульфокатионита анионы пиридин-3-карбоновой кислоты с Fe^{3+} образуют комплексы состава 1 : 1. Найденные значения констант равновесия ионного обмена и лигандной сорбции с участием пиридин-3-карбоновой кислоты, сульфокатионита КУ-2, протонов и катионов железа (III) позволяют рассчитывать равновесный состав раствора, необходимого для заполнения сульфокатионита КУ-2 заданным противоионным составом. Возможность получения сульфокатионита КУ-2, содержащего иммобилизованные комплексы пиридин-3-карбоновой кислоты и железа до 45% от массы полимера, на наш взгляд, представляет фи-

зико-химическую основу создания таргетных биологически активных препаратов пролонгированного действия на основе пиридин-3-карбонистой кислоты.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (проект № АААА-А17-117041910146-5) с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith K.E., Callahan M.P., Gerakines P.A. et al.* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2014. V. 136. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.001>
2. *McMurtry B.M., Turner A.M., Saito S.E. et al.* // *J. Chem. Phys.* 2016. V. 472. P. 173. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2016.03.010>
3. *Альтишулер Г.Н., Остапова Е.В., Альтишулер О.Г. и др.* // *Журн. прикладной химии.* 2019. Т. 92. № 4. С. 484. <https://doi.org/10.1134/S004446181904008X>
4. *Altshuler H., Ostapova E., Altshuler O. et al.* // *ADMET and DMPK.* 2019. V. 7. № 1. P. 76. <https://doi.org/10.5599/admet.626>
5. *Альтишулер Г.Н., Шкуренко Г.Ю., Остапова Е.В. и др.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2017. № 7. С. 1177.
6. *Альтишулер Г.Н., Остапова Е.В., Альтишулер О.Г.* // *Журн. физ. химии.* 2019. Т. 93. № 4. С. 579. <https://doi.org/10.1134/S0044453719040034>
7. *Альтишулер Г.Н., Остапова Е.В., Малышенко Н.В., Альтишулер О.Г.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2017. № 10. С. 1854.
8. *Куранова Н.Н., Чеснокова Н.А., Гущина А.С., Граждан К.В., Шарнин В.А.* // *Журн. физ. химии.* 2020. Т. 94. № 10. С. 1496. <https://doi.org/10.31857/S0044453720100179>
9. *Kumar M., Yadav K.A.* // *Spectrochimica Acta Part A.* 2011. V. 79. P. 1316. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.04.062>
10. *Ерина О.В., Хохлов В.Ю., Бутырская Е.В., Нечаева Л.С.* // *Журн. общ. химии.* 2013. Т. 83. № 3. С. 379.
11. *Lal A., Shukla N., Singh D.K.* // *J. Chem. Pharm. Res.* 2015. V. 7. № 9. P. 590.
12. *Fei H., Lin Y.* // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2016. V. 481. P. 256. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.07.056>
13. *Marsh J.L., Wayman A.E., Smiddy N.M. et al.* // *Langmuir.* 2017. V. 33. № 46. P. 13224. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03338>
14. *Shaikh Abdul Rahim, Sayyed Hussain, Mazahar Farooqu* // *Int. J. Chem. Sci.* V. 12. № 4. 2014. P. 1299.
15. *Мархол М.* Ионообменники в аналитической химии. М.: Мир, 1985. Ч. 1. 264 с.
16. *The International Pharmacopoeia, Fifth Edition.* <http://apps.who.int/phint/en/p/docf>
17. *HySS 2009. Hyperquad Simulation and Speciation, Protonic Software, Leeds (UK), Universita di Firenze, Firenze (Italy), 2009.* <http://www.hyperquad.co.uk/hyss.htm>
18. *Rajhi Aisha Y., Ju Yi-Hsu, Angkawijaya Artik E. et al.* // *J. Solution Chem.* 2013. V. 42. P. 2409.
19. *The IUPAC Stability Constants Database.* <http://www.acadsoft.co.uk/scdbase/scdbase.htm>
20. *El-Dessouky M.A., El-Ezaby M.S., Shuaib N.M.* // *Inorganica Chimica Acta.* 1980. V. 46. P. 7. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)84161-4](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)84161-4)
21. *Fazary Ahmed E., Ju Yi-Hsu, Rajhi Aisha Q. et al.* // *Open Chem.* 2016. V. 14. P. 287. <https://doi.org/10.1515/chem-2016-0028>
22. *Lal A., Shukla N., Singh V.B. et al.* // *J. Chem. Pharm. Res.* 2016. V. 8. № 4. P. 136.
23. *Singh Priyanka, Singh N.P., Yadav R.A.* // *J. Chem. Pharm. Res.* 2011. V. 3. № 1. P. 737.
24. *Morsy A.M. Abu-Youssef* // *Polyhedron.* 2005. V. 24. № 14. P. 1829. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2005.05.026>
25. *Абрамова Л.П., Альтишулер О.Г., Малышенко Н.В. и др.* // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2015. Т. 23. № 2. P. 151.
26. *Taqa A.A., Al-Kassar I.A., Iyoob Sh. A.* // *Intern. J. for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET).* 2014. V. 2. № XI. P. 350. <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=1311>
27. *Free Online Spectral Library from Bio-Rad.* <https://spectrabase.com/compound/7SSYqD9hehI>