

УДК 542.061

DOI: 10.17072/2223-1838-2021-1-59-70

А.М. Елохов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И СОЛЕЙ МАГНИЯ

В работе исследовано распределение борной кислоты и тетрабората натрия в системах на основе технических оксиэтилированных поверхностно-активных веществ (оксифоса Б, синтамида-5, синтанолов ДС-10 и АЛМ-10) и хлорида, нитрата или сульфата магния. На примере системы хлорид магния – оксифос Б – вода показаны зависимости степени извлечения борной кислоты и хлорида магния от содержания макрокомпонентов в системе, а также влияние начальной концентрации борной кислоты или тетрабората натрия и наличия в растворе сильных кислот на степень извлечения бора. Установлено, что в системе хлорид магния – оксифос Б – вода невозможно достичь разделения борной кислоты и хлорида магния. На основании анализа полученных данных установлено, что извлечение борной кислоты увеличивается с ростом объема экстракта и, следовательно, концентрации воды в нем.

Ключевые слова: борная кислота; поверхностно-активные вещества; экстракция; соли магния

Поступила в редакцию 02.02.2021; после доработки 25.02.2021; принята к публикации 1.03.2021

A.M. Elokhov

Perm State University, Perm, Russia
Institute of Natural Science, Perm State University, Perm, Russia

REGULARITIES OF BORIC ACID DISTRIBUTION IN SYSTEMS BASED ON TECHNICAL SURFACTANT AND MAGNESIUM SALTS

The work investigates boric acid and sodium tetraborate distribution in systems based on technical oxyethylated surfactants (oxyphos B, synthamide-5, synthanols DS-10 and ALM-10) and magnesium salt (chloride, nitrate or sulfate). In example magnesium chloride – oxyphos B – water system dependence of boric acid and magnesium chloride recovery rates of macro components contents in the system are shown. The influence of boric acid or sodium tetraborate initial concentration and presence of strong acids to boron extraction demonstrated. It was found that boric acid and magnesium chloride separation in magnesium chloride – oxyphos B – water system is impossible. Based on analysis of data obtained, it was found that extraction of boric acid increases with increase in extract volume and water concentration in extract.

Keywords: boric acid, surfactants, extraction, magnesium salts

Received 02.02.2021; revised 25.02.2021; accepted 1.03.2021

© Елохов А.М., 2021



Данная статья распространяется на условиях лицензии
Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

Бор и его соединения используются при получении огнеупорных и особо твердых сплавов, термостойких полимеров, поглотителей нейтронов в ядерных реакторах, полупроводниковых материалов, а также в производстве комплексных минеральных удобрений. Основным методом получения борной кислоты является разложение ашарита или гидроборачита серной или хлороводородной кислотой, отгонка борной кислоты с водяным паром и ее последующая кристаллизация. Маточный раствор после отделения борной кислоты содержит 0,5–1,1 % бора, хлорид или сульфат магния, а также и некоторое количество серной или хлороводородной кислоты. Его возвращают на стадию разложения для разбавления кислоты или перерабатывают в бормагниевого твердые удобрения. Другим потенциальным источником бора являются природные рассолы бишофита – гексагидрата хлорида магния (содержание бора до 0,08 %), а также морская вода (содержание бора до 4,5 г/м³) [1].

Основным способом извлечения соединений бора из водных растворов является жид-

костная экстракция. Лучшими экстрагентами в отсутствие высаливателя являются фосфорсодержащие соединения, которые осуществляют комплексобразование за счет кислорода при атоме фосфора, а также алифатические спирты [2, 3]. С ростом концентрации солей магния в растворах степень извлечения борной кислоты алифатическими спиртами увеличивается. По уменьшению эффективности соли магния располагаются в ряд $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, $MgSO_4$ [4, 5]. В работах [6–8] изучена растворимость и экстракция борной кислоты в системах полиэтиленгликоль – высаливатель – вода. Полученные данные свидетельствуют о взаимодействии борной кислоты с концевыми гидроксильными группами ПЭГ, полное извлечение соответствует соотношению $H_3BO_3 : ПЭГ = 1:3$ [7].

Другим способом концентрирования бора является сорбция с помощью природных, модифицированных или искусственных сорбентов. Некоторые типы сорбентов и условия извлечения бора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сорбция борной кислоты из водных растворов

Сорбент	Условия количественного извлечения	Источник
Многослойные углеродные нанотрубки модифицированные винной кислотой	pH = 5–6. Модификация позволяет увеличить адсорбционную способность за счет увеличения массовой доли кислорода	9
Отходы сепиолита, активированные хлороводородной кислотой	pH = 10. Обработка кислотой увеличивает пористость сорбента и адсорбционную емкость	10
Сшитый полиалиламин, модифицированный глюкозой	pH = 8–9. Наличие остатков глюкозы увеличивает емкость сорбента за счет комплексобразования	11
Микросферы на основе хитозана и гидроксида никеля (II)	pH = 3–9. Извлечение бора за счет образования комплексного соединения с никелем. В нейтральной и слабощелочной среде наблюдается частичное растворение гидроксида никеля	12
Активированный уголь, модифицированный гидроксидом железа (III)	pH = 8,1–8,3. Бор извлекается за счет взаимодействия $[B(OH)_4]^-$ иона с положительно заряженной поверхностью сорбента	13
Коммерческие смолы (Diaion CRB 03, CRB 05), модифицированные N-метилглюкозаминном	pH = 5–7. Предложено использовать сорбенты для хроматографического отделения бора	14

Технические ПАВ ввиду их низкой стоимости и возможности варьирования строения в широких пределах получили широкое использование в экстракции различных по природе веществ [15–17], в связи с чем представляет интерес установить возможность их использования для концентрирования борной кислоты и ее солей. Так как соединения бора сопутствуют магнийсодержащим природным и техногенным растворам, то в качестве высаливателей исследованы сульфат, хлорид и нитрат магния, как одни из наиболее растворимых и имеющих важное технологическое значение солей магния.

Объекты и методы исследования

В работе использованы:

1. Технические оксиэтилированные ПАВ: оксифос Б ($[\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_6]_2\text{POOK}$, $n=8-10$, основное вещество – 98 %), синтанолы ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{10}\text{H}$, $n=10-18$ для синтанола ДС-10, $n = 10-13$ для синтанола АЛМ-10, основное вещество – 99 %), синтамид-5 ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{CONHCH}_2\text{CH}_2\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}$, $n = 10-16$, $m = 5-6$, основное вещество – 90%).

2. Гексагидрат хлорида магния и гептагидрат сульфата магния квалификации ч.д.а., борная кислота и декагидрат тетрабората натрия квалификации х.ч. Перед использованием вещества дважды перекристаллизовали из дистиллированной воды.

Экстракцию бора осуществляли следующим образом: в градуированные пробирки с притертой пробкой помещали навеску гексагидрата хлорида магния или гептагидрата сульфата магния, рассчитанный объем раствора ПАВ с концентрацией 500 г/л и бора (в виде борной кислоты или тетрабората натрия), доводили дистиллированной водой до 15 мл. По-

лученную смесь интенсивно встряхивали до полного растворения соли. После установления равновесия фазы разделяли. В случае осуществления экстракции при температуре выше комнатной пробирки выдерживали в термостате в течение 30 минут, после чего пробирки охлаждали до комнатной температуры и фазы разделяли.

Содержание бора в экстракте и рафинате определяли алкалиметрическим титрованием в присутствии маннита с фенолофталеином в качестве индикатора [18]. Опытным путем установлено, что однократного добавления маннита (около 1 г) достаточно для полного связывания бора в комплекс. Для устранения влияния ПАВ на переходы индикаторов проводили титрование холостого опыта, полученного из аликвоты экстракта или рафината, не содержащей бора.

Содержание хлорида магния в экстракте определяли комплексометрическим титрованием с индикатором эриохром черный Т [19] и обратным алкалиметрическим титрованием по следующей методике: аликвоту экстракта или рафината, содержащую не более 400 мг хлорида магния помещали в коническую колбу, разбавляли до 50 мл и нагревали почти до кипения. Добавляли 20 мл 0,5 моль/л гидроксида натрия и кипятили раствор 1–2 минуты. После охлаждения переносили раствор с осадком в мерную колбу на 100 мл, доводили объем дистиллированной водой до метки и фильтровали полученный раствор. В аликвотной части фильтрата определяли избыток гидроксида натрия, титруя 0,1 моль/л раствором хлороводородной кислоты с индикатором метиловым оранжевым.

Результаты и их обсуждение

На основании закономерностей высаливания оксиэтилированных ПАВ неорганическими солями [20, 21], все системы неорганическая соль – оксиэтилированное ПАВ – вода можно разделить на три группы:

- группа I – системы, пригодные для экстракции при комнатной температуре;
- группа II – системы, пригодные для экстракции при температурах выше комнатной;
- группа III – системы, ограниченно пригодные для экстракции, вследствие высокой температуры, при которой существует расслаивание или в которых область расслаивания не образуется.

Так как катион магния оказывает сильное высаливающее действие по отношению к оксиэтилированным ПАВ, то к группе I будут относиться соли магния с многозарядными анионами, для которых высаливающее действие аниона превалирует над высаливающим действием катиона, например сульфат магния. К группе II следует отнести соли магния с однозарядными катионами среднего радиуса, например, хлорид магния, а к группе III – нитрат магния, для которого высаливающее действие выражено крайне слабо.

Помимо природы соли следует учитывать и способность к высаливанию самого ПАВ, которую можно косвенно оценить по величине гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ) или «температуры помутнения» – минимальной температуры, отвечающей фазовому переходу «раствор – расслаивание» для растворов ПАВ равной концентрации. Очевидно, чем ниже температура помутнения растворов ПАВ, тем выше его способность к высаливанию (табл. 2). Синтанол ДС-10 является более гидрофобным, чем синтанол АЛМ-10, так как он содержит в своем составе гомологи с более длинными алкильными радикалами, и следовательно, имеет большую склонность к высаливанию, но в целом синтанолы высаливаются хуже оксифоса Б и синтамида-5, так как их растворы не имеют температуры помутнения. Таким образом, ряд ПАВ по увеличению способности к высаливанию следующий: синтанол АЛМ-10 < синтанол ДС-10 < оксифос Б < синтаמיד-5. Результаты проведенного теоретического анализа возможности использования систем соль магния – оксиэтилированное ПАВ – вода в экстракции, а также ссылки на работы, в которых опубликованы результаты изучения фазовых равновесий в системах, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Применимость систем соль магния – оксиэтилированное ПАВ – вода в экстракции

Высаливатель	ПАВ			
	Синтанол ДС-10	Синтанол АЛМ-10	Синтаמיד 5	Оксифос Б
MgSO ₄	I [22]	I [22]	I	I [23]
MgCl ₂	II [22]	II [22]	I [24]	II [24]
Mg(NO ₃) ₂	III [22]	III [22]	II	II
T _п (1% р-ра), °С	-	-	45±2	79,0±0,5

Все изученные системы имеют подобную топологию в системах, отвечающих группам II и III, область расслаивания имеет замкнутую

бинодальную кривую и расширяется с ростом температуры. Фазовые диаграммы системы группы I помимо областей ненасыщенных рас-

творов, расслаивания и кристаллизации кристаллогидратов солей магния характеризуются наличием области монотектического равновесия. Область расслаивания во всех системах, за исключением систем, содержащих в качестве высаливателя нитрат магния, расположена вблизи бинарной системы соль – вода.

На следующем этапе на основании полученных данных по фазовым равновесиям выбраны оптимальные температуры осуществления экстракции и исследовано распределение борной кислоты и тетрабората натрия в системах $MgCl_2$ – синтаид-5 – вода и $MgSO_4$ – синтанол ДС-10 – вода при $25^\circ C$, $MgCl_2$ – оксифос Б – вода при $60^\circ C$ и $MgCl_2$ – синтанол ДС-10 – вода при $75^\circ C$, что позволило определить влияние природы высаливателя и ПАВ на распределение борной кислоты.

Подробно рассмотрим закономерности экстракции соединений бора в системе $MgCl_2$ – оксифос Б – вода при $60^\circ C$. Кривые извлечения борной кислоты и хлорида магния (в зависимости от концентрации оксифоса Б в экстракционной системе) проходят через максимум, отвечающий содержанию оксифоса Б 160–180 г/л (рис. 1). При этом степень извлечения борной кислоты и хлорида магния практически не зависит от начальной концентрации хлорида магния в системе. На основании полученных данных вычислены коэффициенты разделения борной кислоты и хлорида магния, которые не превышают 0,2, следовательно, магний экстрагируется лучше, чем борная кислота. Наибольшие значения коэффициентов разделения отвечают минимальному содержанию хлорида магния и оксифоса Б, следовательно рост концентрации обоих макрокомпонентов

приводит к значительному снижению коэффициента разделения.

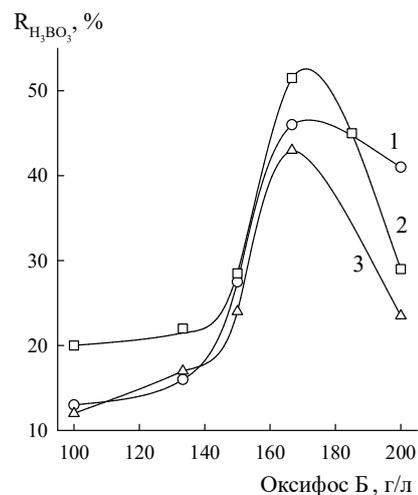


Рис. 1. Экстракция 10^{-2} моль/л борной кислоты в системе $MgCl_2$ – оксифос Б – вода в зависимости от концентрации оксифоса Б в экстракционной системе: 1 – 100,0, 2 – 133,3, 3 – 166,7 г/л $MgCl_2$ ($V_{\text{общ}} = 15$ мл)

Полученные данные позволили выбрать оптимальное соотношение компонентов для осуществления экстракции борной кислоты – 133,3 г/л $MgCl_2$ и 100,0 г/л оксифоса Б. Указанное соотношение позволяет при малом объеме экстракта и максимально возможном содержании воды в экстракционной системе получить приемлемый коэффициент разделения борной кислоты и хлорида магния.

На следующем этапе исследовано влияние начальной концентрации борной кислоты и тетрабората натрия на его извлечение в оптимальных условиях. Экстракция борной кислоты практически не зависит от ее исходной концентрации и остается на уровне 20–23 %. Построенная изотерма экстракции (рис. 2, 3) свидетельствует о том, что насыщение фазы ПАВ борной кислотой не достигается даже при выделении осадка борной кислоты в водной фазе.

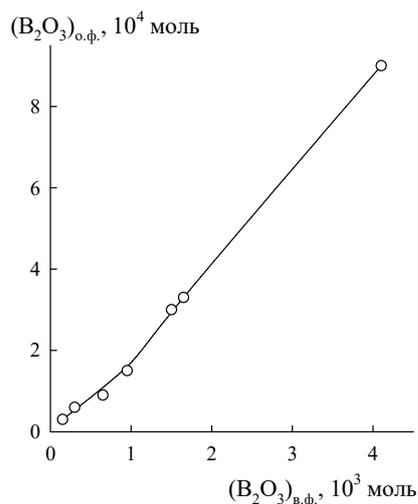


Рис. 2. Изотерма экстракции борной кислоты в оптимальных условиях ($MgCl_2 - 133,3 \text{ г/л}$, оксифос Б – $100,0 \text{ г/л}$, $V_{общ} = 15 \text{ мл}$)

Степень извлечения тетрабората натрия уменьшается с ростом его начальной концен-

трации, причем в большинстве случаев борная кислота экстрагируется лучше, чем тетраборат натрия (рис. 3). Эта закономерность связана с тем, что неионизированные молекулы борной кислоты экстрагируются легче мицеллами ПАВ, чем заряженные тетраборат-анионы.

Так как маточные растворы производства борной кислоты из магнийсодержащих минералов могут содержать остаточное количество серной или хлороводородной кислот, изучено их влияние на распределение борной кислоты. Установлено, что с увеличением кислотности среды происходит постепенное уменьшение объема экстракта и при концентрации более 4 моль/л серной кислоты система гомогенизируется.

Таблица 3

Экстракция борной кислоты и сильных кислот в совместном присутствии в системе $MgCl_2 - \text{оксифос Б} - \text{вода}$ ($MgCl_2 - 133,3 \text{ г/л}$, оксифос Б – $100,0 \text{ г/л}$, $H_3BO_3 - 10^{-2} \text{ моль/л}$, $V_{общ} = 15 \text{ мл}$)

$H_2SO_4, \text{ моль/л}$	$R(H^+), \%$	$R(H_3BO_3), \%$	$HCl, \text{ моль/л}$	$R(H^+), \%$	$R(H_3BO_3), \%$
0,000	-	20	0,000	0	20
0,012	70	18	0,025	52	11
0,025	53	11	0,050	50	0
0,500	13	0	1,000	21	0
1,000	13	0	2,000	17	0

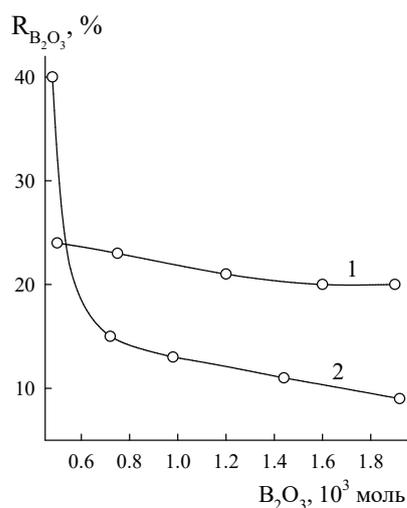


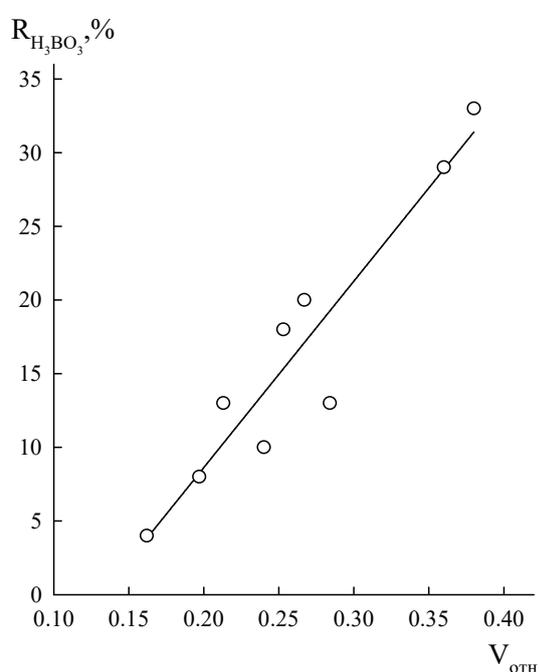
Рис. 3. Экстракция борной кислоты (1) и тетрабората натрия (2) в зависимости от начального содержания бора ($MgCl_2 - 133,3 \text{ г/л}$, оксифос Б – $100,0 \text{ г/л}$, $V_{общ} = 15 \text{ мл}$)

С ростом начальной концентрации сильных кислот их степень извлечения уменьшается, равно как и извлечение борной кислоты (табл. 3). Извлечение кислот происходит за счет частичного протонирования оксиэтиленовых фрагментов ПАВ, и последующего переноса анионов кислот. Подавление диссоциации слабой борной кислоты в присутствии значительного избытка ионов водорода приводит к появлению конкуренции между неионизированными молекулами борной кислоты и хлорид- или сульфат-ионами.

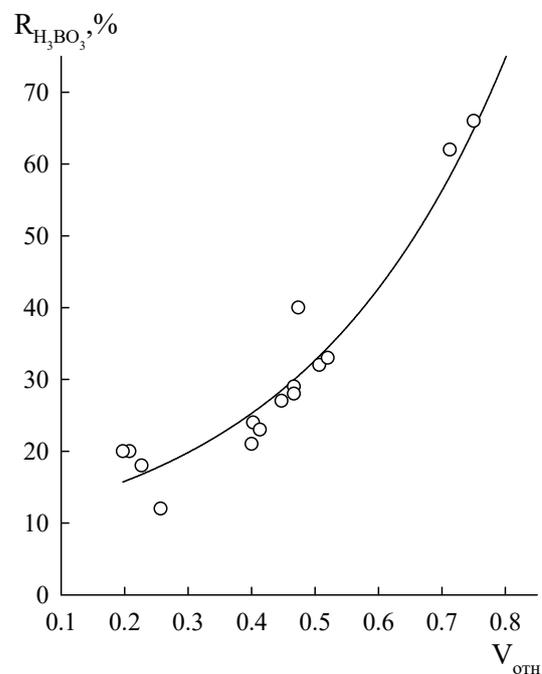
Аналогичные исследования проведены в остальных изученных системах. Эксперимен-

тально установлено, что во всех системах наблюдается корреляция между относительным объемом экстракта (отношением объема экстракта к общему объему системы) и степенью извлечения борной кислоты.

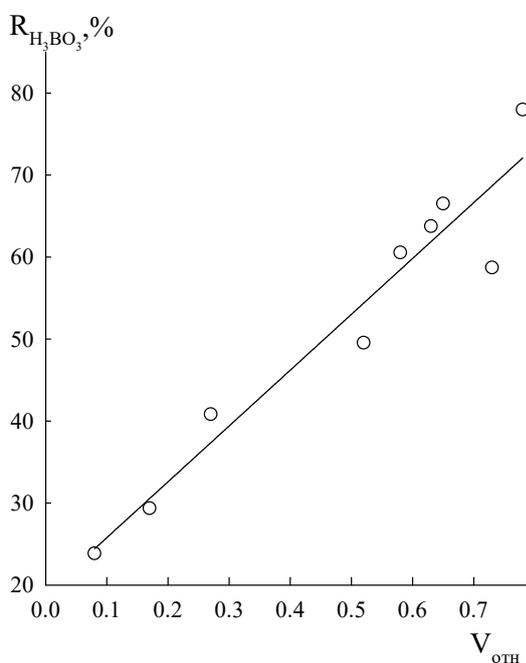
На рис. 4 представлены полученные корреляционные зависимости, полученные при проведении экстракции в широком концентрационном интервале исходных компонентов.



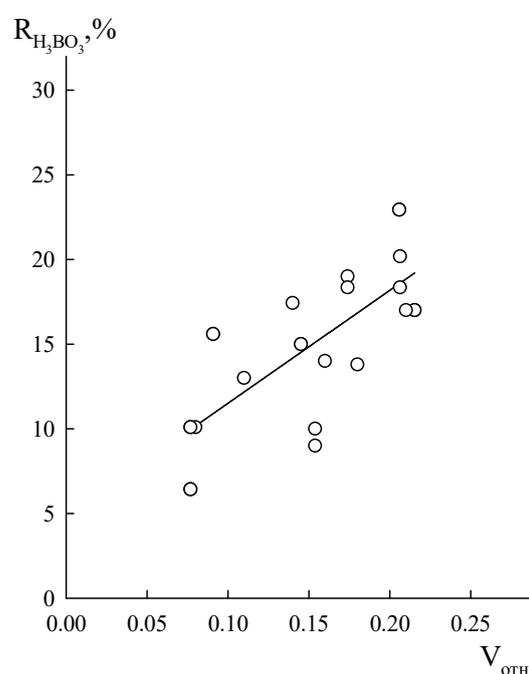
а



б



в



д

Рис. 4. Зависимость степени извлечения борной кислоты от относительного объема экстракта в системах $MgCl_2$ – синтамид-5 – вода (а), $MgCl_2$ – оксифос Б – вода (б), $MgCl_2$ – синтанол ДС-10 – вода (в), $MgSO_4$ – синтанол ДС-10 – вода (д)

На экстракцию борной кислоты в системах высаливатель – ПАВ – вода могут оказывать влияние три фактора: взаимодействия борная кислота – ПАВ, борная кислота – высаливатель, и содержание воды в экстракте. Известно, что экстракция борной кислоты спиртами сопровождается значительной соэкстракцией воды [2]. Увеличение объема экстракта, при прочих равных условиях, способствует увеличению количества воды в экстракте, что приводит к росту степени извлечения. Данный фактор связан напрямую с высаливающей способностью соли – чем выше ее высаливающая способность, тем ниже содержание воды в экстракте и меньше степень извлечения борной кислоты. При равном объеме фаз, степень извлечения борной кислоты в системе $MgCl_2$ – синтанол ДС-10 – вода выше, чем в системе $MgSO_4$ – синтанол ДС-10 – вода, что связано с различием в высаливающей способности сульфата и хлорида магния (рис. 4).

Соли магния способны высаливать также и борную кислоту из растворов. В соответствии с теорией О.Я. Самойлова [25], борная кислота высаливается катионами и всаливается анионами, поэтому степень извлечения ее в системе с $MgSO_4$ должна быть ниже, так как сульфат-анион обладает большим всаливающим действием по сравнению с хлорид-ионом. Описанные закономерности подтверждаются как в системах с ПАВ (рис. 5) так и в системах соль магния – спирт – вода [4, 5].

Исследование фазовых равновесий в системах борная кислота – оксиэтилированное ПАВ – вода показало отсутствие химического взаимодействия исследованных ПАВ и борной кислоты [26], поэтому во всех системах наблюдаются низкие степени ее извлечения.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что, несмотря на отсутствие специфического взаимодействия борной кислоты с исследуемыми ПАВ, возможно их использование для ее выделения из рассолов магнийсодержащих солей, при этом для повышения степени извлечения следует использовать многоступенчатую экстракцию или введение комплексообразующих реагентов, среди которых наибольший интерес представляют фенолы.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А20-120081990070-9).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

1. Позин М.Е. Технология минеральных солей. Л.: Госхимиздат, 1961. 1008 с.
2. Виноградов Е.Е., Азарова Л.А. Экстракция борной кислоты органическими растворителями // Журнал неорганической химии. 1967. Т. 13, № 6. С. 1624–1627.
3. Танашева М.Р., Беремжанов Б.А., Цыганкова И.И., Казымбетова М.С. Фазовое равновесие в системах H_3BO_3 – вода – спирты // Журнал неорганической химии. 1987. Т. 32, № 5. С. 992–995.
4. Виноградов Е.Е. Экстракция борной кислоты изоамиловым спиртом из магнийсодержащих водных растворов // Журнал неорганической химии. 1967. Т. 12, № 7. С. 1930–1936.
5. Боровик Г.Р. Экстракция бора из хлормagneвских растворов спиртами // Известия СО

- АН СССР. Серия химическая. 1966. № 3, вып. 1. С. 142–143.
6. Курсина М.М., Шварц Е.М. Распределение борной кислоты в системе полиэтиленгликоль-1500 – Na₂CO₃ – H₂O при 25°C // Известия АН Латвийской ССР. Серия химическая. 1988. № 5. С. 547–551.
7. Курсина М.М., Шварц Е.М. Взаимная растворимость и фазовые равновесия в системе MgSO₄ – полиэтиленгликоль-1000 – H₂O при 25°C и распределение борной кислоты в области расслоения // Известия АН Латвийской ССР. Серия химическая. 1988. № 6. С. 654–658.
8. Курсина М.М., Шварц Е.М. Растворимость и фазовые равновесия в системе FeSO₄ – полиэтиленгликоль-1500 – H₂O и FeSO₄ – H₃BO₃ – полиэтиленгликоль-1500 – H₂O при 25°C // Известия АН Латв. ССР. Серия химическая. 1990. № 2. С. 181–185.
9. Zohdi N., Mahdavi F., Abdullah L.C., Choong T.S. Removal of boron from aqueous solution using magnetic carbon nano-tube improved with tartaric acid // Journal of Environmental Health Sciences and Engineering. 2014. Vol. 12, № 3. P. 1–12.
10. Ozturk N., Kavak D. Boron Removal from Aqueous Solutions by Adsorption on Waste Sepiolite and Activated Waste Sepiolite Using Full Factorial Design // Adsorption. 2004. Vol. 10, № 3. P. 245–257.
11. Harada A., Takagi T., Kataoka S., Yamamoto T., Endo A. Boron adsorption mechanism on polyvinyl alcohol // Adsorption. 2011. Vol. 17, № 1. P. 171–178.
12. Demey H., Vincent T., Ruiz M., Sastre A.M., Guibal E. Development of a new chitosan/Ni(OH)₂-based sorbent for boron removal // Chemical Engineering Journal. 2014. Vol. 244. P. 576–586.
13. Zelmanov G., Semiat R. Boron removal from water and its recovery using iron (Fe³⁺) oxide / hydroxide-based nanoparticles (NanoFe) and NanoFe-impregnated granular activated carbon as adsorbent // Desalination. 2014. Vol. 333. P. 107–117.
14. Nishihama S., Sumiyoshi Y., Ookubo T., Yoshizuka K. Adsorption of boron using glucamine-based chelate adsorbents // Desalination. 2013. Vol. 310. P. 81–86.
15. Arya S.S., Kaimal A.M., Chib M., et al. Novel, energy efficient and green cloud point extraction: technology and applications in food processing // Journal of Food Science and Technology. 2019. Vol. 56, № 2. P. 524–534.
16. Noorashikin M.D.S., Sohaimi N.M., Suda N., et al. The application of cloud point extraction in environmental analysis // Journal of Sustainability Science and Management. 2017. Vol. 12. P. 79–95.
17. Yamini Y., Feizi N., Moradi M. Surfactant-Based Extraction Systems // Liquid-Phase Extraction / Poole C.F., editor. Elsevier, 2020. P. 209–239.
18. Немодрук А.А., Коралова З.А. Аналитическая химия бора. М.: Наука, 1964. 284 с.
19. Шванцербих Г., Флашка П. Комплексонометрическое титрование. М.: Химия, 1970. 360 с.
20. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Леснов А.Е. Закономерности высаливания анионного оксиэтилированного поверхностно-активного вещества калий бис(алкилполиоксиэтилен)фосфата неорганическими солями // Журнал неорганической химии. 2017. Т. 62, № 9. С. 1274–1280.

21. Станкова А.В., Елохов А.М., Кудряшова О.С. Высаливающая способность неорганических солей в растворах оксиэтилированных нонилфенолов // Журнал физической химии. 2018. Т. 92, № 7. С. 1145–1150.
22. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Леснов А.Е. Возможность использования систем соль магния – моноалкилполиэтиленгликоль – вода в мицеллярной экстракции // Журнал неорганической химии. 2016. Т. 61, № 2. С. 256–262.
23. Денисова С.А., Леснов А.Е., Кудряшова О.С., Некрасова В.В., Останина Н.Н., Бортник К.А. Применение расслаивающейся системы вода – оксифос Б – сульфат магния для экстракции органических красителей и их комплексов с ионами металлов // Вестник Пермского университета. Серия Химия. 2015. № 1 (17). С. 23–29.
24. Елохов А.М., Кудряшова О.С. Фазовые равновесия в системах вода – хлорид магния – ПАВ // Современные проблемы науки и образования. № 5. 2012. URL: <https://www.science-education.ru/article/view?id=7278> (дата обращения: 11.02.2021).
25. Виноградов Е.Е., Яшкичев В.И. Влияние взаимной ориентации молекул воды и неэлек-тролита на высаливание из водных растворов // Журнал структурной химии. 1966. Т. 7, № 1. С. 103–105.
26. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Леснов А.Е. Возможность использования поверхностно-активных веществ для экстракции борной кислоты // Журнал неорганической химии. 2015. Т. 60, № 5. С. 698–700.

References

1. Pozin, M.E. (1961), *Tekhnologiya mineral'nykh soley* [Mineral salt technology], Goskhimizdat, Leningrad. (In Russian).
2. Vinogradov, E.E. and Azarova, L.A. (1967), Ekstraktsiya bornoy kisloty organicheskimi rastvoritelyami [Extraction of boric acid with organic solvents], *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, vol. 13, no. 6, pp. 1624–1627. (In Russian).
3. Tanasheva, M.R., Beremzhanov, B.A., Tsygankova, I.I. and Kazymbetova, M.S. (1987), Fazovoye ravnovesiye v sistemakh H_3BO_3 – voda – spirty [Phase equilibrium in systems H_3BO_3 - water – alcohols], *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, vol. 32, no. 5, pp. 992–995. (In Russian).
4. Vinogradov, E.E. (1967), Ekstraktsiya bornoy kisloty izoamilovym spirtom iz magniysoderzhashchikh vodnykh rastvorov [Extraction of boric acid with isoamyl alcohol from magnesium-containing aqueous solutions], *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, vol. 12., no. 7, pp. 1930–1936. (In Russian).
5. Borovik, G.R. (1966), [Extraction of boron from chlorine-magnesium solutions with alcohols], *Izvestiya SO AN SSSR. Seriya khimicheskaya*, no. 3, is. 1, pp. 142–143. (In Russian).
6. Kursina, M.M. and Shwartz, E.M. (1988), Raspredeleniye bornoy kisloty v sisteme polietilenglikol-1500 – Na_2CO_3 – H_2O pri 25°C [Distribution of boric acid in the polyethylene glycol-1500 - Na_2CO_3 - H_2O system at 25°C], *Izvestiya AN Latvviyskoy SSR. Seriya khimicheskaya*, no. 5, pp. 547–551. (In Russian).
7. Kursina, M.M. and Shwartz, E.M. (1988), Vzaimnaya rastvorimost' i fazovyye ravnovesiya v sisteme $MgSO_4$ – polietileng-

- likol-1000 – H₂O pri 25°S i raspredeleniye bornoy kisloty v oblasti rassloyeniya [Mutual solubility and phase equilibria in the MgSO₄ - polyethylene glycol-1000 - H₂O system at 25°C and the distribution of boric acid in the stratification area], *Izvestiya AN Latvyskoy SSR. Seriya khimicheskaya*, no. 6, pp. 654–658. (In Russian).
8. Kursina, M.M. and Shwartz, E.M. (1990), [Solubility and phase equilibria in the system FeSO₄ - polyethylene glycol-1500 - H₂O and FeSO₄ – H₃BO₃ - polyethylene glycol-1500 – H₂O at 25°C, *Izvestiya AN Latvyskoy SSR. Seriya khimicheskaya*, no. 2, pp. 181–185. (In Russian).
 9. Zohdi, N., Mahdavi, F., Abdullah, L.C. and Choong, T.S. (2014), Removal of Boron from Aqueous Solution Using Magnetic Carbon Nano-tube Improved with Tartaric Acid, *Journal of Environmental Health Sciences and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 1–12.
 10. Ozturk, N. and Kavak, D. (2004), Boron Removal from Aqueous Solutions by Adsorption on Waste Sepiolite and Activated Waste Sepiolite Using Full Factorial Design, *Adsorption*, vol. 10, no 3, pp. 245–257.
 11. Harada, A., Takagi, T., Kataoka, S., Yamamoto, T. and Endo, A. (2011), Boron adsorption mechanism on polyvinyl alcohol, *Adsorption*, vol. 17, no 1, pp. 171–178.
 12. Demey, H., Vincent, T., Ruiz, M., Sastre, A.M. and Guibal, E. (2014), Development of a New Chitosan/Ni(OH)₂-based Sorbent for Boron Removal, *Chemical Engineering Journal*, vol. 244, pp. 576–586.
 13. Zelmanov, G. and Semiat, R. (2014), Boron removal from water and its recovery using iron (Fe³⁺) oxide / hydroxide-based nanoparticles (NanoFe) and NanoFe-impregnated granular activated carbon as adsorbent, *Desalination*, vol. 333, pp. 107–117.
 14. Nishihama, S., Sumiyoshi, Y., Ookubo, T. and Yoshizuka, K. (2013) Adsorption of boron using glucamine-based chelate adsorbents, *Desalination*, vol. 310, pp. 81–86.
 15. Arya, S.S., Kaimal, A.M., Chib, M., Sonawane, S.K. and Show, P.L. (2019), Novel, energy efficient and green cloud point extraction: technology and applications in food processing, *Journal of Food Science and Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 524–534.
 16. Noorashikin, M.D.S. Sohaimi, N.M., Suda, N., Aziz, H.Z., Zaini, S.R.M., Kandasamy, S. and Suresh, K. (2017), The application of cloud point extraction in environmental analysis, *Journal of Sustainability Science and Management*, vol. 12, pp. 79–95.
 17. Yamini, Y., Feizi, N. and Moradi, M. (2020), Surfactant-Based Extraction Systems, in: Poole, C.F. (ed.) *Liquid-Phase Extraction*, Elsevier, pp. 209–239.
 18. Nemodruk A.A. and Korolova Z.A. (1964), *Analiticheskaya khimiya bora* [Boron analytical chemistry], Nauka, Moscow. (In Russian).
 19. Schwanzerbach, G. and Flashka, P. (1970), *Kompleksonometricheskoye titrovaniye* [Complexometric titration], Khimiya, Moscow. (In Russian).
 20. Elokhov, A.M., Lesnov, A.E. and Kudryashova, O.S. (2017), Trends of Salting out of Oxyethylated Anionic Surfactant Potassium Bis(alkylpolyoxyethylene) phosphate with Inorganic Salts, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 62, no. 9, pp. 1267–1273.
 21. Stankova, A.V., Elokhov, A.M. and Kudryashova, O.S. (2018), Salting-out Ability

- of Inorganic Salts in Solutions of Ethoxylated Nonylphenols, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, vol. 92, no 7, pp. 1386–1391.
22. Elokhov, A.M., Kudryashova, O.S. and Lesnov, A.E. (2016), Potential of Magnesium Salt – Monoalkylpolyethylene Glycol – Water Systems for Use in Micellar Extraction, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 61, no. 2, pp. 243–249.
23. Denisova, S.A., Lesnov, A.E., Kudryashova, O.S., Nekrasova, V.V., Ostanina, N.N. and Bortnik, K.A. (2015), Primeneniye rasslaivayushcheyasya sistemy voda – oksifos B – sul'fat magniya dlya ekstraksii organicheskikh krasiteley i ikh kompleksov s ionami metallov [Application of the stratified system water - oxyphos B - magnesium sulfate for the extraction of organic dyes and their complexes with metal ions], *Bulletin of Perm University. Chemistry*, no. 1 (17), pp. 23–29. (In Russian).
24. Elokhov, A.M. and Kudryashova, O.S. (2012), Fazovyye ravnovesiya v sistemakh voda – khlorid magniya – PAV [Phase equilibria in systems water - magnesium chloride – surfactants], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, no. 5. Available from: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?Id=7278> [Accessed 11th February 2021]. (In Russian).
25. Vinogradov, E.E. and Yashkichev, V.I. (1966), Vliyaniye vzaimnoy orientatsii molekul vody i neelektrolita na vysalivaniye iz vodnykh rastvorov [Influence of mutual orientation of water and non-electrolyte molecules on salting out from aqueous solutions], *Journal of Structural Chemistry*, vol. 7, no. 1, pp. 103–105. (In Russian).
26. Elokhov, A.M., Lesnov, A.E. and Kudryashova, O.S. (2015), A Possibility of Surfactant Application for Boric Acid Extraction, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 60, no. 5, pp. 626–628.

Об авторе

Александр Михайлович Елохов,
кандидат химических наук,
доцент, кафедра неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности,
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
elhalex@yandex.ru

About the author

Aleksandr M. Elokhov,
Candidate of Chemical Science,
associate professor, Department of inorganic chemistry, chemical technology and technosphere safety,
Perm State University
614990, 15, Bukirevst., Perm, Russia
elhalex@yandex.ru

Информация для цитирования:

Елохов А.М. Закономерности распределения борной кислоты в системах на основе технических поверхностно-активных веществ и солей магния // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11, вып. 1. С. 59–70. DOI: 10.17072/2223-1838-2021-1-59-70.

Elokhov A.M. *Zakonomernosti raspredeleniia bornoi kisloty v sistemakh na osnove tekhnicheskikh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i solei magniia* [Regularities of boric acid distribution in systems based on technical surfactant and magnesium salts] // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of Perm University. Chemistry. 2021. Vol. 11. Issue 1. P. 59–70 (in Russ.). DOI:10.17072/2223-1838-2021-1-59-70.