

УДК 544

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ АНИОНООБМЕННЫМ ВОЛОКНОМ ФИБАН А-5 В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2023 г. Е. А. Буцких¹, И. В. Воронюк^{1, *}, Т. В. Елисеева¹, Г. В. Медяк², А. П. Поликарпов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Воронежский государственный университет”, Университетская площадь, 1, Воронеж, 364018 Россия

²Государственное научное учреждение “Институт физико-органической химии национальной академии наук Беларуси”, ул. Сурганова, 13, Минск, 220072 Республика Беларусь

*e-mail: i.voroniuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.05.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Бор и его соединения, несмотря на необходимость для функционирования живого организма, при чрезмерном содержании способны проявлять токсическое действие. Актуальной задачей является их удаление различными способами, в том числе с использованием сорбционных технологий. К извлечению соединений бора способны борселективные сорбенты с функциональными ОН-группами и гранульные анионообменники с функциональными аминогруппами. В настоящей работе проведено исследование сорбции борной кислоты в статических условиях на волокнистом сорбенте ФИБАН А-5, который проявляет большое сродство к бору и может быть использован как альтернатива анионообменников, выпускаемых в виде гранул. Изучены особенности кинетики и равновесия сорбционного процесса при контакте исследуемого волокна с растворами борной кислоты. Отмечено, что время достижения равновесного состояния уменьшается при интенсификации перемешивания и увеличении градиента концентрации раствора. Изотермы сорбции носят ступенчатый характер, что связано с присутствием бора в различных формах при концентрации выше 0.025 М. Установлено влияние температуры, pH раствора и ионной формы сорбента на емкостные характеристики волокна ФИБАН А-5.

Ключевые слова: бор, борная кислота, сорбция, кинетика сорбции, равновесие сорбции, ионообменные волокна, ФИБАН

DOI: 10.31857/S0023291223600396, **EDN:** WRXSUU

ВВЕДЕНИЕ

Бор и его соединения, несмотря на необходимость для функционирования живого организма, при чрезмерном содержании способны проявлять токсическое действие [1]. Данный элемент может обнаруживаться в питьевых и сточных водах в результате антропогенного воздействия различного рода производств, в том числе металлургических, фармацевтических, керамических предприятий [2], а также в результате применения различных форм удобрений в сельском хозяйстве [3].

Для удаления бора из вод используются сорбционные и мембранные технологии [4–12]. Один из популярных методов удаления борсодержащих соединений из водных сред – обратный осмос [11, 13, 14]. Однако эффективность его применения мала в случае присутствия борной кислоты в недиссоциированной форме [11].

Сорбционные методы зачастую более избираемы. Известны борселективные сорбенты раз-

личных марок [15–18], содержащие функциональные ОН-группы. Механизмом извлечения бора при этом является хемосорбция за счет присоединения борной кислоты к активным центрам сорбента с образованием боратноэфирных комплексных соединений [4].

Помимо таких сорбентов большое число работ посвящено использованию гранульных анионообменников отечественного производства с функциональными аминогруппами различной основности [19–21]. Механизм сорбции борной кислоты в таком случае носит преимущественно необменный характер и основан на образовании комплекса между протонированной формой борной кислоты и функциональными группами сорбента.

Ввиду особенностей строения гранульных борселективных и анионообменных полимеров при поглощении сорбтивами характерно влияние внутридиффузионных ограничений на скорость их подвода к функциональным группам сорбента. Данный факт может обуславливать не только увели-

Таблица 1. Характеристики волокна ФИБАН А-5

Функциональные группы	Третичный амин, вторичный амин, карбоксильная группа
Полимерная матрица	Полиакрилонитрильное промышленное волокно “Нитрон Д”
Форма волокна	Штапельное волокно
Исходная ионная форма	Смешанная (HCO_3^- , CO_3^{2-} , форма свободного основания)
Емкость, ммоль-экв/г	4.2 – по третичным аминогруппам, 0.5 – по карбоксильным группам

чение времени сорбционного процесса, но и снижать емкостные характеристики.

В [22] установлено, что альтернативой гранульных анионообменников могут быть волокнистые материалы марки ФИБАН с функциональными аминогруппами. Целью настоящей работы было выявление закономерностей кинетики и равновесия сорбции борной кислоты волокном ФИБАН А-5 в статических условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве сорбтива в работе использовали водные растворы борной кислоты (х.ч., ООО “Спектр-Хим”), которая характеризуется низким значением константы диссоциации – $\text{pK}_a = 9.24$ [23]. Вследствие этого ионизация молекулы сорбтива происходит только в щелочных средах при pH выше 7. Для определения концентрации H_3BO_3 использовали алкалиметрический метод титрования в присутствии избытка глицерина [24].

В качестве ионообменного волокна выбран сорбент ФИБАН А-5 (Институт физико-органической химии национальной академии наук Беларуси”) (табл. 1). Ионообменник перед работой переводили в форму свободного основания по стандартной методике [25]. Для получения хлоридной и сульфатной форм сорбенты обрабатывали растворами соответствующих минеральных кислот.

Кинетические характеристики сорбции борной кислоты волокном ФИБАН А-5 в статических условиях определяли путем контроля емкости сорбента во времени, зависимости представляли в координатах $F = f(t)$, где F – степень завершенности сорбционного процесса – рассчитывали по формуле:

$$F = \frac{Q_t}{Q},$$

где Q_t – количество поглощенной волокном кислоты из раствора в момент времени t , ммоль/г; Q – количество поглощенной волокном кислоты из раствора в состоянии равновесия, ммоль/г. Количество поглощенного сорбтива рассчитывали по убыли концентрации борной кислоты в растворе в ходе ее поглощения с учетом объема раствора и массы сорбента:

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m},$$

где C_0 – исходная концентрация борной кислоты, моль/дм³; C_t – концентрация борной кислоты в момент времени t , моль/дм³; V – объем раствора, см³; m – масса волокна.

Особенности извлечения борной кислоты в равновесных условиях изучали методом переменных концентраций. Зависимости представляли в координатах изотерм сорбции $Q = f(C_{\text{равн}})$. Для анализа изменения константы распределения сорбтива (K) с ростом его концентрации во внешнем растворе проводили расчет по формуле:

$$K = \frac{Q'}{C_{\text{равн}}},$$

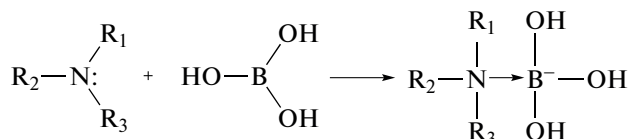
где Q' – количество борной кислоты, поглощенной волокном, ммоль/дм³. Расчет объема сорбента проводили с учетом его плотности, которая определялась эквиденсиметрически по методике, приведенной в работе [26].

Исследование сорбции борной кислоты анионообменным волокном проводили при температурах 278 и 298 ± 2 К и разных скоростях перемешивания на орбитальном шейкере BioSan OS-20, соотношение массы сорбента к массе раствора выбрано 1 : 400 для обеспечения условия постоянно обновляющегося раствора. Контроль pH растворов осуществляли потенциометрически на иономере И-160МИ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сорбционное сродство исследуемого волокна к борной кислоте подтверждено в работе [22]. Для выяснения оптимальной ионной формы сорбента определяли количество поглощенной кислоты волокнистым материалом в форме свободного основания, хлоридной и сульфатной формах. Отмечено, что при концентрации внешнего раствора 0.1 М и его перемешивании со скоростью 250 оборотов в минуту поглощение наблюдается только при использовании волокна в форме свободного основания ($Q = 2.60$ ммоль/г), в Cl^- и SO_4^{2-} -формах сорбция практически не идет. Данный факт подтверждает необменный характер поглощения сорбтива.

Вследствие очень низкой кислотности H_3BO_3 практически не ионизирована и не может участвовать в процессе взаимодействия с солевыми формами волокна А-5. При этом присутствие сорбента в форме свободного основания может приводить как к частичной диссоциации сорбтива и его ионообменному закреплению, так и предоставляет возможность протекания реакции комплексообразования с функциональными группами волокна, превращая конфигурацию бора из тригональной в более устойчивую тетрагональную [27, 28]:



Далее в работе проводили исследования только на сорбенте в форме свободного основания.

Для изучения особенностей сорбции борной кислоты в зависимости от времени контакта фаз волокно–раствор получали кинетические кривые (рис. 1) в координатах $F-t$. Ранее [22] установлено, что время достижения равновесия в изучаемой системе мало, что подтверждает факт высокой скорости сорбции на ионообменниках в форме волокна, установленный в ряде исследований [29–32]. Для получения информации о факторах, влияющих на скорость достижения равновесного состояния, в работе анализировали кинетические кривые сорбции при концентрациях борной кислоты в водном растворе 0.05 и 0.1 моль/дм³ и скоростях перемешивания 100 и 250 оборотов в минуту (рис. 1).

Отмечается, что время достижения равновесия в системе волокно – раствор борной кислоты зависит от выбранных в работе параметров. С увеличением количества оборотов в минуту и ростом содержания сорбтива в жидкой фазе растет скорость выхода кинетических кривых на “плато”. Это может свидетельствовать как о внешнелиффузионных ограничениях процесса сорбции, так и о лимитировании скорости всего процесса стадией непосредственно химического взаимодействия между молекулами кислоты и функциональными группами сорбента.

Однако не следует исключать возможность лимитирования сорбционного процесса стадией внутренней диффузии, так как область исследованных концентраций достаточно велика, чтобы нивелировать влияние внешнелиффузионных ограничений на сорбционный процесс. Для оценки роли диффузионных процессов в кинетике сорбции борной кислоты в работе проведен формальный анализ кинетических кривых в координатах уравнения Бойда–Адамсона для случая внутренней и внешней диффузии [33]:

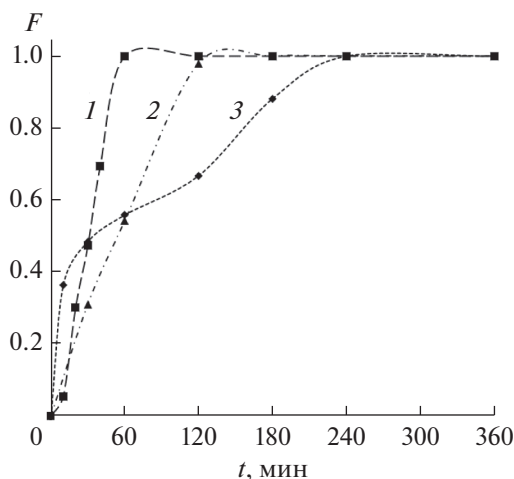


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции борной кислоты волокном ФИБАН А-5 при различных условиях: 1 – $C_0 = 0.1$ моль/дм³; скорость перемешивания 250 об./мин; 2 – $C_0 = 0.05$ моль/дм³; скорость перемешивания 250 об./мин; 3 – $C_0 = 0.1$ моль/дм³; скорость перемешивания 100 об./мин.

– для случая внутренней диффузии в ионообменнике в виде цилиндра бесконечной высоты

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\bar{D}t}{r^2}\right), \quad (1)$$

– для случая внешней диффузии

$$-\ln(1-F) = \frac{3D}{r\delta K} t, \quad (2)$$

где μ_n – корни некоторого характеристического уравнения; r – радиус цилиндра (волокна ионообменника); $\bar{D}$ – коэффициент внутренней диффузии; $\frac{\bar{D}\pi^2}{r_0^2} = B$ – константа внутренней диффузии;

D – коэффициент внешней диффузии, δ – толщина “пленки”, K – коэффициент распределения сорбата в системе раствор–сорбент. При малых степенях заполнения ($F < 0.5$) для случая внутренней диффузии справедливо выражение [34]:

$$F = 1.08\sqrt{Bt}. \quad (3)$$

Представление кинетических кривых в координатах уравнений (2) и (3) позволило оценить коэффициенты достоверности аппроксимации линейных зависимостей, полученные данные представлены в табл. 2.

Отмечено, что наибольшие коэффициенты R^2 характерны для кривых, представленных в координатах уравнения для случая внутренней диффузии. Величины коэффициентов внутренней диффузии при этом находятся в диапазоне $(1.4-2.2) \times 10^{-11}$ см²/с. Таким образом, можно сказать, что

Таблица 2. Коэффициенты достоверности аппроксимации (R^2) кинетических уравнений сорбции в линейных координатах Бойда–Адамсона для системы раствор борной кислоты – ФИБАН А-5

Модели сорбции Бойда–Адамсона	Условия эксперимента		
	0.05 М (250 об./мин)	0.1 М (100 об./мин)	0.1 М (250 об./мин)
Для случая внутренней диффузии ($F < 0.5$) (3)	$R^2 = 0.991$	$R^2 = 0.974$	$R^2 = 0.886$
Для случая внешней диффузии ($F < 1$) (2)	$R^2 = 0.963$	$R^2 = 0.863$	$R^2 = 0.839$

на скорость сорбционного поглощения борной кислоты оказывает влияние как стадия химической реакции между сорбтивом и сорбентом, так и стадия внутренней диффузии. Действительно, следует обратить внимание на тот факт, что кинетическая кривая сорбции H_3BO_3 при 100 об./мин и $C_0 = 0.1$ М отличается по виду от остальных. При малых скоростях перемешивания раствора с относительно высоким содержанием сорбтива отмечается, что процесс поглощения идет ступенчато и имеет перегиб в области 60–120 минут, а далее снова идет рост емкости до момента достижения равновесного состояния. Данный факт, возможно, связан с тем, что при концентрации борной кислоты более 0.025 М в растворе образуются полиборат-ионы разного состава [35], которые также могут участвовать в процессе сорбции волокном.

Помимо особенностей кинетики сорбции борной кислоты в работе оценены равновесные характеристики поглощения исследуемого вещества волокном ФИБАН А-5 в области температур 278–313 К при периодическом перемешивании. Выбран широкий диапазон концентраций кисло-

ты 0.005–0.5 моль/дм³. Установлено, что при повышении температуры до 313 К поглощения H_3BO_3 не происходит.

На рис. 2 приведены полученные изотермы сорбции борной кислоты при температурах 278 и 298 ± 2 К. Обе кривые имеют сложный вид S-образной кривой с наличием двух “плато”, что обусловлено ступенчатым характером поглощения борной кислоты волокном ФИБАН А-5. Как указано выше, при концентрации сорбтива более 0.025 М в растворе могут присутствовать не только молекулы борной кислоты и в незначительном количестве моноборат-ионы, но и полибораты типа $B_3O_3(OH)_4^-$, $B_4O_5(OH)_4^{2-}$, $B_5O_6(OH)_4^-$ и другие [27, 35]. Соответственно, чем выше концентрация кислоты, тем больше вероятность ее полимеризации и образования полиборат-ионов, которые могут участвовать в процессе взаимодействия с функциональными группами волокна и приводить к полимолекулярной сорбции.

Начальный участок изотермы по классификации IUPAC имеет вид изотермы V типа и характеризует малую энергию взаимодействия между сорбентом и сорбтивом с его концентрацией во внешнем растворе менее 0.025 М. На этом участке наблюдаются небольшие значения емкости волокна, а также эндотермический эффект сорбции. В области концентраций 0.025–0.075 М отмечена экзотермическая сорбция и высокие емкости ФИБАН А-5 по исследуемому соединению. Достоверной разницы в количестве поглощенного сорбтива при содержании кислоты выше 0.1 М при температурах 278 и 298 К обнаружено не было.

Оценка изотерм сорбции борной кислоты путем их линеаризации в координатах уравнений сорбции типа Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина, как и в работе [22], показывает, что наиболее подходящей моделью для описания равновесного поглощения на начальном участке полученных зависимостей является модель Темкина: $R^2 = 0.902$ (278 К), $R^2 = 0.945$ (298 К).

Многовариантный механизм поглощения борной кислоты и ее ассоциатов отражается и на зависимости коэффициента распределения бора от его концентрации во внешнем растворе (рис. 3).

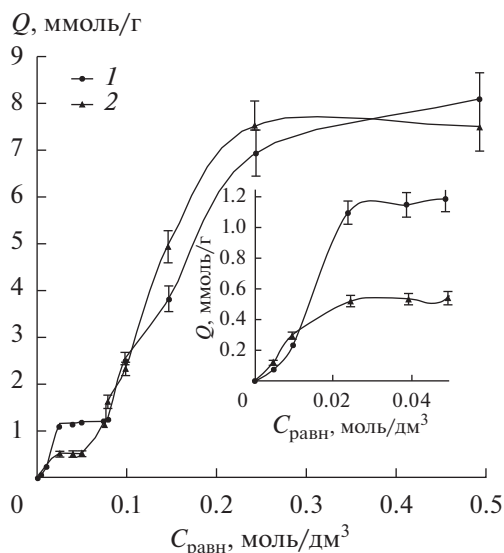


Рис. 2. Изотермы сорбции борной кислоты волокном ФИБАН А-5 при разных температурах:
1 – $T = 278 \pm 2$ К; 2 – $T = 298 \pm 2$ К.

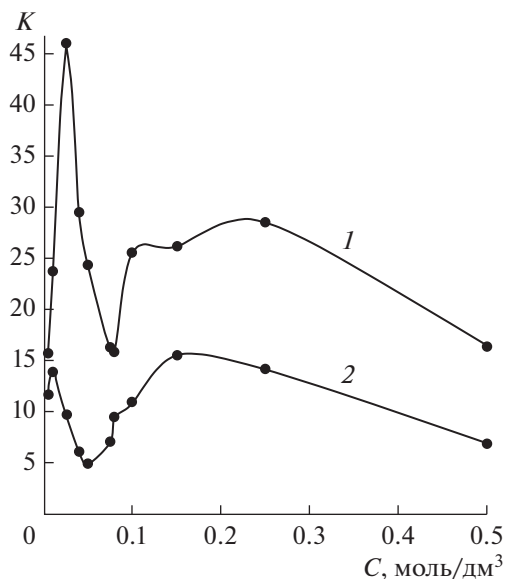


Рис. 3. Зависимость коэффициента распределения борной кислоты в системе раствор–волокно ФИБАН от ее концентрации при разных температурах: 1 – $T = 278 \pm 2$ К; 2 – $T = 298 \pm 2$ К.

Участки, на которых наблюдается увеличение величины K с ростом концентрации борной кислоты, характеризуют заполнение поверхности сорбента молекулами борной кислоты и продуктами ее полимеризации. Минимумы на полученных зависимостях, очевидно, определяют предельное количество сорбтива, которое может поглотить волокно в данных условиях.

Сорбционная емкость волокна ФИБАН А-5 зависит не только от температуры и концентрации борной кислоты в модельном растворе, но и от кислотности среды. На рис. 4 представлена зависимость количества поглощенной H_3BO_3 от pH среды. Варьирование pH раствора кислоты проводили с использованием концентрированных растворов соляной кислоты и гидроксида натрия с контролем кислотности среды методом прямой потенциометрии.

Приведенная на графике зависимость представляет собой кривую с максимумом при величине pH равном 8. Снижение количества поглощенной кислоты при $pH < 5$ связано как с подавлением диссоциации борной кислоты, так и с конкурентной сорбцией хлорид-ионов. В щелочной среде создаются благоприятные условия для ионизации борной кислоты и ее полиборатов, а, следовательно, увеличивается доля обменной сорбции.

ВЫВОДЫ

В работе оценены некоторые кинетические и равновесные характеристики сорбции борной

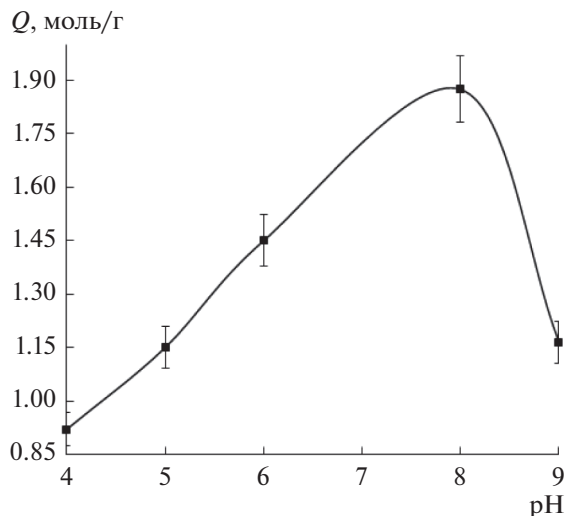


Рис. 4. Зависимость емкости волокна ФИБАН А-5 по борной кислоте от pH раствора.

кислоты в разных условиях. Отмечено, что процесс поглощения ионообменником ФИБАН А-5 отличается высокой скоростью, а также величинами сорбционной емкости по бору от 0.8 до 8 ммоль/г, поэтому исследуемое волокно может быть рассмотрено как альтернатива гранульным анионообменникам для извлечения соединений бора из вод различного назначения. Установлено, что на скорость сорбционного процесса существенно влияют концентрация сорбтива и скорость перемешивания раствора

Ввиду того, что борная кислота в зависимости от концентрации в водном растворе может участвовать в большом количестве реакций с образованием полиборатов разного состава, данные процессы оказывают влияние и на равновесные характеристики сорбции. Изотермы сорбции кислоты имеют ступенчатую форму с наличием двух “плато”. На каждом из участков экспериментальных зависимостей может идти поглощение боратов разного состава. Предполагается, что основным механизмом поглощения сорбции соединений бора является процесс комплексообразования с функциональными группами волокна. Ионный обмен на сорбенте ФИБАН А-5 возможен при создании избытка ОН-ионов в растворе (создании щелочной среды), которые индуцируют ионизацию соединений борной кислоты.

Таким образом, в работе осуществлено исследование особенностей кинетики и равновесия сорбции бора в составе ортоборной кислоты волокном ФИБАН А-5, определены условия для его максимального извлечения из водных растворов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2023–2025 годы, проект № FZGU-2023-0009

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скальный А.В. Биоэлементология: основные понятия и термины: терминологический словарь. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005.
2. Немодрук А.А., Каралова З.К. Аналитическая химия бора. М.: Наука, 1964.
3. Аристархов А.Н., Яковлева Т.А. Агрохимическая и агроэкономическая эффективность применения борных удобрений различными способами под сахарную свеклу (*Beta vulgaris* L. var. *sacharifera* Alef.) // Агрохимия. 2019. № 2. С. 21–36. <https://doi.org/10.1134/S0002188119020030>
4. Попов Г.В. Современные методы и средства извлечения бора из теплоносителей геотермальных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S63. С. 261–265.
5. Говорова Ж.М. Технология кондиционирования подземной воды сложного состава для хозяйственно-водоснабжения малых населенных пунктов // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 1. С. 3–12. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.19.1.3-12>
6. Помогаева В.В., Новикова В.Н. Анализ основных методов удаления бора из воды // Российский инженер. 2017. Т. 3. № 2. С. 40–44.
7. Najid N., Kouzbou S., Ruiz-Garcia A., Fellaou S., Gourich B., Stiriba Y. Comparison analysis of different technologies for the removal of boron from seawater: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. V. 9. № 2. P. 1105133. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105133>
8. Мещеряков С.В., Гонопольский А.М., Сушкова А.В., Дуженко И.С., Беганский И.В. Исследование технологической схемы очистки воды при повышенном содержании бора // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 10. С. 4–8. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-10-4-8>
9. Алексеев Л.С., Ивлева Г.А., Аль-Арми З. Бор – пути очистки питьевой воды // СОК. 2013. № 5. С. 16–19.
10. Самбурский Г.А. Анализ технико-экологических проблем удаления бора из природной воды // Вестник МИТХТ. 2011. Т.6. № 4. С. 118–125.
11. Тихонов И.А. Удаление бора из воды с использованием обратного осмоса // СОК. 2022. № 2. С. 22–24.
12. Dydo P., Turek M. Boron removal using ion exchange membranes // Boron Separation Processes. 2015. V. 11. P. 249–265. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63454-2.00011-3>
13. Десятов А.В., Колесников В.А., Кручинина Н.Е., Ландырев А.М., Колесников А.В. Двухступенчатая схема удаления соединений бора при опреснении морской воды методом обратного осмоса // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 4. С. 389–393. <https://doi.org/10.7868/S0040357115040041>
14. Landsman M., Rivers F., Pedretti B., Freeman B., Lawler D., Lynd N., Katz L. Boric acid removal with polyol-functionalized polyether membranes // Journal of Membrane Science. 2021. V. 638. P. 119690. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119690>
15. Ide T., Hirayama Y. How boron is adsorbed by D-glucamine: A density functional theory study // Computational and Theoretical Chemistry. 2019. V. 1150. P. 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2019.01.007>
16. Figueira M., Reig M., Labastida M.F., Cortina J.L., Valderama C. Boron recovery from desalination seawater brines by selective ion exchange resins // Journal of Environmental Management. 2022. V. 314. P. 114984. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114984>
17. Мельник Л.А. Перспективы применения борселективных сорбентов различной природы для кондиционирования воды по содержанию бора // Технология водоподготовки и деминерализация вод. 2015. Т. 37. № 1. С. 51–62.
18. Abbasi A., Yahya W., Nasef M., Moniruzzaman M., Shaan Manzoor Chumman A., Afolabi H.K. Boron removal by glucamine-functionalized inverse vulcanized sulfur polymer // Reactive and Functional Polymers. 2022. V. 177. P. 105311. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105311>
19. Липунов И.Н., Первова И.Г., Никифоров А.Ф. Сорбция борной кислоты анионитами поликонденсационного типа // Изв. Вузов. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 8. С. 42–48.
20. Ершова Л.С., Белова Т.П. Исследования сорбции бора промышленными анионитами из модельных растворов, имитирующих геотермальные теплоносители в динамическом режиме // Башкирский химический журнал. 2019. Т. 26. № 4. С. 74–77. <https://doi.org/10.17122/bcj-2019-4-74-77>
21. Виницкий В.А., Чугунов А.С., Нечаев А.Ф. Сорбция борной кислоты гидроксильной формой высокоосновного анионита АВ-17-8 и направление модернизации системы спецводоочистки АЭС // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. № 6. С. 84–87.
22. Буцких Е.А., Воронюк И.В., Елисеева Т.В., Поликарпов А.П., Шункевич А.А. Сорбция борной кислоты анионообменными волокнами ФИБАН // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2023. Т. 59. № 2. С. 133–138. <https://doi.org/10.31857/S0044185623700146>
23. National Center for Biotechnology Information. PubChem. Compound Summary. Boric acid. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Boric-acid>. (Дата обращения: 2 мая 2023 г.)
24. Анализ бора и его неорганических соединений / Васильева М.Г., Лалыкина В.М., Махарашвили Н.А. и др.; Под ред. д-ра хим. наук Е.Е. Барони. М.: Атомиздат, 1965. С. 9–11.

25. ГОСТ 10896-78. Иониты. Подготовка к испытанию (с Изменением № 1).
26. Богатырев В. Л. Иониты в смешанном слое / Богатырев В. Л. Ленинград: Химия, Ленинградское отд., 1968. 210 с.
27. Lopalco A., Lopedota A.A., Laquintana V., Denora N., Stella V.J. Boric acid, a Lewis acid with unique and unusual properties: Formulation implications // Journal of Pharmaceutical Sciences. 2020. V. 109. № 8. P. 2375–2386.
<https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.04.015>
28. Ворончихина Л.И., Журавлев О.Е., Суворова А.М. Аминоборатные комплексы как ингибиторы коррозии черных металлов // Вестник ТвГУ. Серия “Химия”. 2019. № 4 (38). С. 132–138.
<https://doi.org/10.26456/vtchem2019.4.15>
29. Бондарева В.В., Трошкина И.Д., Брыксин Д.А., Волощенко А.С., Чирков А.С. Извлечение палладия(II) из солянокислых растворов волокнистым сорбентом ФИБАН АК-22 // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. № 3. С. 469–472.
30. Васильева Е.В., Воронюк И.В., Елисеева Т.В. Особенности сорбционного извлечения метанала волокнистым ионообменником ФИБАН А-5W // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 2. С. 209–216.
<https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/740>
31. Нве Ш.У., Шиляев А.В., Трошкина И.Д. Сорбционное извлечение ванадия из минерализованных растворов волокнистым ионитом // Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 6(135). С. 126–129.
32. Сазонова В.Ф., Перлова О.В., Перлова Н.А., Поликарпов А.П. Сорбция соединений урана(VI) на поверхности волокнистого анионита из водных растворов // Коллоидный журнал. 2017. Т. 79. № 2. С. 219–226.
<https://doi.org/10.7868/S0023291217020136>
33. Boyd G.E., Adamson A.W., Myers L.S. The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics // J. Amer. Chem. Soc. 1947. V. 69. № 11. P. 2836–2848.
<https://doi.org/10.1021/ja01203a066>
34. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л.: Химия, 1970. 336 с.
35. Kochkodan V., Darwish N.B., Hilal N. The chemistry of boron in water // Boron separation processes. 2015. V. 2. P. 35–63.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63454-2.00002-2>