

**ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ**  
**PHYSICAL CHEMISTRY**

УДК 541.183.12  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-391-399>

Поступила в редакцию 05.08.2021  
Received 05.08.2021

**В. С. Солдатов, Л. Н. Шаченкова, Е. Г. Косандрович, П. В. Нестеронк**

*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ТИТРОВАНИЕ СЛАБОУСНОВНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ АНИОНИТОВ  
В ПРИСУТСТВИИ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩИХ ДВУХВАЛЕНТНЫХ КАТИОНОВ**

**Аннотация.** Получены кривые потенциометрического титрования полностью протонизированных волокнистых ионитов гидроксидом калия на фоне 1 М КСl в присутствии хлоридов  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ . Иониты были получены модификацией промышленного полиакрилонитрильного волокна диэтилентриамином и триэтилентетраамином, преимущественно содержали функциональные группы  $R-CO-NH-(CH_2CH_2NH)_nH$  ( $n = 2$  или  $3$ ) и небольшое количество карбоксильных групп. Из полученных данных рассчитана сорбция  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Ca^{2+}$  ионами в зависимости от рН среды. Установлено, что исследованные иониты с высокой селективностью сорбируют ионы тяжелых металлов в широком интервале кислотности растворов (рН 2–9) благодаря образованию металл-полимерных комплексов с полиаминными функциональными группами. Максимальная сорбционная емкость составляет 1,5–2,7 и 4–5 экв/г для ионитов с  $n = 2$  и  $3$  соответственно.

**Ключевые слова:** волокнистые аниониты, сорбция тяжелых металлов, металл-полимерные комплексы, потенциометрическое титрование ионитов

**Для цитирования.** Титрование слабоосновных волокнистых анионитов в присутствии комплексобразующих двухвалентных катионов / В. С. Солдатов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 391–399. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-391-399>

**V. S. Soldatov, L. N. Shachenkova, E. G. Kosandrovich, P. V. Nesteronok**

*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**TITRATION OF WEAK BASE FIBROUS ANION EXCHANGERS  
IN THE PRESENCE OF COMPLEX-FORMING DIVALENT CATIONS**

**Abstract.** Curves of potentiometric titration of fully protonized fibrous ion exchangers with potassium hydroxide against the background of 1 M KCl in the presence of chlorides of  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  were obtained. The ion exchangers were synthesized by modifying of industrial polyacrylonitrile fiber with diethylenetriamine and triethylenetetraamine and predominantly contained functional groups  $R-CO-NH-(CH_2CH_2NH)_nH$  ( $n = 2$  or  $3$ ) and a small amount of carboxyl groups. The sorption of  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  by ion exchangers was calculated from the data obtained depending on the pH of the medium. It was found that the investigated ion exchangers with high selectivity sorb heavy metal ions in a wide range of acidity of solutions (pH 2–9) due to the formation of metal-polymer complexes with polyamine functional groups. The maximum sorption capacity is 1.5–2.7 and 4–5 meq/g for ion exchangers with  $n = 2$  and  $3$ , respectively.

**Keywords:** fibrous anion exchangers, sorption of heavy metals, metal-polymer complexes, potentiometric titration of ion exchangers

**For citation.** Soldatov V. S., Shachenkova L. N., Kosandrovich E. G., Nesteronok P. V. Titration of weak base fibrous anion exchangers in the presence of complex-forming divalent cations. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-391-399>

**Введение.** Слабоосновные аниониты на основе полиакрилонитрильных волокон нашли практическое применение для очистки питьевой воды [1], воздуха чистых комнат [2], производственных помещений от токсичных и плохо пахнущих веществ [3]. Помимо своей анионообменной функции, они обладают значительной сорбционной активностью по ионам переходных, тяжелых

и драгоценных металлов [4] благодаря наличию в них первичных и вторичных аминогрупп, образующих устойчивые комплексы с такими металлами.

Известно, что слабоосновные аниониты, содержащие аминогруппы различной степени замещенности, поглощают ионы металлов, таких как  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  [5]. Причина этого явления – образование металл-полимерных комплексов, в которых центральным атомом является металл, а лигандами – фрагменты полимера, обладающие донорно-акцепторными свойствами. Структура этих комплексов достоверно не известна и ее количественных характеристик не имеется. Иониты с амидоамиными группами, получаемые полимер-аналогичными превращениями полимеров с нитрильными группами, также обладают высокой сорбционной активностью по отношению к комплексообразующим ионам. В частности, полученные ранее в Институте физико-органической химии НАН Беларуси волокнистые иониты этого типа перспективны для выделения и разделения ионов металлов в водных средах [6–10]. Сорбция ионов металлов существенно возрастает с увеличением pH равновесных растворов. В исследованиях этих процессов интервал pH, в котором изучается сорбция, ограничивается pH осаждения соответствующих гидроксидов. В работе [11] сорбция ионов металлов изучалась в интервале pH, включающем образование осадков (pH 1–12). Такие исследования имеют практическое значение в связи с проблемой получения гибридных полимерно-неорганических сорбентов, в которых наночастицы или аморфная масса неорганического осадка распределены внутри полимерной матрицы полимера носителя [12, 13]. Подобного рода сорбенты обычно получают при контакте ионита, содержащего один из компонентов, необходимый для осадкообразования, с раствором, содержащим другие компоненты, при изменении pH раствора. Другой возможностью является образование осадка из раствора, содержащего оба компонента, при изменении pH раствора. В этом случае сорбция и образование осадка протекают одновременно. Осадок может образовываться либо в растворе, либо в фазе полимера. Закономерности таких процессов практически не исследовались ранее.

Основная цель настоящей работы – установление принципиальной возможности использования сорбционных комплексов ионитов этого типа в качестве источников микроэлементов при выращивании растений на волокнистых искусственных почвах, предназначенных для выращивания растений в условиях невесомости. Ранее аналогичное исследование было проведено на хелатообразующих сорбентах с аминодицетатными группами [11], являющихся наиболее распространенными высокоселективными сорбентами двухвалентных катионов. Слабоосновные иониты, содержащие полиаминные радикалы, могут обладать некоторыми преимуществами перед хелатными сорбентами: взаимодействие катиона с аминными лигандами не подвергается конкуренции макроионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , присутствующих в питательном растворе, а способ получения анионитов выбранного типа существенно проще, чем для хелатного сорбента.

**Иониты.** Исследовано два анионита на основе полиакрилонитрильного волокна Нитрон, полученные его химической модификацией диэтилентриамином (ДЭТА) и триэтилтетраамином (ТЭТА), как описано в [14]. Их условные названия АК-22(2) и АК-22(3) соответственно. Формулы преобладающих анионообменных групп приведены ниже:

АК-22(2)	АК-22(3)
$\bullet - \text{CH} - \text{CH}_2 - \bullet$ $ $ $\text{C} = \text{O}$ $ $ $\text{NH} - \text{CH}_2\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHR}$	$\bullet - \text{CH} - \text{CH}_2 - \bullet$ $ $ $\text{C} = \text{O}$ $ $ $\text{NH} - \text{CH}_2\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHR}$

Символ «R» в этих формулах может означать либо атом водорода, либо полимерный радикал той же самой или другой полимерной цепи.

Кроме анионообменных групп иониты содержат относительно небольшое количество карбоксильных групп, образующихся в водных средах в процессе гидролиза нитрильных групп волокна при его обработке аминами. Основные характеристики ионитов – обменные емкости в  $\text{Cl}^-/\text{H}^+$  ( $E_{\text{ан}}$  – анионообменная;  $E_{\text{кат}}$  – катионообменная) и водопоглощение ( $W$ ) приведены в таблице.

## Основные характеристики исследованных ионитов

## Main characteristics of the studied ion exchangers

Ионит	$E_{ан}$ , мЭкв/г	$E_{кат}$ , мЭкв/г	$W$ , г воды/г ионита
АК-22(2)	3,5	1,1	0,5
АК-22(3)	5,9	1,0	0,9

**Экспериментальная часть.** В данной работе применяли метод одновременного исследования сорбции ионов металлов и pH раствора, описанный ранее [11].

Титрование ионита в  $H^+/Cl^-$ -форме проводилось на фоне 1 н. HCl растворами KOH в присутствии избытка HCl (3–10 ммоль/г, концентрация HCl 1,75 М). Добавление HCl в фоновый раствор было необходимо для полной протонизации всех кислотных и основных групп ионита. К тому же добавление HCl к титруемому иониту было сделано для того, чтобы для всех катионов титрование начиналось с практически одинакового и очень низкого значения pH (~1), когда все виды катионов еще не сорбируются ионитами и целиком находятся в растворе. Если не добавлять избыток кислоты к иониту, то уже в нулевой точке (когда титрант еще не добавлен) будут получены разные значения pH для разных катионов из-за их различной сорбции ионитами и информация, относящаяся к более низким pH, будет потеряна. Высокую концентрацию KOH в титранте необходимо было использовать для предотвращения существенного изменения объема раствора при добавке порций титранта. В этот же раствор добавляли хлориды  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Ca^{2+}$  в количестве, превышающем возможную предполагаемую поглотительную емкость ионита. Кроме того, снимали кривые титрования ионита в их отсутствие и растворов самих солей.

При титровании использовали метод одной навески [15]. Точная навеска нарезанных на фрагменты волокон ионита длиной 2–4 мм и массой ~0,5 г помещалась в исходный подкисленный раствор хлоридов двухвалентных катионов. Объем раствора составлял 30 мл. Суспензия ионита в растворе постоянно интенсивно перемешивалась магнитной мешалкой. Комбинированный стеклянный электрод оставался в перемешиваемой суспензии все время в процессе титрования (обычно около 10 ч). После установления постоянного pH добавляли в суспензию порции титранта 0,15–1 мл микропипеткой и дополнительно контролировали взвешиванием с максимальной погрешностью  $\pm 0,4$  мг. Следующую порцию титранта вводили в ячейку для титрования после установления постоянного значения pH, изменяющегося не более чем на 0,01 единицы в течение последующих 5 мин. В это время из ячейки отбирали пробу раствора объемом 0,15 мл (контроль по массе), которую переносили в мерную колбу, подкисляли азотной кислотой для растворения возможных осадков, разбавляли и отдавали на определение концентрации двухвалентного иона на спектрометре с индуктивно связанной плазмой. По окончании титрования суспензии проводили ее обратное титрование раствором HCl. В процессе всего эксперимента ячейка для титрования была герметично закрыта для предотвращения поглощения углекислого газа из воздуха. Небольшое отверстие для введения порции титранта и отбора пробы раствора для анализа открывали на несколько секунд для выполнения этих операций. Общее изменение объема раствора при этих операциях могло составить до 2 % объема раствора и в дальнейших расчетах не учитывалось.

**Результаты и их обсуждение.** Кривые титрования системы « $H^+/Cl^-$ -форма слабоосновного ионита–HCl– $MeCl_2$ » представлены на рис. 1, 2. Оба ионита содержат два типа функциональных групп, способных к взаимодействию с ионами переходных металлов за счет образования ион-полимерных комплексов – COOH и  $R^+Cl^-$  с их депротонизованными формами. Сорбция ионов  $Me^{2+}$  начинается в сильноокислой среде и прогрессивно увеличивается с ростом pH. Кальций, не образующий прочных комплексов с аммиаком и аминами, поглощается исключительно за счет ионного обмена на карбоксилатных группах. Это же происходит, начиная с pH 3, со всеми двухвалентными катионами. При увеличении pH ионы переходных металлов сорбируются ионитами за счет образования комплексов с участием аминогрупп с различной степенью замещенности, в которых в качестве лигандов выступают также молекулы воды и карбоксилатные группы.

Примечательно, что сорбция ионов переходных металлов продолжает расти с увеличением pH после достижения критических pH осадкообразования, а максимальные значения сорбции

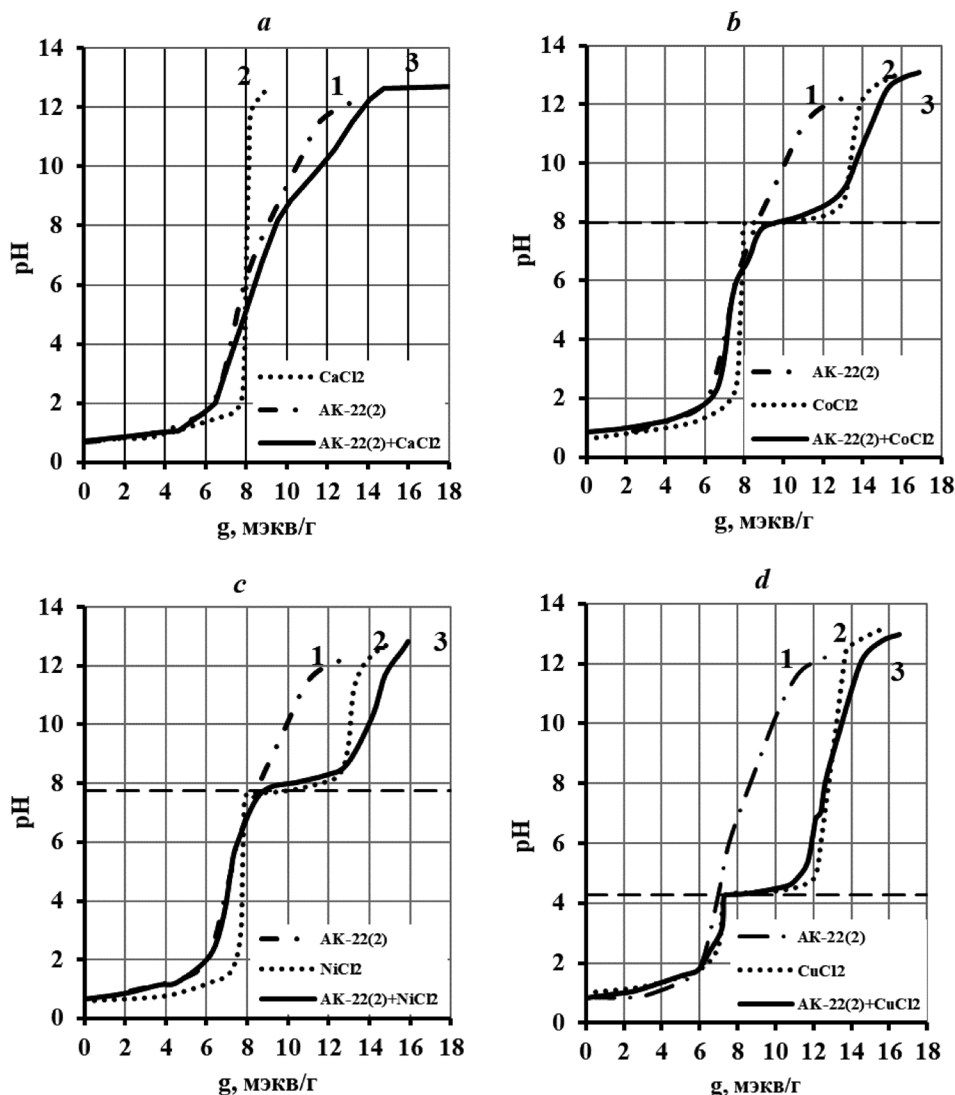


Рис. 1. Кривые титрования КОН системы:  $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ -форма ионита АК-22(2)–1 М  $\text{KCl-HCl}$  (стартовый pH 0,85)– $\text{MeCl}_2$ . Кривая 1 –  $\text{MeCl}_2$  отсутствует; 2 – ионит отсутствует; 3 – присутствуют все компоненты. Стартовое количество двухвалентных ионов в системе (мэкв/г ионита): а –  $\text{Ca}^{2+}$  6,5613, б –  $\text{Co}^{2+}$  5,5595, с –  $\text{Ni}^{2+}$  5,0981, д –  $\text{Cu}^{2+}$  5,6332. Горизонтальной чертой указано pH образования осадка

Fig. 1. Titration curves by KOH of the system:  $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ -form of the ion exchanger АК-22(2)–1 М  $\text{KCl-HCl}$  (starting pH 0.85)– $\text{MeCl}_2$ . Curve 1 –  $\text{MeCl}_2$  is absent; 2 – the ion exchanger is absent; 3 – all components are present. The starting amount of divalent ions in the system (m-eq/g of ion exchanger): а –  $\text{Ca}^{2+}$  6.5613, б –  $\text{Co}^{2+}$  5.5595, с –  $\text{Ni}^{2+}$  5.0981, д –  $\text{Cu}^{2+}$  5.6332. The horizontal line indicates the pH of the precipitate formation

достигаются при pH на несколько единиц выше этой величины (рис. 3, 4), что находится в соответствии с данными работы [16]. Показано, что структура металл-полимерных комплексов ионитов с амидоамиными группами может резко меняться в щелочной среде с образованием значительно более прочного комплекса.

Структура полимерных комплексов металлов в рассматриваемых ионитах известна только в общих чертах. Считается, что лигандами полиаминных комплексов металла являются атомы азота, образующие координационные связи с центральным атомом. Это следует из известных представлений химии комплексных соединений и не вызывает сомнений [17]. Однако не ясно, какие другие атомные группировки и (или) молекулы заполняют остальные позиции координационной сферы, а также не известно и зарядовое состояние центрального атома и лигандов, прочность, длина связей, степень ковалентности и взаимное расположение лигандов в таких комплексах. Методов экспериментального исследования, позволяющих однозначно ответить

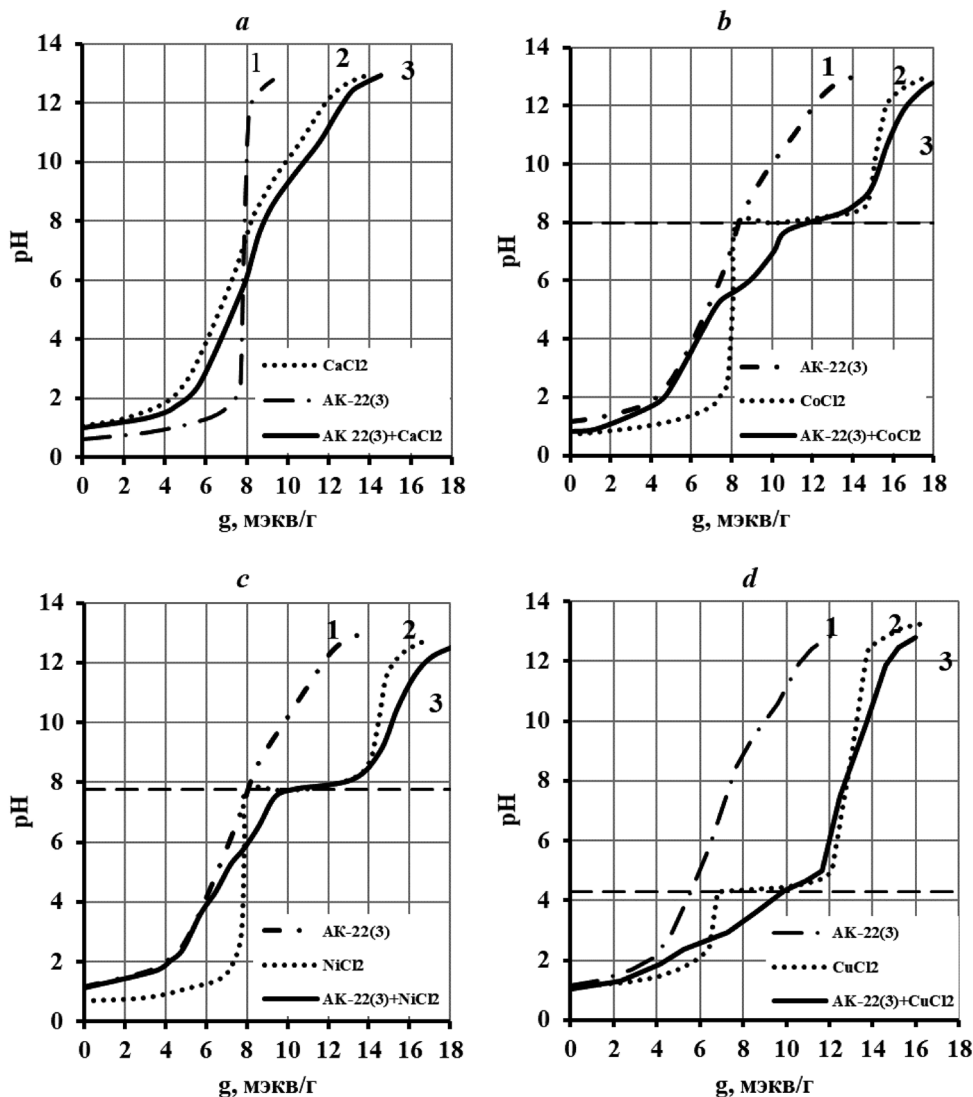


Рис. 2. Кривые титрования KOH системы:  $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ -форма ионита АК-22(3)–1 М KCl–HCl (стартовый pH 0,85)– $\text{MeCl}_2$ . Кривая 1 –  $\text{MeCl}_2$  отсутствует; 2 – ионит отсутствует; 3 – присутствуют все компоненты. Стартовое количество двухвалентных ионов в системе (мэкв/г ионита): а –  $\text{Ca}^{2+}$  6,8446, б –  $\text{Co}^{2+}$  6,4383, в –  $\text{Ni}^{2+}$  6,4023, д –  $\text{Cu}^{2+}$  5,5050. Горизонтальной чертой указано pH образования осадка

Fig. 2. Titration curves by KOH of the system:  $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ -form of the ion exchanger АК-22(3)–1 М KCl–HCl (starting pH 0.85)– $\text{MeCl}_2$ . Curve 1 –  $\text{MeCl}_2$  is absent; 2 – the ion exchanger is absent; 3 – all components are present. The starting amount of divalent ions in the system (m-eq/g of ion exchanger): а –  $\text{Ca}^{2+}$  6.8446, б –  $\text{Co}^{2+}$  6.4383, в –  $\text{Ni}^{2+}$  6.4023, д –  $\text{Cu}^{2+}$  5.5050. The horizontal line indicates the pH of the precipitate formation

на эти вопросы, в настоящее время не существует. Для выяснения указанных выше параметров использовали метод квантово-химического моделирования [16], однако полученных к настоящему времени результатов недостаточно для однозначного заключения о составе и структуре сорбционных комплексов.

Во всех случаях максимальная сорбция ионов кобальта, никеля и меди ионитом АК-22(3) в 1,5–3,4 раза выше, чем ионитом АК-22(2) (рис. 3, 4). Это связано с тем, что в первом случае функциональная группа ионита содержит три, а во втором – два атома азота, потенциально способных выступать в роли лигандов при образовании комплексов с ионами этих металлов. Кроме большего количества лигандов в функциональной группе, это может быть связано и с другими причинами, неизбежно играющими значительную роль в наших полифункциональных сорбентах, таких как участие в процессе связывания ионов карбоксильных групп, образование межцепных связей при реакции триэтилентетрамина с полиакрилонитрильным волокном, участие

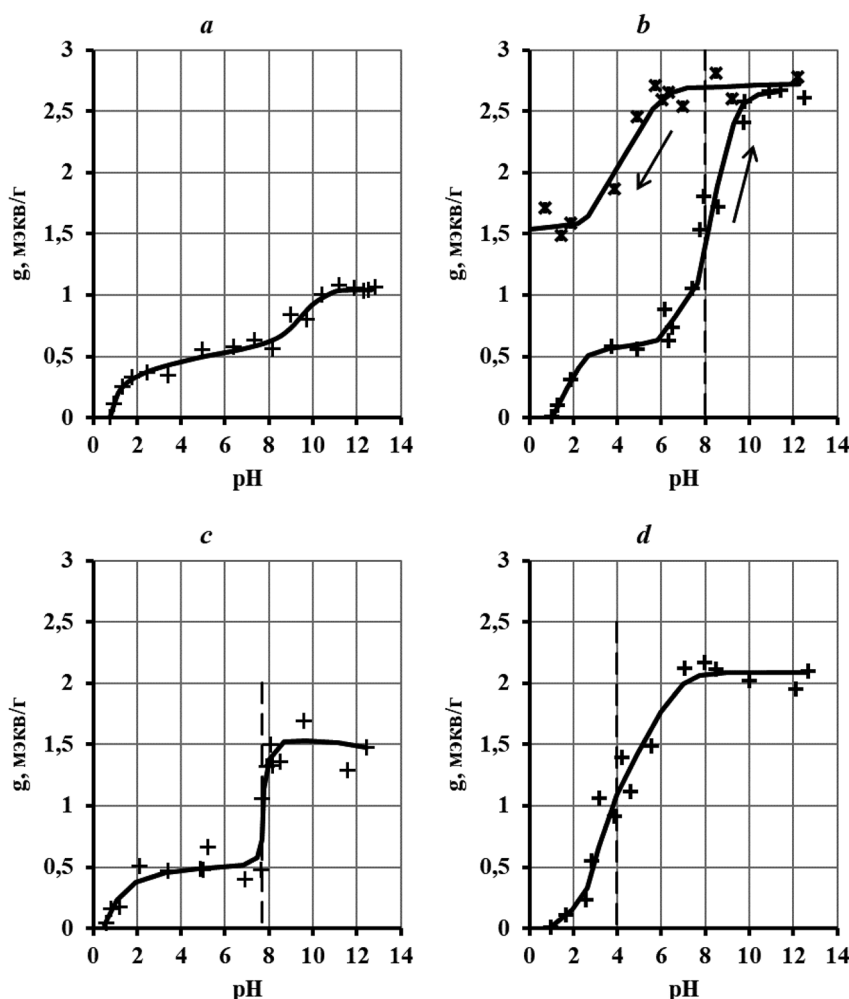


Рис. 3. Сорбция ионов металлов ( $g$ , мэкв/г) при потенциометрическом титровании ионита АК-22(2) в зависимости от pH раствора. Стартовое количество двухвалентных ионов в системе (мэкв/г ионита):  $a$  –  $\text{Ca}^{2+}$  6,5613,  $b$  –  $\text{Co}^{2+}$  5,5595,  $c$  –  $\text{Ni}^{2+}$  5,0981,  $d$  –  $\text{Cu}^{2+}$  5,6332. Вертикальными линиями обозначена граница pH осадкообразования

Fig. 3. Sorption of metal ions ( $g$ , meq/g) during potentiometric titration of ion exchanger АК-22(2) depending on the pH of the solution. The starting amount of divalent ions in the system (meq/g of ion exchanger):  $a$  –  $\text{Ca}^{2+}$  6.5613,  $b$  –  $\text{Co}^{2+}$  5.5595,  $c$  –  $\text{Ni}^{2+}$  5.0981,  $d$  –  $\text{Cu}^{2+}$  5.6332. The vertical lines indicate the pH limit of sedimentation

в сорбционном комплексе лигандов, принадлежащих различным функциональным группам, разное координационное число катионов. Кривые прямого и обратного титрования практически совпадают, что свидетельствует о равновесности процесса в каждой точке кривых. Исключение составляют системы с хлоридом кобальта.

Особенностью этой системы является то, что ион двухвалентного кобальта в составе комплексов различных типов легко окисляется, превращаясь в трехвалентный  $\text{Co}^{3+}$  [17], который образует более прочные комплексы с аминогруппами ионита. Процесс окисления интенсивно проходит в щелочной среде, поэтому при обратном титровании большая часть кобальта не вымывается соляной кислотой из ионита и его сорбция становится практически необратимой. Не совпадают также и кривые прямого и обратного титрования (см. направление стрелок на рис. 3,  $b$  и 4,  $b$ ). Этого явления не наблюдается при сорбции  $\text{Co}^{2+}$  хелатообразующим ионитом Фибан X-1, формирующим более стабильные комплексы с карбоксилатными группами и третичным атомом азота аминодиацетатной группы [11].

Для иона никеля наблюдается сравнительно низкая максимальная сорбция на ионите АК-22(2) и наивысшая сорбция на АК-22(3). Возможно, это связано с тем, что этот ион имеет наивысшее координационное число и для его прочного связывания необходимо большее число лигандов, чем содержится в функциональной группе ионита АК-22(2).

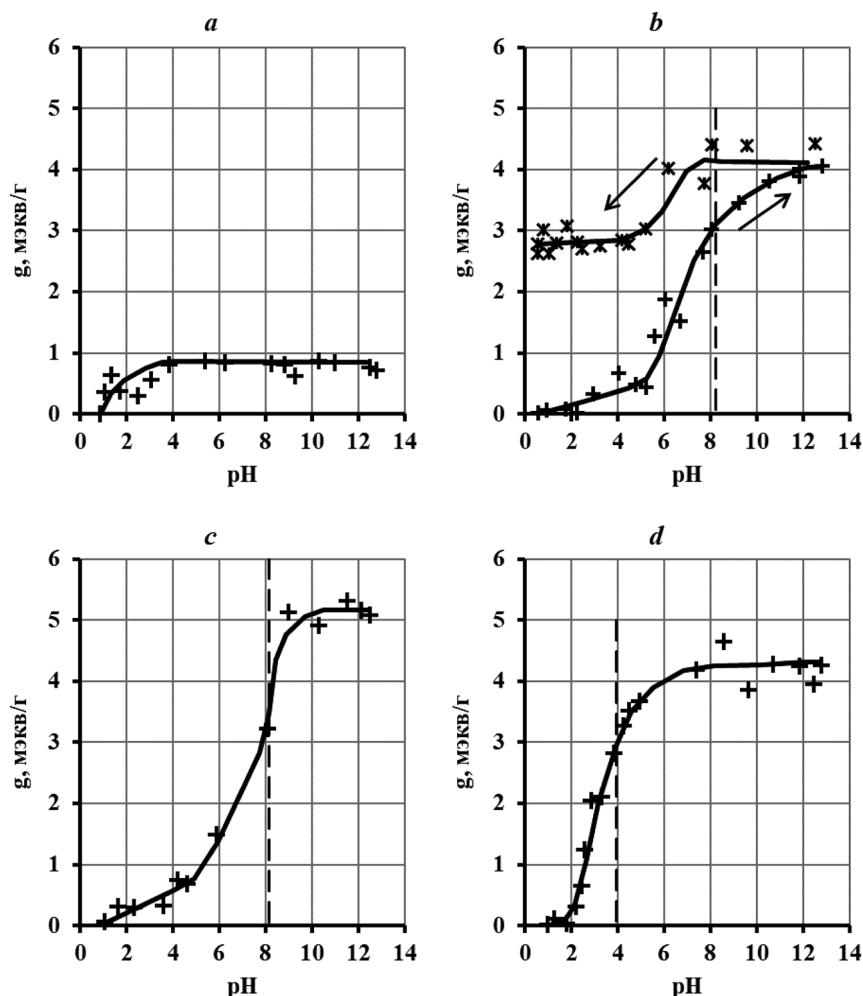


Рис. 4. Сорбция ионов металлов (g, мэкв/г) при потенциометрическом титровании ионита АК-22(3) в зависимости от pH раствора. Стартовое количество двухвалентных ионов в системе (мэкв/г ионита): *a* –  $\text{Ca}^{2+}$  6,8446, *b* –  $\text{Co}^{2+}$  6,4383, *c* –  $\text{Ni}^{2+}$  6,4023, *d* –  $\text{Cu}^{2+}$  5,5050. Вертикальными линиями обозначена граница pH осадкообразования

Fig. 4. Sorption of metal ions (g, meq/g) during potentiometric titration of ion exchanger AK-22(3) depending on the pH of the solution. The starting amount of divalent ions in the system (meq/g of ion exchanger): *a* –  $\text{Ca}^{2+}$  6.8446, *b* –  $\text{Co}^{2+}$  6.4383, *c* –  $\text{Ni}^{2+}$  6.4023, *d* –  $\text{Cu}^{2+}$  5.5050. The vertical lines indicate the pH limit of sedimentation

Особое место занимают ионы меди как при взаимодействии с ионитами АК-22(2) и АК-22(3), так и с хелатным сорбентом, описанным ранее [11]. Ионы меди интенсивно поглощаются уже при pH 4. После первого плато поглощения  $\text{Cu}^{2+}$  при pH 4,2, соответствующему окончанию образования осадка, повышение pH приводит к новому увеличению сорбции за счет растворения осадка из-за ионизации карбоксильных групп при росте pH и дальнейшего поглощения ими ионов. Новое плато образуется при pH около 8, так же как и в случае  $\text{Ni}^{2+}$ , когда большая часть карбоксильных групп ионизирована. В условиях данного эксперимента увеличение сорбции металлических ионов происходит при уменьшении их концентрации в растворе. Это происходит из-за того, что поглощение ионов  $\text{Me}^{2+}$  возможно только на ионизированных карбоксильных группах, заряд которых в отсутствие ионов  $\text{Me}^{2+}$  компенсируется фоновыми ионами  $\text{K}^+$  и депротонированными аминогруппами.

**Заключение.** Волокнистые иониты с амидоамиными группами, содержащие полиаминные радикалы, являются эффективными сорбентами двухвалентных ионов переходных металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ), не уступающими по сорбционной емкости хелатирующим сорбентам. Сорбция металлических двухзарядных ионов в большинстве случаев обратима, а кривые прямого и обратного титрования систем типа ( $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ -форма ионита АК-22)–( $\text{KCl}$ )–( $\text{KOH}/\text{HCl}$ )–( $\text{MeCl}_2$ ) совпадают, несмотря на то, что они включают процессы образования и растворения осадков гидроксидов.

Исключением является система с ионом  $\text{Co}^{2+}$ , что связано с его окислением в щелочной среде с переходом в трехвалентное состояние. Эффективность исследованных ионитов возрастает с увеличением числа аминных фрагментов в функциональной группе. Сорбционная емкость ионита с функциональной группой, содержащей четыре атома азота, более чем вдвое превосходит емкость ионита, который содержит три атома азота в группе. Такие иониты могут быть использованы как носители микроэлементов при выращивании растений, в процессах очистки воды от ионов переходных металлов, их предконцентрирования при количественном определении в природных и сточных водах.

### Список использованных источников

1. Синтез аминокарбоксильных ионитов на основе полиакрилонитрильного волокна / И. О. Мельников [и др.] // Вода: химия и экология. – 2015. – № 6. – С. 29–38.
2. Солдатов, В. С. Новые фильтрационные материалы для очистки воздуха в электронной промышленности / В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович // *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. of the 5th International conference (NEET-2007)*, Zakopane, Poland, 12–15 June, 2007. – Zakopane, 2007. – С. 55.
3. Общеобменная вентиляция с рециркуляционной очисткой воздуха в животноводческих помещениях / В. Н. Гутман [и др.] // *Механизация и электрификация сельского хозяйства: Межведом. темат. сб.* – 2009. – Вып. 43, № 2. – С. 80–88.
4. Салдадзе, К. М. Комплексообразующие иониты / К. М. Салдадзе, В. Д. Копылова-Валова. – М.: Химия, 1980. – 335 с.
5. Мясоедова, Г. В. Применение комплексообразующих сорбентов ПОЛИОРГС в неорганическом анализе / Г. В. Мясоедова // *Журн. аналит. химии.* – 1990. – Т. 45, № 10. – С. 1878–1887.
6. Исследование сорбции некоторых металлов на синтезированных комплексообразующих ионитах / Ф. Б. Эшкурбонов [и др.] // *Высокомолекуляр. соед.* – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 85–89.
7. Челнакова, П. Н. Определение устойчивости ионитных комплексов при сорбции катионов меди слабоосновным анионитом АМ-7 / П. Н. Челнакова, В. А. Колодяжный, Е. С. Волкова // *Журн. физ. химии.* – 2008. – Т. 82, № 12. – С. 2353–2357.
8. Soldatov, V. S. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, G. I. Sergeev // *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents.* – 1988. – Vol. 7, N 1-2. – P. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
9. Сорбция никеля (II) и кобальта (II) из аммонийных растворов волокнистым ионитом с иминодиацетатными группами / В. С. Солдатов [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* – 2010. – № 3. – С. 64–69.
10. Селективное выделение меди и цинка из модельных растворов шахтных вод волокнистыми ионитами / В. С. Солдатов [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* – 2011. – № 2. – С. 41–45.
11. Титрование хелатообразующего волокнистого сорбента в присутствии комплекс-образующих двухвалентных катионов / В. С. Солдатов [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 263–269. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-263-269>
12. Polymer supported inorganic nanoparticles: characterization and environmental applications / L. Cumbel [et al.] // *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents.* – 2003. – Vol. 54, N 1–3. – P. 167–180. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(02\)00192-x](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(02)00192-x)
13. A new hybrid (polymer/inorganic) fibrous sorbent for arsenic removal from drinking water / O. M. Vatutsina [et al.] // *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents.* – 2007. – Vol. 67, N 3. – P. 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.10.009>
14. Kosandrovich, E. G. Fibrous ion exchangers / E. G. Kosandrovich, V. S. Soldatov // *Ion exchange technology I: theory and materials / Inamuddin Dr. Mohammad Luqman (eds.).* – UK: Springer, 2012. – P. 299–371. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9)
15. Soldatov, V. S. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality / V. S. Soldatov, Z. I. Sosinovich, T. V. Mironova // *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents.* – 2004. – Vol. 58. – N 1. – P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.004>
16. Зеленковский, В. М. Компьютерное моделирование структуры полимерных ионитов: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04 / В. М. Зеленковский. – Минск, 2012. – 327 л.
17. Бьеррум, Я. Образование аминов металлов в водном растворе: теория обратимых ступенчатых реакций / Я. Бьеррум; пер. с англ. Г. Ф. Губской, Г. С. Терешина; под ред. И. В. Тананаева. – М.: Ин. лит-ра, 1961. – 308 с.

### References

1. Mel'nikov I. O., Podobedov R. E., Kosandrovich E. G., Korshunova T. A., Soldatov V. S. Synthesis of aminocarboxylic ion exchangers based on polyacrylonitrile fiber. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*, 2015, no. 6, pp. 29–38 (in Russian).
2. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. New filtering materials for air purification in the electronic industry. *Proc. of the 5th International conference "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation" (NEET-2007)*, Zakopane, Poland, 12-15 June, 2007. Zakopane, 2007, pp. 55 (in Russian).



3. Gutman V. N., Shevchuk I. O., Rapovich S. P., Pulaeva I. V. General exchange ventilation with recirculated air purification in livestock buildings. *Mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozaistva"* [Mechanization and electrification of agriculture: Interdepartmental thematic collection], 2009, iss. 43, no. 2, pp. 80–88 (in Russian).
4. Saldadze K. M., Kopylova-Valova V. D. Complexing ion exchangers. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 335 p. (in Russian).
5. Myasoedova G. V. The use of complexing sorbents POLIORGs in inorganic analysis. *Zhurnal analiticheskoy khimii = Journal of analytical chemistry*, 1990, vol. 45, no. 10, pp. 1878–1887 (in Russian).
6. Eshkurbonov F. B., Turaev Kh. Kh., Amonova N. D., Abdurakhmonova N. Kh., Djalilov A. T. Investigation of the sorption of some metals on synthesized complexing ion exchangers. *Vysokomolekularnye soedineniya = Polymer science*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 85–89 (in Russian).
7. Chelnakova P. N., Kolodyazhnyi V. A., Volkova E. S. The estimation of the stability of ionite complexes formed in the sorption of copper cations by weakly alkaline AM-7anionite. *Russian journal of Physical Chemistry A*, 2008, vol. 82, no. 12, pp. 2122–2125. <https://doi.org/10.1134/s0036024408120261>
8. Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Sergeev G. I. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 1988, vol. 7, no. 1-2, pp. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
9. Soldatov V. S., Zelenkovskii V. M., Mosunova N. V., Sosinovich Z. I. Sorption of nickel (II) and cobalt (II) from ammonium solutions by fibrous ion exchanger with iminodiacetate groups. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2010, no. 3, pp. 64–69 (in Russian).
10. Soldatov V. S., Zelenkovskiy V. M., Sosinovich Z. I., Mosunova N. V., Sokol V. P. Selective isolation of copper and zinc from model solutions of mine waters by fibrous ion exchangers. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2011, no. 2, pp. 41–45 (in Russian).
11. Soldatov V. S., Korshunova T. A., Kosandrovich E. G., Nesteronok P. V. Titration of chelating fibrous sorbent in the presence of complex-forming divalent cations. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 263–269 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-263-269>
12. Cumbel L., Greenleaf J., Leun D., SenGupta A. Polymer supported inorganic nanoparticles: characterization and environmental applications. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 2003, vol. 54, no. 1–3, pp. 167–180. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(02\)00192-x](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(02)00192-x)
13. Vatutsina O. M., Soldatov V. S., Sokolova V. I., Johann J., Bissen M., Weissenbacher A. A new hybrid (polymer/inorganic) fibrous sorbent for arsenic removal from drinking water. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 2007, vol. 67, no. 1–3, pp. 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.10.009>
14. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Fibrous ion exchangers. Inamuddin Dr. Mohammad Luqman (eds.). *Ion exchange technology I: theory and materials*. UK: Springer, 2012, pp. 299–371. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9)
15. Soldatov V. S., Sosinovich Z. I., Mironova T. V. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 2004, vol. 58, no. 1, pp. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.004>
16. Zelenkovskiy V. M. *Computer modelling of structure of polymeric ion exchanger*. Minsk, 2012. 327 p. (in Russian).
17. Bjerrum J. *Metal ammine formation in aqueous solution: theory of the reversible step reaction*. Copenhagen, P. Haase Publ., 1957. 296 p.

### Информация об авторах

*Солдатов Владимир Сергеевич* – академик, д-р хим. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [soldatov@ifoch.bas-net.by](mailto:soldatov@ifoch.bas-net.by)

*Шаченкова Лариса Николаевна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sln13102005@mail.ru](mailto:sln13102005@mail.ru)

*Косандрович Евгений Генрихович* – д-р хим. наук, доцент, зав. лаб. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [kosandrovich@ifoch.bas-net.by](mailto:kosandrovich@ifoch.bas-net.by)

*Нестеронко Петр Виторович* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [petr.nester@gmail.com](mailto:petr.nester@gmail.com)

### Information about the authors

*Vladimir S. Soldatov* – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Chief Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus. (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [soldatov@ifoch.bas-net.by](mailto:soldatov@ifoch.bas-net.by)

*Larisa N. Shachenkova* – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [sln13102005@mail.ru](mailto:sln13102005@mail.ru)

*Evgenii G. Kasandrovich* – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [kosandrovich@ifoch.bas-net.by](mailto:kosandrovich@ifoch.bas-net.by)

*Petr V. Nesteronok* – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [petr.nester@gmail.com](mailto:petr.nester@gmail.com)