



Очистка природных вод от борат-ионов с применением ионного обмена

А.В. Бусарев¹, И.Г. Шешегова¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань,
Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Очистка природных вод от соединений бора имеет научную актуальность, поскольку позволяет решать проблему обеспечения населения качественной питьевой водой. Одним из способов очистки природных вод от бора является метод ионного обмена.

Целью работы является проведение исследований по удалению бора из воды с использованием напорных ионообменных фильтров.

Задачи работы: изучить процессы очистки борсодержащих вод в напорных ионообменных фильтрах с различными ионитовыми смолами; определить влияние скорости фильтрования на эффективность очистки; определить влияние давления в напорных фильтрах на эффективность очистки.

Результаты. Основные результаты исследований состоят в том, что определена эффективность очистки воды от борат-ионов на различных ионитах, определено влияние скорости фильтрования и давления в напорных фильтрах для очистки борсодержащих вод. С учетом результатов исследований разработана установка для подготовки воды содержащей повышенные концентрации бора для хозяйственно-питьевых нужд.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в улучшении качества подготовки борсодержащих подземных вод. Определены наиболее эффективная ионитовая загрузка и технологические параметры очистки борсодержащих вод в напорных ионообменных фильтрах. Лучший результат (эффект очистки 71-87%) показал ионит марки Гранион Д403. Исследования показали, что рост скорости фильтрования в ионообменных фильтрах уменьшает эффективность их работы, а увеличение давления на входе в ионообменный фильтр на эту величину влияния не оказывает. Разработана установка для подготовки подземных вод с содержанием бора до 2,3 мг/л производительностью 200 м³/сут.

Ключевые слова: борсодержащие воды, борат-ионы, удаление бора из подземных вод, методы удаление бора из подземных вод, ионный обмен, ионообменный фильтр, ионообменная смола.

Для цитирования: Бусарев А.В., Шешегова И.Г. Очистка природных вод от борат-ионов с применением ионного обмена //Известия КГАСУ. 2023 . №1(63), с. 52-60,
DOI: 10.52409/20731523_2023_1_52, EDN: IKRONF

Purification of natural waters from borate ions using ion exchange

A.V.Busarev¹, I.G.Sheshegova¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Purification of natural waters from boron compounds is of scientific relevance, since it allows solving the problem of providing the population with high-quality drinking water. One of the ways to purify natural waters from boron is the ion exchange method.

The aim of the work is to conduct research on the removal of boron from water using pressure ion-exchange filters.

The objectives of the work are: to study the processes of purification of boron-containing waters in pressure ion-exchange filters with various ion-exchange resins; to determine the effect of filtration rate on the cleaning efficiency; to determine the effect of pressure in pressure filters on the cleaning efficiency.

Results. The main results of the research are that the efficiency of water purification from borate ions on various ion exchangers is determined, the influence of filtration rate and pressure in pressure filters for the purification of boron-containing waters is determined. Taking into account the results of the research, a plant for the preparation of water containing high concentrations of boron for household and drinking needs has been developed.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry consists in improving the quality of the preparation of boron-containing groundwater. The most effective ion-exchange loading and technological parameters of purification of boron-containing waters in pressure ion-exchange filters have been determined. The best result (cleaning effect 71-87%) was shown by Granion D403 brand ion exchanger. Studies have shown that an increase in the filtration rate in ion-exchange filters reduces the efficiency of their work, and an increase in pressure at the inlet to the ion-exchange filter does not affect this value. An installation for the preparation of groundwater with a boron content of up to 2.3 mg/l with a capacity of 200 m³/day has been developed.

Keywords: boron-containing waters, borate ions, removal of boron from groundwater, methods for removing boron from groundwater, ion exchange, ion exchange filter, ion exchange resin.

For citation: Busarev A.V., Sheshegova I.G. Purification of natural waters from borate ions using ion exchange // News KSUAE. 2023. № 1 (63), p. 52-60, DOI:10.52409/20731523_2023_1_52, EDN: IKRONF

1. Введение.

Обеспечение населения доброкачественной питьевой водой остается весьма актуальной задачей [1]. Особое внимание последнее время стало уделяться вопросам обработки природных вод с целью извлечения соединений бора, которые на традиционных очистных сооружениях удалить невозможно. Под бором понимается совокупность борсодержащих форм борной кислоты и боратных анионов, суммарное содержание которых пересчитывается на бор.

Бор, в соответствии с нормативной классификацией СанПиН 1.2.3685-21 по санитарно-токсикологическому признаку относится ко второму классу опасности и к классу условно-эссенциальных, иммунотоксичных микроэлементов [2]. Многочисленные исследования подтверждают неблагоприятное воздействие избыточного содержания борат-ионов на здоровье человека. Увеличение содержания бора в воде хозяйственно-питьевого назначения негативно влияет на пищеварительную и иммунную систему, компоненты крови и роста [3], сосуды головного мозга, вызывает нарушение солевого обмена веществ [4]. Увеличение концентрации бора в питьевой воде приводит к ухудшению состояния пищеварительного тракта, негативно влияет на процессы пищеварения, ухудшает работу печени и почек, центральной нервной системы. Увеличение концентрации бора в крови вызывает интоксикацию, поражение кожного покрова, облысение [5].

Бор поступает в подземные воды из осадочных пород насыщенных бором, таких как амарит, бура, борацит и калибарит. Бор присутствует в нефтепромысловых водах, морской воде, водах соленых и термальных источников. Бор поступает в воду при добыче полезных ископаемых, при сжигании угля, биомассы и отходов [4], со сточными водами различных промышленных предприятий [5], со стоками, содержащими СПАВ, с поверхностными стоками сельхозугодий применяющих борные удобрения [3, 5, 6]. Повышенную концентрацию бора может содержать вода опресненная методом обратного осмоса [7].

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 содержание бора в питьевой воде не может быть выше 0,5 мг/л. Такие же требования к содержанию бора в питьевой воде предъявляет и Всемирная Организация Здравоохранения. В ЕС эта величина не может превышать 1,0 мг/л. Разные страны и регионы сформулировали свои стандарты на основе рекомендаций ВОЗ в соответствии со своими условиями.

Содержание бора в природных источниках в РФ обычно составляет 0,01-7,0 мг/л [5]. В ряде подземных источников Центрального района, Южного Урала, Западной Сибири концентрация бора может превышать нормативные показатели в 6-10 раз [4]. Такая вода при использовании ее для питьевого водоснабжения несет потенциальную угрозу для здоровья населения.

Бор в природной воде присутствует в виде анионов борных кислот. При активной реакции pH до 6 он находится в воде в виде H_2BO_3 , в нейтральной среде – в виде полиборных кислот, при pH более 12 – в состоянии HBO_2 [2, 8].

Трудность удаления бора в процессе водоподготовки связаны с высокой растворимостью борной кислоты и ее плохой окисляемостью [3].

Для извлечения из воды бора используются [3-6, 8]:

- методы осаждение и коагуляция (электрокоагуляция);
- метод сорбции;
- мембранное разделение;
- метод ионного обмена.

Эффективность методов обезборивания возрастает с увеличением активной реакции обрабатываемой воды [4-6].

Метод осаждения основан на переводе бора в нерастворимые соединения под действием реагентов с последующим их осаждением. Данный метод применяется для обработки воды с высоким содержанием бора (более 1 г/л) [4] и для очистки воды с большим количеством сопутствующих примесей. В качестве реагентов применяются коагулянты (соли алюминия $Al_2(SO_4)_3$ или железа $FeCl_3$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$), неорганические (оксид кальция, соединения циркония, соли металлов) и органические осадители бора (поливиниловый спирт, гидроксикарбоновую кислоту, полиэтиленгликоль и др.) [6]. Продолжается поиск новых эффективных реагентов. Так в работе [9] изучался процесс удаления бора из воды с использованием недорогого кальциевого (Ca) осадителя, полученного из использованных отходов раковин устриц. Рекомендуемая при этом pH воды должна быть выше 12 [9]. Исследования по применению электрокоагуляции показали перспективность ее использования для удаления бора [10].

Мембранные технологии позволяют в процессе обессоливания задержать и бор. Но несмотря на высокую эффективность обессоливания обратным осмосом (до 99%), эффективность удаления бора составляет всего 40-60% [3, 6]. Борселективность мембран зависит от pH и температуры. Эффективность удаления бора в процессе электродиализации в основном зависит от типа мембраны, напряжения, значение pH, солесодержания и скорость потока и не зависят от времени [3, 11]. Так при оптимальных условиях с помощью AFN-мембраны может быть удалено 88,8% бора [3]. Результаты применения борселективной электродеионизации свидетельствуют о возможном снижении концентрации бора на 94-100% [3, 11]. Недостатком мембранных технологий является достаточно большой расход электроэнергии

В качестве сорбентов для извлечения борат-ионов из воды используются диоксиды циркония и кремния, оксид алюминия [6, 12]. Этот метод применяется при концентрации ионов бора до 10 мг/л [4]. Наиболее эффективно данный процесс протекает при pH = 7-10. Этот метод позволяет удалить не более 60% борат-ионов [12]. Продолжается исследования по поиску новых сорбентов. Так был получен сорбент GO/ZIF-67 адсорбционная емкость которого по бору при 25°C составляет до 66,65 мг/г [13]. Результаты исследований наночастиц оксида меди (CuO) в качестве адсорбента показали, его перспективность в удалении бора [14].

Наиболее перспективным способом извлечения из воды борат-ионов является ионный обмен на борселективных ионитах [15]. Данные иониты отличаются механической прочностью, высокой химической стойкостью, обладают высокой

эффективностью регенерации. Преимуществом метода ионного обмена является то, что он практически не влияет на химический состав воды. Недостаток метода – необходимость восстановления ионнообменной способности ионитовых смол. Для этой цели периодически проводится регенерация смолы.

Продолжаются исследования по использованию известных загрузок для удаления бора, а также по получению новых эффективных материалов. Так применение борселективной смолы (BSR) показало, что удаление бора составляет 89,6% [16]. Лучшие результаты удаления бора получены при pH=11. Авторами статьи [17] предлагается для извлечения из воды борной кислоты применять последовательную двухступенчатую очистку. На первой ступени очистки происходит удаление основной части катионов с использованием катионита КУ-2-8, на второй ступени - восстановление борной кислоты слабоосновным анионитом АН-31. Сорбционная емкость исследованных ионитов возрастает в следующей последовательности АВ-17-8 < ЭДЭ-10П < АН-31 [17]. Исследованы способности к боратному обмену ионнообменные смолы Purolite NRW600 [18], Purolite S108 [7, 19-21], Purolite A200 [20], Dowex 1x8 [20], LSC-800 [22], Amberlite IRA743 [7, 21], Diaion CBR05 [7, 21]. Сегодня в РФ создаются новые иониты с высокой селективностью и эффектом отделения борат-ионов от воды [4].

Проводятся изыскания направленные на совместное удаление бора и других веществ. Исследование по кондиционированию подземных вод, содержащих бор, железо и бром отражено в работе [23]. Успешным оказалось совместное удаление бора и мышьяка электрокоагуляцией и ионным обменом [24]. Для совместного удаления бора и кремния был получен новый адсорбент диольного типа (Г-смола), который показал хорошие адсорбционные свойства и для бора и для кремния в широком диапазоне pH (pH=2-10). Максимальные адсорбционные емкости по бору и кремнию составили 21,25 мг/г и 8,36 мг/г соответственно [25]. Полученные на основе ионита марки Amberlite XAD-4 новые хелатирующие смолы 1PTN и 2PTN показывают высокую эффективность при совместном удалении бора и мышьяка. Смола 1PTN показала максимальное удаление бора на 64% , мышьяка на 18%, смола 2PTN - бора более 96%, мышьяка на 97% [26].

Проводились опыты по возможному извлечению борат-ионов из воды методом экстракции [6].

Содержание бора при подготовки питьевой воды может быть снижено новым экологически безопасным методом, основанный на фиторемедиационной способности комбинации хитозана и ряски (*Lemna gibba* L.) [27].

Ввиду ограничений применения каждого метода обезборивания перспективным направлением исследований является сочетание нескольких технологий [6].

Извлечение бора из воды является важной технической проблемой, для решения которой необходимы дополнительные исследования.

Целью работы является очистка природных вод от бора с использованием напорных ионообменных фильтров.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- изучить процессы очистки борсодержащих вод в напорных ионообменных фильтрах с различными ионитовыми смолами;
- определить влияние скорости фильтрования на эффективность очистки;
- определить влияние давления в напорных фильтрах на эффективность очистки.

2. Материалы и методы

Исследования процессов очистки воды по удалению бора с помощью ионообменных напорных фильтров проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

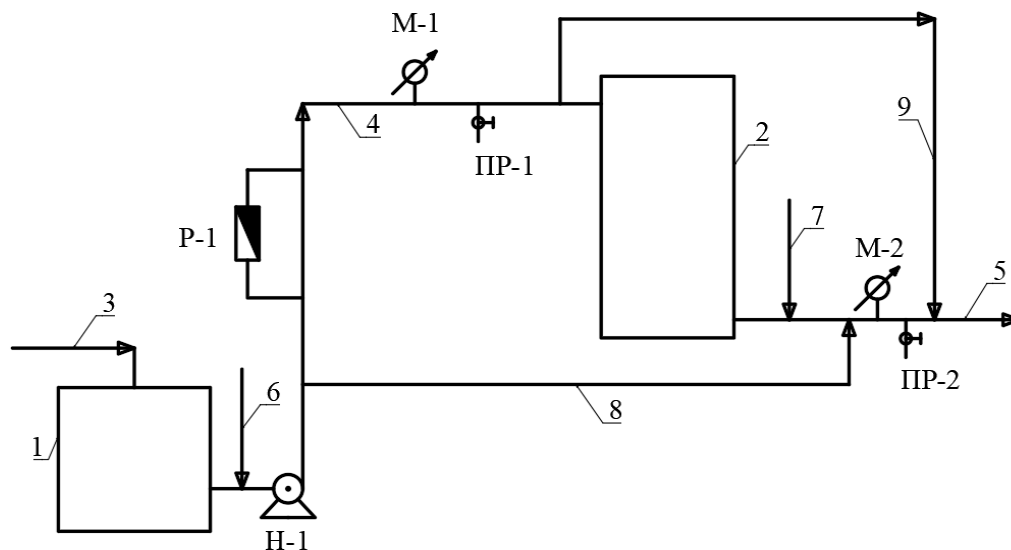


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Scheme of the experimental setup (illustration by the authors)

Данная установка состоит из резервуара исходной воды 1, напорного ионообменного фильтра 2, насоса Н-1, соединительных трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры и контрольно-измерительных приборов.

Водопроводная вода по трубопроводу 3 поступает в емкость исходной воды, откуда по трубопроводу 4 насосом Н-1 подается в ионообменный фильтр 2. Расходомер Р-1, установленный на трубопроводе 4, контролирует расход воды поступающей на ионообменный фильтр 2. Раствор с борат-ионами подается во всасывающую линию насоса Н-1 по трубопроводу 6. Очищенная в ионообменном фильтре вода по трубопроводу 5 сбрасывается в канализацию. На входе в фильтр и на выходе из него предусмотрены манометры М-1 и М-2. Для контроля за качеством воды на ионообменном фильтре предусмотрены пробоотборники ПР-1 и ПР-2. Пробы исходной воды отбирались из пробоотборника ПР-1, а очищенной воды из ПР-2.

Регенерация ионитовой загрузки предусмотрена раствором серной кислоты. Регенерационный раствор подается по трубопроводу 7 насосом-дозатором. Взрыхление и отмывка ионитовой загрузки предусмотрены водопроводной водой, которая подается из емкости 1 по трубопроводу 8 насосом Н-1. По трубопроводу 9 отработанные сточные воды после регенерации направляются в трубопровод 5, по которому отводятся в канализацию.

Высота загрузки ионита в напорном ионообменном фильтре составляла 1 м.

Температура воды определялась с помощью спиртового термометра с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$, активная реакция среды – с помощью рН-метра типа рН-340 с точностью до 0,1, концентрация бора в воде – с помощью флуориметра по ГОСТ 31949-2019, а содержание взвешенных веществ определялось весовым методом [28].

Эффективность очистки водопроводной воды от борат-ионов Э, %, определялась по формуле [29]:

$$\text{Э} = \frac{C_6^{\text{исх}} - C_6^{\text{оч}}}{C_6^{\text{исх}}} 100\% \quad (1)$$

где $C_6^{\text{исх}}$ – концентрация бора в исходной воде, мг/л;

$C_6^{\text{оч}}$ – концентрация бора в очищенной воде, мг/л.

Исследования проводились:

- для ионитов Purolite S-108 (США), Amberlite IRA-743 фирмы Rohm and Haag (США) и Гранион Д403 фирмы SUQINQ (Китай);
- скорость фильтрования от 8 до 20 м/ч;
- давление на входе в напорные ионообменные фильтры от 2 до 6 кгс/см²;

- температура исходной воды от +19,7 до +20,2°С;
- активная реакция воды от 6,9 до 7,3 рН;
- концентрация взвешенных веществ от 1,35 до 1,6 мг/л;
- концентрация бора в исходной воде от 1,1 до 5,55 мг/л.

3. Результаты

Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	Наименование ионита	Т, °С	рН	V _ф , м/ч	C _{в.в.} , мг/л	Давление, кгс/см ²		C _{исх.} _Б , мг/л	C _{оч.} _Б , мг/л	Э _Б , %
						на входе в фильтр	на выходе из фильтра			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Purolite S-108	19,8	7,2	8	1,45	2	1,7	1,22	0,25	80
								1,15	0,22	81
		19,9	7,3	8	1,4	2	1,7	1,30	0,27	79
								1,16	0,23	80
2	Amberlite IRA-743	20,0	7,2	8	1,35	2	1,7	1,18	0,22	81
								1,24	0,23	81
		19,7	7,1	8	1,5	2,1	1,8	1,35	0,3	78
								1,36	0,24	82
3	Гранион Д403	20,1	7,3	8	1,42	2	1,7	1,42	0,22	85
								1,1	0,14	87
		20,0	7,2	8	1,38	2	1,8	1,23	0,17	86
								1,15	0,16	86
4	Гранион Д403	20,1	7,3	12	1,4	2	1,8	1,32	0,26	80
		20,1	7,0	16	1,39	2	1,7	1,27	0,3	76
		20,0	7,2	20	1,6	2	1,6	1,4	0,41	71
5	Гранион Д403	19,8	6,9	8	1,55	2	1,7	2,56	0,45	83
		19,9	7,1	8	1,41	2	1,7	4,1	0,61	85
		20,1	7,2	8	1,28	2	1,8	5,55	0,89	84
6	Гранион Д403	19,8	7,3	8	1,37	4	3,7	1,51	0,25	83
		20,2	7,2	8	1,49	6	5,8	1,46	0,26	82

В очищенной воде концентрация борат-ионов не превышала 0,14-0,89 мг/л. Эффект очистки воды от борат-ионов для исследуемых образцов ионитов составил: для S-108 – 79-81%, для IRA-743 – 78-82%, для Гранион Д403 – 71-87%.

4. Обсуждение

Исследования подтвердили эффективность метода ионного обмена для удаления бора из природных вод. Все ионообменные смолы показали хороший эффект очистки от борат-ионов. Лучший результат показал ионит марки Гранион Д403. Эффект очистки от бора при его использовании составил 71-87%.

Полученные результаты исследований хорошо согласуются с работами [16, 26, 30]. В данных работах эффективность очистки от бора составила 64% и 96% [26], 89,6% [16], 77-78 % [30],

Полученные результаты подтверждают высокую борселективную способность исследованных ионитов, что позволит им быть конкурентноспособными при очистке природных вод от бора.

Исследования показали влияние технологических параметров (скорость фильтрования и давления на входе в фильтр) на эффект удаления борат-ионов из воды. Фильтры должны работать со скоростью 8 м/ч. Рост этой величины уменьшает эффект очистки от борат-ионов. Давление на входе в установку на эффект удаления борат-ионов не оказывает.

Дальнейшая работа будет направлена на разработку установок по удалению борат-ионов из природных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения различных объектов.

5. Заключение

1. Изучены процессы удаления из воды бора в напорных ионообменных фильтрах с различными ионитовыми смолами. Лучшую борселективность показал ионит марки Гранион Д403.
2. Выявлена необходимая скорость фильтрования, которая составила 8 м/ч. Дальнейший ее рост уменьшает эффект очистки от бора.
3. Установлено, что давление на входе в ионообменный фильтр на эффективность удаления борат-ионов не влияет.

Список литературы / References

1. Абитов Р.Н., Низамова А.Х., Урмитова Н.С. К вопросу о рациональном использовании водоемов: сб. трудов VIII Международного конгресса «Чистая вода. Казань». Казань, 2017. С.20-23. [Abitov R.N., Nizamova A.Kh., Urmitova N.S. To the question of the rational use of water bodies: dig. of art. the VIII International Congress "Pure Water. Kazan". Kazan, 2017. P. 20-23.].
2. Краснов М. С. Очистка воды от бора. Проблемы и особенности // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 4. С. 64-73. [Krasnov M.S. Purification of water from boron. Problems and features // Vodoochistka. Water treatment. Water supply. 2010. No. 4. P. 64-73].
3. Liu X., Xu C., Chen P., Li K., Zhou Q., Ye M., Lu Y. Advances in technologies for boron removal from water: A comprehensive review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. 19(17). DOI: 10.3390/ijerph191710671.
4. Алексеев Л. С., Ивлева Г. А., Аль-Амри З. С. Очистка подземных вод питьевого назначения от бора // Вестник МГСУ. 2011. №8. С. 312-315. [Alekseev L. S., Ivleva G. A., Al-Amri Z. S. Purification of underground drinking water from boron // Vestnik MGSU. 2011. No. 8. P. 312-315].
5. Помогаева В. В., Новикова В. Н. Анализ основных методов удаления бора из воды // Российский инженер. 2017. № 2(8). С. 40-44. [Pomogaeva V. V., Novikova V. N. Analysis of the main methods for removing boron from water // Russian engineer. 2017. No. 2(8). P. 40-44].
6. Najid N., Kouzbour S., Ruiz-Garcia A., Fellaou S., Gourich B., & Stiriba Y. (2021). Comparison analysis of different technologies for the removal of boron from seawater: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. 9(2) DOI: 10.1016/j.jece.2021.105133.
7. Alharati A., Valour J., Urbaniak S., Swesi Y., Fiatty K., Charcosset C. Boron removal from seawater using a hybrid sorption/microfiltration process without continuous addition of resin // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2018. Vol 131, P. 227-233. DOI: 10.1016/j.cep.2018.07.019
8. Мещеряков С. В., Гонопольский А. М. Исследование технологической схемы водоподготовки при повышенном содержании бора // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. №10. С. 4-8. [Meshcheryakov S. V., Gonopolsky A. M. Investigation

- of the technological scheme of water treatment with high boron level // *Ecology and Industry of Russia*. 2017. Vol. 21. No. 10. P. 4-8.]
9. Yang-Zhou C., Cao J., Dong S., Chen S., Michael R. N. Phosphorus co-existing in water: A new mechanism to boost boron removal by calcined oyster shell powder // *Molecules*. 2022. 27(1). DOI:10.3390/molecules27010054
 10. Guesmi F., Louati I., Hannachi C., Hamrouni, B. Optimization of boron removal from water by electrodialysis using response surface methodology // *Water Science and Technology*. 2020. 81(2). P. 293-300. DOI: 10.2166/wst.2020.105
 11. Sarıççek E. N., Tuğaç M. M., Özdemir V. T., İpek İ. Y., Arar Ö. Removal of boron by boron selective resin-filled electrodeionization // *Environmental Technology and Innovation*. 2021. 23. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101742.
 12. Тарасова Н. П., Иванова С. А., Наумов В. Н., Кузнецов В. А., Зайцев В. А. Очистка подземных вод от соединений бора // *Экология промышленного производства*. 2013. №1. С. 29-32. [Tarasova N. P., Ivanova S. A., Naumov V. N., Kuznetsov V. A., Zaytsev V. A. Purification of groundwater from boron compounds // *Ecology of industrial production*. 2013. No. 1. P. 29-32.]
 13. Hu G., Zhang W., Chen Y., Xu C., Liu R., Han Z. Removal of boron from water by GO/ZIF-67 hybrid material adsorption // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. 27(22). P. 28396-28407. DOI: 10.1007/s11356-020-08018-6.
 14. Mahdavi S., Salehi Z., Zarabi M. Isotherm and kinetic studies for adsorption of boron on nano-copper oxide (cuo) in non-competitive and competitive solutions // *Desalination and Water Treatment*. 2020. 192. P. 259-270. DOI: 10.5004/dwt.2020.25781
 15. Селюгин А. С., Гареев Б. М., Каюмов Ф. Ф. К вопросу использования нанотехнологий для глубокой очистки: материалы II Международной научно-практической конференции – Современные проблемы развития фундаментальных и прикладных наук. Т2. Прага: издательский дом «Science of European». 2017. С. 12-17. [Selyugin A. S., Gareev B. M., Kayumov F. F. On the issue of using nanotechnologies for deep cleaning: materials of the II International scientific-practical conference - Modern problems in the development of fundamental and applied sciences. Vol. 2. Prague: publishing house "Science of European". 2017. P. 12-17.]
 16. Hameed S., Awad H. A., Al-Uqaily R. A. H. Boron removal from seawater using adsorption and ion exchange techniques // *Ecology, Environment and Conservation*. 2020. 26(2), P. 480-487.
 17. Belova T. P., Ershova L. S. Boron concentration by industrial anion exchanger resins from model solutions in a dynamic mode // *Heliyon*. 2021. 7(2). DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06141.
 18. Pátzay G., Dobor J., Csonka E., Lozsi G., Feil F. Boron removal from aqueous solutions by strong base anion-exchange resin batch and column experiments // *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2021. 65(3). P. 424-430. DOI: 10.3311/PPch.17169.
 19. Korkmaz M., Özmetin C., Özmetin E., Süzen Y. Modelling of boron removal from solutions by ion exchange for column reactor design in boron mine wastewater treatment // *Desalination and Water Treatment*. 2020. 179, P. 63-74. DOI: 10.5004/dwt.2020.25041.
 20. Kalaitzidou K., Tzika A. M., Simeonidis K., Mitrakas M. Evaluation of boron uptake by anion exchange resins in tap and geothermal water matrix // *Materials Today: Proceedings*. 2018. 5(4). P. 27599-27606. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.09.080.
 21. Alharati A., Swesi Y., Fiaty K., Charcosset C. Comparison of boron removal by ion-exchange resin in column and hybrid membrane process // *Desalination and Water Treatment*. 2018. 129. P. 34-42. DOI: 10.5004/dwt.2018.22805
 22. Duan J., Zhao Y., Fang H., Zhang Z., Chen J., Lin J., Dong J. Removal of boron from aqueous solution by ion exchange resin LSC-800: Batch and column studies // *Desalination and Water Treatment*. 2018. 105. P. 181-188. DOI: 10.5004/dwt.2018.21788.
 23. Govorova Z. M. Conditioning technology for underground water complex of water for drinkable small settlements // *Water and Ecology*. 2017. (1) P. 3-12. DOI:10.23968/2305-3488.2017.19.1.3-12.
 24. Kobya M., Öncel M. S., Demirbas E., Celen M. Arsenic and boron removal from spring and groundwater samples in boron mining regions of turkey by electrocoagulation and ion-

- exchange consecutive processes // *Desalination and Water Treatment*. 2017. 93. P. 288-296. DOI: 10.5004/dwt.2017.20821.
25. Bai S., Han J., Du C., Li J., Ding W. Removal of boron and silicon by a modified resin and their competitive adsorption mechanisms // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. 27(24). P. 30275-30284. DOI: 10.1007/s11356-020-09308-9.
26. Cyganowski P., Şen F., Altıok E., Wolska J., Bryjak M., Kabay N., Yüksel M. Surface-activated chelating resins containing N-methyl-D-glucamine functional groups for desalination of geothermal water aimed for removal of boron and arsenic // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2021. 39(5-6), P. 584-603. DOI: 10.1080/07366299.2021.1876385.
27. Türker O. C., Baran T. A combination method based on chitosan adsorption and duckweed (*lemna gibba* L.) phytoremediation for boron (b) removal from drinking water // *International Journal of Phytoremediation*. 2018. 20(2). P. 175-183. DOI: 10.1080/15226514.2017.1350137
28. Калицун В. И., Ласков Ю. М. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод. М.: Стройиздат. 2000. 272с. [Kalitsun V. I., Laskov Yu. M. Laboratory workshop on water disposal and wastewater treatment. Moscow: Stroyizdat. 2000. 272 p.]
29. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. Примеры расчетов канализационных сооружений. М.: Альянс. 2008. 255 с. [Laskov Yu. M., Voronov Yu. V., Kalitsun V. I. Examples of calculations of sewerage structures. M.: Alyans. 2008. 255 p.]
30. Adeyi A. A., Jamil S. N. A. M., Abdullah L. C., Ibrahim, N. N. L. N., Nourouzi M. Efficient sequestration of boron from liquid phase by amidoxime-functionalized poly(acrylonitrile-co-acrylic acid) // *Experimental and modelling analyses. Water Science and Technology*. 2022. 85(10), P. 3055-3071. DOI: 10.2166/wst.2022.162

Информация об авторах

Бусарев Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: reder100@myrambler.ru

Шешегова Ирина Геннадьевна, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ig-7@mail.ru

Information about the authors

Andrey V. Busarev, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: reder1@myrambler.ru

Irina G. Sheshegova, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: ig-7@mail.ru