






Динамика сорбции борной кислоты борселективным анионитом типа СБ

И.Н. Липунов¹ , И.Г. Первова¹  ,
А.Ф. Никифоров² , И.А. Клепалова¹ 

 pervovaig@m.usfeu.ru

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия

²ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследования и выбор эффективного сорбента актуальны для защиты водных объектов от бора. Высокое содержание бора в природных водах оказывает токсичное действие на гидробиоту в силу своей высокой биологической активности. В работе изучена динамика сорбции борной кислоты из водных растворов поликонденсационным анионитом СБ-1, синтезированным на основе моноэтаноламина и эпихлоргидрина и содержащим в своей структуре аминоксиэтильные и спиртовые функциональные группы. **Методы.** Показано влияние рабочей формы анионита на динамические характеристики сорбции бора из модельного водного раствора борной кислоты концентрации 0,43 моль/дм³ и производственных сточных вод концентрации 0,47 моль/дм³ при прочих равных условиях (рН = 5,0; объемная скорость пропускания раствора через слой анионита = 1,5 мл/мин·см²; t = 20 °С). Структурные исследования по установлению формы бора в фазе анионита выполнены с помощью ИК-спектроскопического метода анализа. Динамические характеристики сорбции бора рассчитаны графическим методом из выходных кривых сорбции. **Результаты.** Установлено, что гидроксильная форма анионита СБ-1, в сравнении с хлор-формой, обладает сверхэквивалентной сорбцией бора как при сорбции из модельного, так и реального производственного раствора. Впервые показано, что на начальном этапе сорбция борной кислоты осуществляется по механизму хемосорбции, что приводит к образованию в фазе ионита достаточно устойчивых гидроксоборатных форм состава $[B(OH)_4]^-$. По мере насыщения анионита, когда концентрация свободных функциональных гидроксильных групп становится мала, происходит образование в фазе анионита полиядерных форм борной кислоты состава $[B_4O_5(OH)_4]^{2-}$ путем сорбции молекул борной кислоты на свободных тетрагидроксоборат анионах. Установлено, что процесс десорбции бора с анионита осуществляется 2 н. раствором NaOH со степенью регенерации 0,995.

© Липунов И.Н., Первова И.Г., Никифоров А.Ф., Клепалова И.А., 2021

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: извлечение бора, водные объекты, сточные воды, борселективный анионит, механизм сорбции, десорбция.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта «FEUG-2020-0013».

Для цитирования: Липунов И.Н., Первова И.Г., Никифоров А.Ф., Клепалова И.А. Динамика сорбции борной кислоты борселективным анионитом типа СБ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 5. С. 112–124. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-8

Дата поступления 19.04.2021.

DYNAMICS OF BORIC ACID SORPTION BY BORON-SELECTIVE SB-TYPE ANIONITE

Igor N. Lipunov¹ , Inna G. Pervova¹  ,
Alexander F. Nikiforov² , Irina A. Klepalova¹ 

 pervovaig@m.usfeu.ru

¹Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation

²B.N. Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Significance. Investigation and choice of an effective sorbent are significant for protection of water bodies against boron. The boron high concentration in natural waters produces toxic impact on aquatic biota due to its high biological activity. This paper studied the dynamics of boric acid sorption from aqueous solutions by polycondensation anionite SB-1 synthesized on the base of monoethanolamine and epichlorohydrin. The anion exchanger contained aminoxyethyl and alcohol functional groups in its structure. **Methods.** It has been established the influences of the ion form of the anionite on the dynamic characteristics of boron sorption from both a model boric acid aqueous solution (0.43 mol/dm³) and an industrial wastewater effluent after boric acid production (0.47 mol/dm³), other things being equal (pH = 5.0; the volume rate of the solution passing through the anionite layer = 1.5 ml/min·cm²; t = 20 °C). Structural studies to determine the form of boron in the anionite phase were performed using the IR spectroscopic method. Dynamic characteristics of boron sorption (the cation and overall ion-exchange capacity values, period of the protecting effect of the filter) were determined graphically from the sorption curves. **Results.** It has been found that the hydroxyl form of the anion exchanger SB-1, in comparison with the chlorine form, performs superequivalent boron sorption while boron sorption from both a model and real production solutions. For the first time we have demonstrated that at the initial stage, boric acid sorption is carried out owing to the chemisorption, resulting to the formation of stable hydroxoborate forms [B(OH)₄]⁻ in the ionite phase. As the anionite is being saturated and the concentration of free functional hydroxyl groups is decreasing, the formation of polynuclear forms of boric acid [B₄O₅(OH)₄]²⁻ occurs in the anionite phase by sorption of boric acid molecules on free tetrahydroxoborate anions and, further, the complex formation of polynuclear forms of boron by the nitrogen atom of aminoxyethyl functional groups. It

has been stated that desorption of boron from anionite is considered to be effective when carried out with a 2 n. NaOH solution with a regeneration degree of 0.995.

Keywords: extraction of boron, boron-selective anion exchanger, dynamic characteristics, sorption mechanism, desorption.

Financing: The work has been done with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of scientific project «FEUG-2020-0013».

For citation: Lipunov I.N., Pervova I.G., Nikiforov A.F., Klepalova I.A. Dynamics of boric acid sorption by boron-selective SB-type anionite. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2021. No. 5. С. 112–124. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-8.

Received April 19, 2021.

ВВЕДЕНИЕ

Рост потребности в боре и его соединениях предприятиями химической, металлургической, атомной и других отраслей промышленности стимулирует поиски эффективных способов извлечения бора как из сточных вод, так и из отработанных производственных растворов производства борной кислоты и ее солей. Известно, что для извлечения бора из водных растворов используются различные методы, основанные на процессах адсорбции, осаждения бора в виде труднорастворимых соединений, ионного обмена, обратного осмоса, электродиализа и дистилляции [1, 2]. Анализ технико-экологических проблем извлечения бора из воды, проведенный Г.А. Самбурским [3], показал, что «... эколого-экономически обоснованными методами снижения концентрации бора в воде является ионный обмен и обратный осмос, применение которого в крупных масштабах экологически оправдано».

В отечественной и зарубежной литературе достаточно полно представлены экспериментальные данные по сорбционному извлечению бора из водной среды на анионитах полимеризационного типа, например, АВ-17 [4, 5] и Amberlite IRA-743 [6, 7], синтезированных на основе стирола и дивинилбензола и содержащих в своей структуре вторичные и третичные аминогруппы. Показано, что в солевых формах, образованных более сильными кислотами, чем борная, аниониты обладают значительно меньшей обменной емкостью по бору в сравнении с гидроксильной формой.

Научная информация о сорбционном поведении бора на анионитах поликонденсационного типа весьма ограничена, несмотря на то что в конце прошлого столетия в Научно-исследовательском институте пластических масс (г. Кемерово) была создана серия борселективных поликонденсационных анионитов типа СБ, в т. ч. с аминооксиэтильными функциональными группами.

В данной работе представлены результаты динамики сорбции борной кислоты из водных растворов поликонденсационным анионитом СБ-1, синтезированным на основе моноэтаноламина и эпихлоргидрина.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предварительную подготовку анионита СБ-1, полимерная матрица которого содержит аминооксиэтильные и спиртовые функциональные группы, проводили по общепринятым методикам (ГОСТ 10896-72). В Cl⁻ и OH⁻ формы анионит переводили обработкой 1 н. растворами соляной кислоты и гидроксида натрия. Изучение сорбционных свойств анионита по отношению к ионам бора из модельных растворов борной кислоты осуществляли в динамических условиях при разной скорости пропускания раствора сорбата через слой анионита.

Для определения динамических характеристик сорбции бора 3 г предварительно подготовленного и набухшего анионита загружали в стеклянные хроматографические колонки диаметром 12 мм и высотой 500 мм, через которые сверху вниз пропускали раствор сорбата со скоростью 1,2; 1,5 и 3,0 мл/мин·см². Для построения выходных кривых сорбции отбирали пробы фильтрата в объеме 25 мл. Десорбцию бора с анионитов осуществляли 2 н растворами NaOH и HCl со скоростью пропускания растворов 1,2 мл/мин·см². Элюат отбирали порциями по 10 мл для построения выходных кривых процесса десорбции.

Количество извлекаемого сорбентами из растворов бора рассчитывали по разности его концентраций в исходном растворе и фильтрате, определяемых титрованием пробы 0,1 н. раствором NaOH с фенолфталеином в присутствии маннита (ГОСТ 18704-78). Полную динамическую обменную емкость анионита по бору рассчитывали из динамических выходных кривых сорбции бора по формуле [8]:

$$\text{ПДОЕ} = \frac{C \times V_{\text{YA}}}{m}, \text{ ммоль/г}, \quad (1)$$

где C – концентрация борной кислоты в растворе, ммоль/дм³; V_{YA} – удерживающий объем, см³; m – масса анионита, г.

Время защитного действия слоя анионита рассчитывали графическим методом по уравнению Н.А. Шилова [9]:

$$\tau_{\text{пр}} = KH - \tau_0, \quad (2)$$

где K – коэффициент защитного действия фильтрующего слоя, с/м ($K=1/U$), где U – движение сорбционного фронта, м/с); τ_0 – потеря времени защитного действия, с; H – высота слоя сорбента, мм.

Для установления механизма сорбции бора ионитами использовали метод инфракрасной спектроскопии. Инфракрасные спектры исследуемых образцов записывали на ИК-Фурье-спектрометре IRAffinity Shimadzu в диапазоне длин волн 700–4000 см⁻¹. Образцы готовили в виде таблеток с KBr.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамические характеристики сорбции бора на анионите СБ-1 в гидроксильной форме из модельного водного раствора борной кислоты концентрации 0,43 моль/дм³ и рН 4,8–5,0, рассчитанные из выходных кривых сорбции бора и полученные при различных объемных скоростях пропускания раствора сорбата через слой сорбента, представлены в таблице.

Таблица 1. Динамические характеристики сорбционного извлечения бора анионитом при разных объемных скоростях пропускания раствора сорбата

Table 1. Dynamic characteristics of the boron sorption extraction with anionite at various volume velocities of the sorbate solution passing-through

Скорость пропускания раствора, мл/мин·см ²	ДОЕ, ммоль/г	ПДОЕ, ммоль/г	Время защитного действия слоя, мин
1,2	0,39	32,3	57
1,5	0,35	32,2	54
3,0	0,17	31,9	18

Анализ динамических характеристик сорбции борной кислоты показывает, что значение полной динамической обменной емкости анионита не зависит от скорости фильтрации раствора сорбата через слой сорбента, поскольку величина удерживающего объема имеет практически одинаковое значение (≈ 250 мл) для всех выходных кривых сорбции. Скорость движения фронта сорбции оказывает существенное влияние на величину динамической обменной емкости до проскока. Так, при объемной скорости 3,0 мл/мин·см² значение ДОЕ в два раза меньше, чем при меньших скоростях. О более эффективной динамике сорбции при скоростях фильтрации 1,2 и 1,5 мл/мин·см² свидетельствует и время защитного действия слоя сорбента высотой 250 мм. Для данных скоростей фильтрации раствора сорбата время защитного действия фильтра в три раза больше, чем при скорости 3,0 мл/мин·см².

При оптимальной скорости пропускания раствора сорбата через заполненную сорбентом колонку (1,5 мл/мин·см²) исследовано влияние рабочей

формы анионита на сорбцию бора. Экспериментальные результаты представлены в виде выходных кривых сорбции борной кислоты из модельного раствора и сточных вод производства борной кислоты (рис. 1).

Из модельного раствора достаточно эффективно наблюдается сорбция бора как на Cl-, так и OH-формам анионита, с той лишь разницей, что количество сорбированного бора OH-формой (рис. 1, крив. 1) более чем в два раза выше по сравнению с Cl-формой анионита (рис. 1, крив. 3). Значение полной динамической обменной емкости, рассчитанное по формуле (1), для OH-формы анионита составляет 32,25 ммоль/г (1999,5 мг/г), в то время как для Cl-формы эта характеристика не превышает величины 14 ммоль/г (888 мг/г).

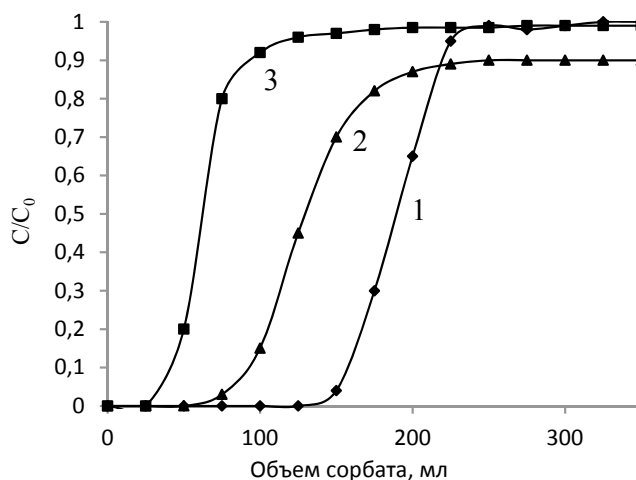
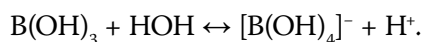


Рис. 1. Выходные кривые сорбции H_3BO_3 модельных растворов (1 и 3) и производственного стока (2) анионитом СБ-1 в OH- (1 и 2) и Cl- (3) формах (скорость – 1,5 мл/мин·см²; концентрация H_3BO_3 – 0,43 моль/дм³; pH – 5,0; t – 20 °C).

Fig. 1. Output curves of H_3BO_3 model solutions (1 and 3) and production waste water (2) sorption with anionite SB-1 in OH- (1 and 2) and Cl- (3) forms (velocity: 1.5 ml/min·cm²; H_3BO_3 concentration: 0.43 mol/dm³; pH: 5.0; t=20 °C).

Данный экспериментальный факт согласуется с высокой сорбционной способностью и анионитов полимеризационного типа АВ-17×8 и Amberlite IRA-743, величина сорбции борной кислоты на OH-форме которых значительно выше, чем на солевых формах, образованных более сильными кислотами по сравнению с борной [4, 6].

Однако такое высокое, сверхэквивалентное, поглощение борной кислоты ОН–формой анионитов, исходя из общепринятых представлений о поведении борной кислоты в слабокислых водных растворах, трудно объяснить. В водных растворах молекула борной кислоты ведет себя как кислота Льюиса [10]. Присоединяя ион гидроксила воды, она образует тетрагидроксобо-рат-анион состава $[B(OH)_4]^-$:



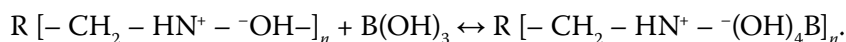
Константа равновесия такого процесса запишется в виде:

$$K_p = \frac{[B(OH)_4]^- \cdot [H^+]}{[B(OH)_3]}$$

В отсутствии сильных кислот в водном растворе равновесные концентрации гидроксобо-рат-анионов и протонов будут равные, тогда равновесная концентрация гидроксобо-рат-анионов может быть рассчитана по уравнению:

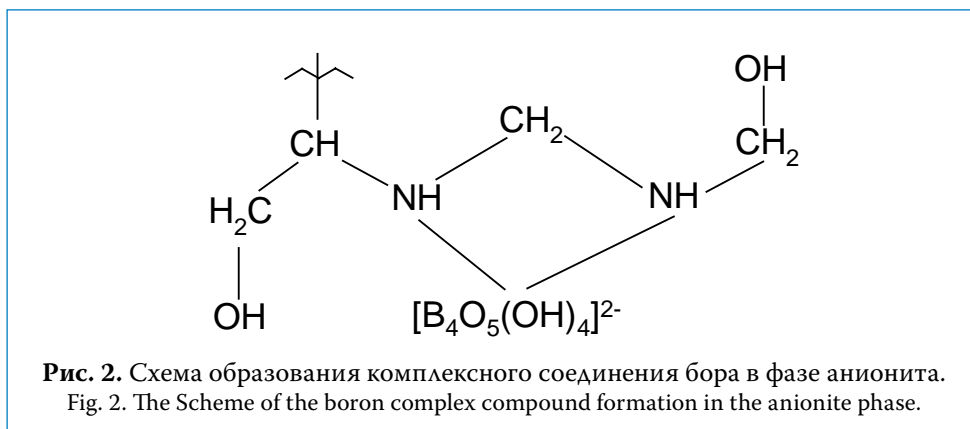
$$[B(OH)_4]^- = \sqrt[2]{K_p \cdot [B(OH)_3]}$$

Рассчитанная концентрация тетраборат анионов в 0,43 М растворе борной кислоты, с учетом величины концентрационной константы диссоциации H_3BO_3 равной $5,8 \cdot 10^{-10}$ [11], имеет ничтожно малую величину – $14,5 \cdot 10^{-6}$ М. Поскольку тетраборат анионы, содержащиеся в водном растворе борной кислоты способны к обмену с гидроксильными группами анионита, то и сорбционная способность анионита в ОН-форме по бору должна быть также незначительной. Однако это противоречит экспериментальным результатам. Данное противоречие можно объяснить тем, что поглощение борной кислоты из раствора борной кислоты на начальном этапе происходит не за счет ионного обмена, а осуществляется по механизму хемосорбции, приводящему к образованию в фазе анионита устойчивых тетра гидроксобо-ратных форм по схеме:



Образование в водных растворах различных гидроксобо-ратных форм в зависимости от концентрации бора и величины рН раствора отмечено в работах [12, 13], а сорбция соответствующих форм бора различными анионитами из водных растворов подтверждена данными ИК-спектроскопических исследований [14, 15].

В нашем случае в инфракрасных спектрах образцов анионита, степень насыщения которых бором не превышает 55 % от величины их ПДОЕ, зафиксировано сильное поглощение в области 920 см^{-1} , характерное для моноядерного гидроксоборат аниона [14]. По мере насыщения анионита гидроксоборат-анионами (когда концентрация свободных функциональных групп уменьшается, а концентрация $[\text{B}(\text{OH})_4]^-$ ионов становится соизмерима с величиной полной статической обменной емкости (ПСОЕ), определяемой количеством введенных при синтезе функциональных групп), в фазе анионита происходит образование полиядерных форм бора состава $[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]^{2-}$, наличие которых подтверждается регистрацией в ИК-спектрах насыщенных образцов анионита характерных полос поглощения в области $1350\text{--}1420 \text{ см}^{-1}$ [15]. По мере увеличения в фазе смолы полиядерных тетраборат-анионов вероятно их участие в процессе комплексообразования с атомами азота аминоксиэтильных функциональных групп. В этом случае на каждый эквивалент аминоксиэтильных групп приходится по 2 моля бора, что, в конечном итоге, и определяет сверхэквивалентное содержание бора в анионите (рис. 2).

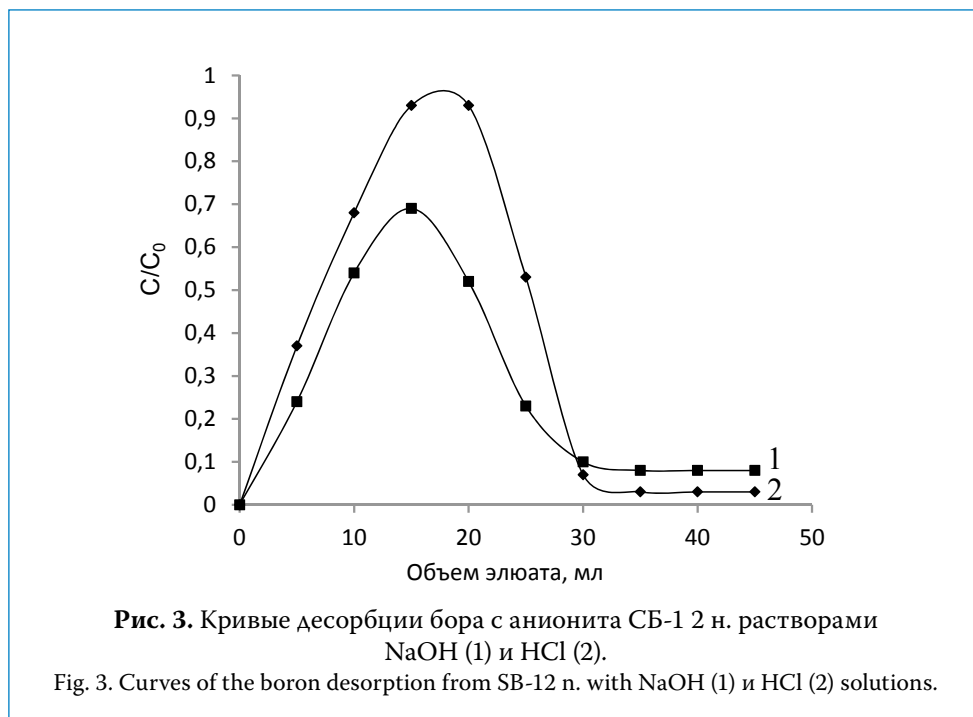


Полная динамическая обменная емкость анионита в OH-форме при сорбции бора из производственных сточных вод, концентрация борной кислоты в которых составляла $0,47 \text{ моль/дм}^3$, при прочих равных условиях также имеет большую величину – $28,66 \text{ ммоль/г}$ ($1777,3 \text{ мг/г}$) (рис. 1, крив. 2). Незначительное ее снижение по сравнению с сорбцией из модельного раствора (рис. 1, крив. 1) связано, по-видимому, с конкурирующим влиянием анионов SO_4^{2-} , являющихся одним из компонентов сточных вод. Данные экспериментальные результаты являются подтверждением смешанного механизма сорбции борной кислоты, а именно хемосорбции бора, сопря-

женной с процессом комплексообразования полиядерных анионов бора в фазе ионита с азотом аминоксиэтильных функциональных групп, что и является основной причиной наличия сверхэквивалентной сорбции бора гидроксильной формой анионита СБ-1.

Экспериментальные результаты десорбции бора с анионита 2 н. растворами гидроксида натрия и соляной кислоты представлены на рис. 3. Наиболее эффективно процесс десорбции бора осуществляется 2 н. раствором гидроксида натрия в виде натровой соли состава $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]$. При этом степень десорбции бора раствором гидроксида натрия составляет 0,995 и, одновременно, анионит переводится вновь в рабочую гидроксильную форму.

Важнейшим эколого-экономическим фактором применения сорбента на практике является его повторное использование в процессах извлечения компонентов из водных растворов. В случае извлечения бора из анионита СБ-1 гидроксидом натрия получен максимальный эффект десорбции. Полученный концентрированный раствор бора целесообразно использовать в атомной энергетике, современной медицине и синтетической химии.



ВЫВОДЫ

Поступление бора в поверхностные и подземные воды связано, в основном, с антропогенными источниками: сточные воды предприятий керамической, текстильной, стекольной, химической и металлургической промышленности. Установлено, что борселективный анионит СБ-1 в гидроксильной форме, по сравнению с хлор-формой, обладает сверхэквивалентной сорбцией бора как из модельных растворов, так и из производственных сточных вод при оптимальных параметрах ведения сорбционного процесса. Предложен и научно обоснован смешанный механизм извлечения бора гидроксильной формой анионита. Наличие в фазе сорбента моно- и полиядерных анионов бора, а также донорно-акцепторных связей между атомами азота и бора подтверждается данными ИК-спектроскопии. Определена полная динамическая обменная емкость анионита (26,8 ммоль/г) при сорбции бора из сточных вод с высоким содержанием борной кислоты (0,47 моль/дм³). Наличие «сверхэквивалентной» сорбции бора у данного анионита, а также высокая степень его регенерации 2 н. раствором NaOH (0,995) обуславливают перспективность его использования в технологических процессах извлечения борной кислоты и ее соединений из производственных сточных вод и отработанных технологических растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова М.М., Томчук Т.К., Черанева А.Г., Нагорный О.В. Извлечение ионов бора из растворов с помощью сорбентов на основе двойных гидроксидов металлов // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Химическая технология. 2013. № 1(15). С. 144–154.
2. Технический справочник по обработке воды. Изд. 2-е. В 2 т.: пер. с франц. СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.
3. Самбурский Г.А. Анализ технико-экологических проблем удаления бора из природной воды // Вестник МИТХТ «Эколого-экономические проблемы химических технологий». 2011. Т. 6. № 4. С. 118–125.
4. Винницкий В.А., Нечаев А.Ф., Чугунов А.С. Динамика сорбции борной кислоты различными формами высокоосновного анионита АВ-17 и минимизация ее потерь в технологическом цикле АЭС // Экология и системы жизнеобеспечения. 2013. № 20(46). С. 81–84.
5. Винницкий В.А., Чугунов А.С., Нечаев А.Ф. Сорбция борной кислоты гидроксильной формой высокоосновного анионита АВ-17-8 и направление модернизации систем спецводоочистки АЭС // Успехи химии и химической технологии. 2013. Т. XXVII. № 6. С. 84–87.
6. Boncukcuoglu R., Erdem Yilmaz A., Muhtar Kocakerim M., Copur M. An empirical model for kinetics of boron removal from boron-containing wastewaters by ion exchange in a batch reactor // *Desalination*. 2004. No. 160(2). P. 159–166.

7. Parsaei M., Goodarzi M.S., Nasef M.M. Adsorption Study Removal of Boron Using Ion exchange Resin in Batch System // *International conference on Environmental Science and Technology*. IPCBEE, Singapore, 2011. No 6. P. 398–402.
8. Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф. Модифицированные сорбенты на основе гранулированного глаунита для очистки природных вод от радионуклидов // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии и управление*. 2016. № 1. С. 99–109. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-1-8.
9. Шурба Н.Г. Водоснабжение. Т. 2. Улучшение качества воды. М.: АСВ, 2008. 544 с.
10. Немодрук А.А., Каралова З.К. Аналитическая химия бора. М.: Наука, 1964. 286 с.
11. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1967. 390 с.
12. Валяшко М.Г., Власова Е.В. К вопросу о состоянии бора в водных растворах // *Геохимия*. 1966. № 7. С. 818–831.
13. Валяшко М.Г., Годе Г.К. О связи форм выделения боратов из растворов с величиной их рН // *Журнал неорганической химии*. 1960. № 6. С. 1316–1328.
14. Запевалов М.А., Тулупов П.Е., Костин В.И., Сергиенко В.И. Взаимодействие борной кислоты с аминогруппами анионитов // *Журнал прикладной химии*. 1982. Т. 55. № 1. С. 148–152.
15. Тулупов П.Е., Шевелева И.В., Запевалов М.А., Ковековдова Л.Т., Куриленко Л.Н. Сорбция борной кислоты из водных растворов // *Журнал прикладной химии*. 1982. Т. 55. № 3. С. 535–540.

REFERENCES

1. Sokolova M.M., Tomchuk T.K., Cheraneva L.G., Nagornyy O.V. Extraction of boron ions from solutions using sorbents based on double metal hydroxides. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya*, [Reporter of Perm National Research University. Chemical technique], 2013, no. 1(15), pp. 144–154 (in Russ.).
2. [Technical reference-book on water treatment]. Saint-Petersburg: New journal, 2007, 1696 p. (in Russ.).
3. Samburskiy G.A. Analysis of technical and environmental problems of boron removal from natural water. *Vestnik MITHT «Ekologo-ekonomicheskie problemy khimicheskikh tehnology»* [Reporter of MITHT 'Ecological/economical problems of chemical techniques], 2011, vol. 6, no 4, pp. 118–125 (in Russ.).
4. Vinnickij V.A., Nechaev A.F., Chugunov A.S. Sorption dynamics of boric acid by various forms of high-base anionite AB-17 and minimization of its losses in the NPP process cycle. *Ekologiya i sistemy zhizneobespecheniya*. [Ecology and life-maintenance systems], 2013, no 20 (46), pp. 81–84 (in Russ.).
5. Vinnickij V.A., Chugunov A.S., Nechaev A.F. Boric acid sorption by the hydroxyl form of high-base anionite AB-17-8 and the modernization way of NPP special water treatment systems. *Uspekhi khimii i khimicheskoy tehnologii*. [Achievement of chemistry and chemical technique], 2013, vol. XXVII, no 6, pp. 84–87 (in Russ.).

6. Boncukcuoglu R., Erdem Yilmaz A., Muhtar Kocakerim M., Copur M. An empirical model for kinetics of boron removal from boron-containing wastewaters by ion exchange in a batch reactor. *Desalination*, 2004, no 160 (2), pp. 159–166.
7. Parsaei M., Goodarzi M.S., Nasef M.M. Adsorption Study Removal of Boron Using Ion exchange Resin in Batch System // *2nd International conference on Environmental Science and Technology*. IPCBEE. Singapore, 2011, no. 6, pp. 398-402.
8. Kutergin A.S., Nedobuh T.A., Nikiforov A.F. Modified sorbents based on granulated glauconite for natural water purification from radionuclides. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2016, no 1, pp. 99–109 (in Russ.).
9. Shurba N.G. Water supply. Vol. 2. Improvement of water quality. Moscow: ASV, 2008. 544 p. (in Russ.).
10. Nemodruk A.A., Karalova Z.K. Analytical chemistry of boron. Moscow: Nauka, 1964, 282 p. (in Russ.).
11. Lur'e Ju.Ju. Reference book on analytical chemistry. Moscow: Khimiya, 1967. 390 p. (in Russ.).
12. Valjashko M.G., Vlasova E.V. On the state of boron in aqueous solutions. *Geohimija*, 1966, no 7, pp. 818–831 (in Russ.).
13. Valjashko M.G., Gode G.K. On the relationship between the forms of borate separation from solutions and their pH value. *Zhurnal neorganicheskoy khimiyi* [Journal of Non-organic Chemistry], 1960, no 6, pp. 1316–1328 (in Russ.).
14. Zapevalov M.A., Tulupov P.E., Kostin V.I., Sergienko V.I. The interaction of boric acid with the amino groups of the anion exchange resin. *Zhurnal prikladnoy khimiyi* [Journal of Applied Chemistry], 1982, vol. 55, no 1, pp. 148–152 (in Russ.).
15. Tulupov P.E., Sheveleva I.V., Zapevalov M.A., Kovekovdova L.T., Kurilenko L.N. Boric acid sorption from aqueous solutions. *Zhurnal prikladnoy khimiyi* [Journal of Applied Chemistry], 1982, vol. 55, no 3, pp. 535–540 (in Russ.).

Сведения об авторах:

Липунов Игорь Николаевич, канд. хим. наук, профессор, профессор, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0001-5865-2958; e-mail: lipunovin@m.usfeu.ru

Первова Инна Геннадьевна, д-р хим. наук, доцент, директор химико-технологического института, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0002-1653-8643; e-mail: pervovaig@m.usfeu.ru

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. наук, профессор, кафедра водно-хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Клепалова Ирина Андреевна, ассистент, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; e-mail: klepalovaia@m.usfeu.ru

About the authors:

Igor N. Lipunov, Candidate of Chemical Sciences, Professor, Department of Physical and Chemical Technologies in Environmental Engineering, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Ekaterinburg, 620100, Russia; ORCID: 0000-0001-5865-2958; e-mail: lipunovin@m.usfeu.ru

Inna G. Pervova, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Physical and Chemical Technologies in Environmental Engineering, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Ekaterinburg, 620100, Russia; ORCID: 0000-0002-1653-8643; e-mail: pervovaig@m.usfeu.ru

Alexandor F. Nikiforov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Water Technology, B.N.Yeltsin Ural Federal University, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620049, Russia; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: alex.f.nikiforov@mail.ru

Irina A. Klepalova, Assistant, Department of Physical and Chemical Technologies in Environmental Engineering, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Ekaterinburg, 620100, Russia; e-mail: klepalovaia@m.usfeu.ru