

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.06:546.271:543.554.6

ИОНОСЕЛЕКТИВНЫЙ МЕМБРАННЫЙ ЭЛЕКТРОД
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКТАГИДРОТРИБОРТА-АНИОНА

© 2023 г. А. В. Копытин^а, Е. С. Турышев^{а, *}, М. Ш. Мадраимов^б, А. С. Кубасов^а,
К. Ю. Жижин^а, Л. К. Шпигун^а, Н. Т. Кузнецов^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

^бРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

*e-mail: tyrishev@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 27.09.2022 г.

Разработан ионоселективный электрод (ИСЭ) на основе пластифицированной поливинилхлоридной мембраны, химически допированной октагидротриборатом тетрадециламмония ($[(C_{10}H_{21})_4N^+][B_3H_8^-]$). Показано, что электрод обладает обратимым потенциометрическим откликом по отношению к октагидротриборат-анионам в присутствии ряда других неорганических анионов. Исследовано влияние концентрации электродно-активного вещества и природы пластификатора в фазе мембраны на электрохимические характеристики изготовленного сенсора. Найден оптимальный состав ионочувствительной мембраны. Установлено, что разработанный сенсор обеспечивает широкий диапазон определяемых концентраций $B_3H_8^-$ (1×10^{-7} – 1×10^{-2}) и низкий предел их обнаружения ($10^{-7.3}$ М). Новый ИСЭ может быть рекомендован для прямого потенциометрического детектирования свободных октагидротриборат-анионов в технологических водных растворах.

Ключевые слова: октагидротриборат-анион, полимерная мембрана, октагидротриборат тетрадециламмония

DOI: 10.31857/S0044457X22601432, **EDN:** GWLWQG

ВВЕДЕНИЕ

Бороводороды интенсивно изучаются на протяжении многих лет [1–5]. В семействе боргидридных соединений октагидротриборат-анион ($B_3H_8^-$) занимает промежуточное положение и представляет особый научно-практический интерес, поскольку широко используется для получения высших полиэдрических бороводородов, а также является ключевым интермедиатом при дегидрировании многих боргидридов [6–11]. Однако несмотря на то, что $B_3H_8^-$ достаточно хорошо исследован, его количественное определение в водных растворах изучено мало [12, 13]. Эффективным подходом к решению этой задачи представляется применение мембранного ионоселективного электрода (ИСЭ), обратимого к $B_3H_8^-$. Следует отметить, что в настоящее время ИСЭ на основе полимерных мембран, являясь важной разновидностью потенциометрических сенсоров, успешно применяются для экспрессного контроля содержания различных ионов в природных и

технологических растворах [14–17]. Это объясняется в первую очередь их замечательной доступностью с точки зрения простоты аппаратного оформления и низкой стоимости анализа, а также тем, что они практически не оказывают никакого воздействия на анализируемый раствор.

Цель работы – создание ИСЭ на основе октагидротрибората тетрадециламмония ($[(C_{10}H_{21})_4N^+][B_3H_8^-]$), введенного в пластифицированную поливинилхлоридную мембрану (**ПВХ-мембрана**), и изучение возможности его использования для потенциометрического определения активности (концентрации) свободных ионов $B_3H_8^-$ в водных растворах. Аналитический сигнал ИСЭ, регистрируемый в условиях, близких к нулевому току, и соответствующий измерению величины электродвижущей силы (э. д. с. = $\Delta E = E_{ИСЭ} - E_{ЭС}$) электрохимической системы, позволит обеспечить экспрессное детектирование $B_3H_8^-$ в широком концентрационном диапазоне и относительную простоту интерпретации полученных результатов.

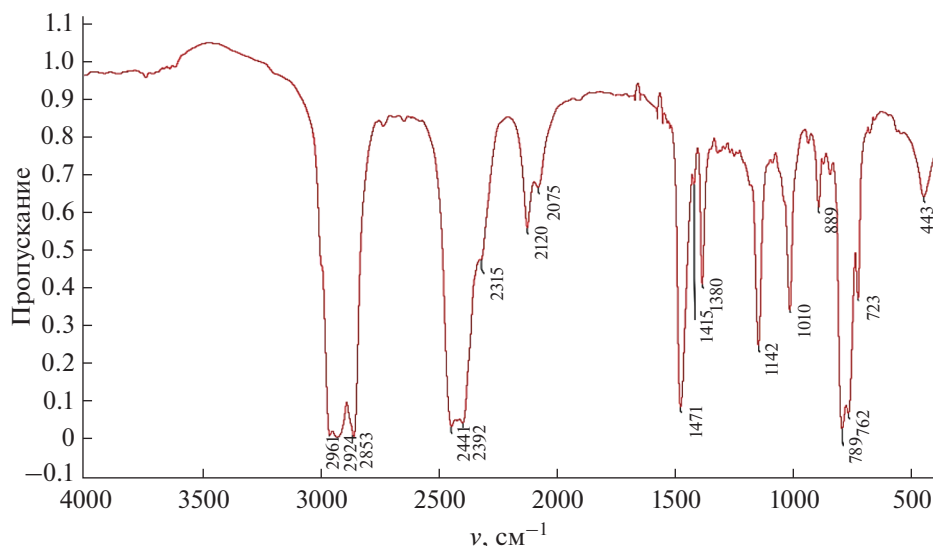
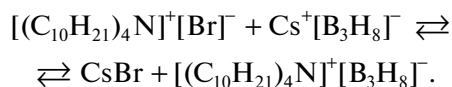


Рис. 1. ИК-спектр приготовленного образца октагидротрибората тетрадециламмония.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты и растворы. В качестве исходных использовали реактивы марки “ч. д. а.” или “х. ч.”: 2-нитрофенилоктиловый эфир (*о*-НФОЭ), дибутилфталат (ДБФ), *трис*(2-этилгексил)фосфат (ТЭГФ), *бис*(1-бутилпентил)адипат (ББПА), а также бромид тетрадециламмония, поливинилхлорид (ПВХ, high molecular weight, Selectophore, Fluka), хлористый метилен (CH_2Cl_2) и свежеперегнанный тетрагидрофуран (ТГФ). Соль октагидротрибората цезия $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$ была синтезирована и идентифицирована в лаборатории химии легких элементов и кластеров ИОНХ РАН [18, 19]. Исходный раствор $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$ (0.1 М) готовили путем растворения точной навески препарата $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$ (1.734 г) в 100 мл деионизированной воды. Остальные рабочие растворы ($(0.01-1) \times 10^{-8}$ М) были приготовлены путем последовательного разбавления исходного.

Получение электродно-активного вещества (ЭАВ). Октагидротриборат тетрадециламмония получали методом жидкостной ионообменной экстракции:



С этой целью 20 мл 0.01 М раствора бромид тетрадециламмония в CH_2Cl_2 смешивали с 25 мл 0.01 М водного раствора октагидротрибората цезия. Органическую фазу отделяли в делительной воронке и промывали 100 мл воды. Степень замещения бромид-ионов в исходной соли определяли, контролируя их содержание в водной фазе с помощью бромид-ИСЭ с твердой мембраной на

основе смеси сульфида и бромид серебра. После двухкратной экстракции регистрировали количественное замещение бромид-ионов анионами B_3H_8^- в органической фазе. Полученную органическую фазу переносили в чашку Петри. После удаления хлористого метилена при комнатной температуре получили порошок белого цвета — октагидротриборат тетрадециламмония $[(\text{C}_{10}\text{H}_{21})_4\text{N}][\text{B}_3\text{H}_8]$, который использовали в качестве ЭАВ. Химический состав порошка был подтвержден с помощью элементного химического анализа, методами ИК- и ^{11}B ЯМР-спектроскопии (рис. 1, 2).

Так, полосы поглощения при 1390 и 1470 cm^{-1} были отнесены к деформационным колебаниям C—H метильных и метиленовых групп, а интенсивная полоса поглощения при 720 cm^{-1} — к колебаниям углеродных цепей типа $[-\text{CH}_2-]_n$ при $n > 4$ (рис. 1). Полоса поглощения при 910 cm^{-1} характерна для аниона B_3H_8^- [19]. Регистрируемый в спектрах ^{11}B ЯМР мультиплет с химическим сдвигом $\delta = -29.0$ свидетельствует о наличии бора в октагидротриборат-анионе (рис. 2а).

Изготовление ИСЭ с пластифицированными ПВХ-мембранами. Для получения пластифицированных ПВХ-мембран использовали ранее разработанную методику [20]. Точную навеску ЭАВ сначала растворяли в пластификаторе, а затем смешивали с заранее приготовленным раствором ПВХ в ТГФ. Полученную смесь тщательно перемешивали и переносили в стеклянное кольцо с внутренним диаметром 28 мм, расположенное на гладкой стеклянной поверхности. Сверху кольцо накрывали 5 мм слоем фильтровальной бумаги,

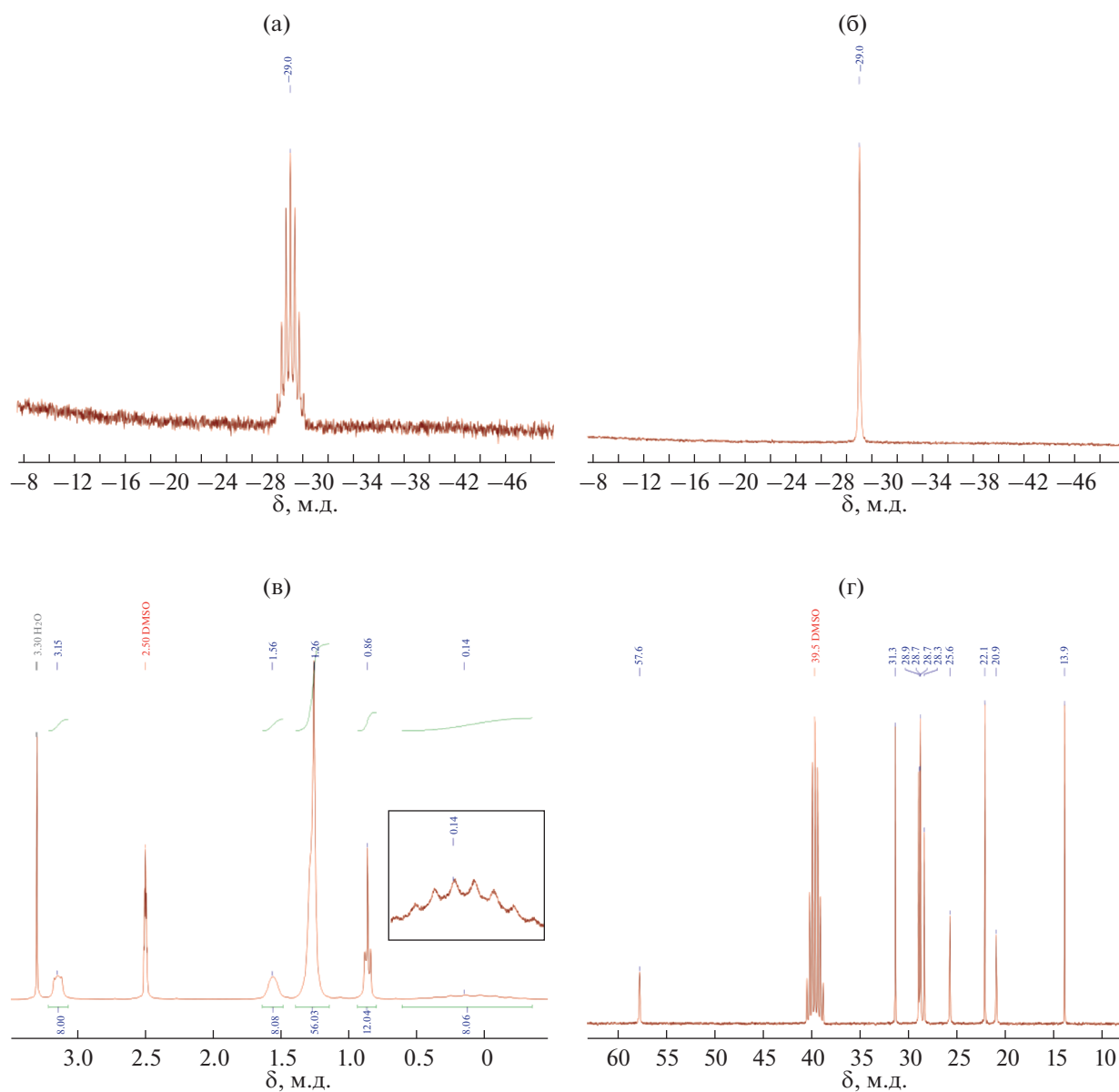


Рис. 2. ЯМР-спектры, характеризующие образец октагидротрибората тетрадециламмония: ^{11}B ЯМР (а), ^{11}B - $\{^1\text{H}\}$ ЯМР (б), ^1H ЯМР (в), ^{13}C ЯМР (г).

которую придавливали свинцовым грузом (для равномерного испарения ТГФ с поверхности). После испарения ТГФ в термостате при 32°C в течение 48 ч мембрану выдерживали под вакуумом в течение 60 мин. В итоге получали прозрачную полимерную пленку со средней толщиной ~ 0.3 мм. Далее из нее вырезали диски диаметром 9.5 мм, которые помещали в стандартный корпус

фирмы электрода Philips IS 561. Перед работой изготовленный сенсор выдерживали в 1×10^{-4} М растворе $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$ в течение 15–30 мин.

Методы анализа и аппаратура. Потенциометрические измерения проводили с помощью рН-ионоанализатора Radelkis OP-300, используя гальваническую цепь следующего вида:

Ag/AgCl	3 М KCl, AgCl _{насыщ}	Исследуемый раствор	Мембрана	Внутренний раствор сравнения	AgCl/Ag
---------	-----------------------------------	------------------------	----------	---------------------------------	---------

Таблица 1. Зависимость потенциометрических характеристик ИСЭ, полученных в растворах Cs[B₃H₈], от концентрационного содержания ЭАВ в фазе мембраны

Состав мембраны, мас. %			$c_{\text{мин}}, \text{М}$	$s,$ мВ/декада	Линейный концентрационный диапазон отклика, М	Дрейф потенциала, мВ/ч
ЭАВ	ПВХ	ДБФ				
0.5	29.0	70.5	$\sim 9 \times 10^{-8}$	59.0	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$	$\pm 2 - 4$
0.8	29.0	70.2	5×10^{-8}	57.9	$8 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-2}$	± 0.2
1.0	29.0	70.0	3×10^{-7}	55.4	$5 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$	± 0.1

В качестве внутреннего раствора сравнения использовали 1×10^{-3} М раствор перхлората калия, выбранный с учетом достаточно низкой энергии гидратации перхлорат-аниона. Внешним электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод Radelkis OP-0820. Электродную функцию регистрировали в диапазоне $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-1}$ М с использованием свежеприготовленных растворов Cs[B₃H₈], начиная с растворов с меньшей концентрацией аниона. Электродный потенциал фиксировали как среднеарифметическое трех значений, различающихся не более чем на 0.5 мВ. Исследуемые растворы перемешивали при помощи магнитной мешалки. Температура в процессе измерений составляла 25 ± 1 °С.

Элементный анализ ЭАВ на содержание углерода и водорода выполняли на автоматическом газоанализаторе CHNS_3 FA 1108 Elemental Analyser (Carlo Erba). ИК-спектры получали на ИК-Фурье-спектрометре ИНФРАЛЮМ ФТ-02 в диапазоне $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$. Образцы готовили диспергированием исследуемого вещества в вазелиновом или фторированном масле Fluorolube. Спектры ЯМР ¹H, ¹¹B, ¹³C растворов [(C₁₀H₂₁)₄N][B₃H₈] в DMSO-d₆ записывали на импульсном Фурье-спектрометре Bruker MSL-300 (ФРГ) на частотах 300.3, 96.32 и 75.49 МГц соответственно с внутренней стабилизацией по дейтерию. В качестве внешних стандартов использовали тетраметилсилан и эфират трехфтористого бора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования прошлых лет показали, что перспективным путем создания мембранных ИСЭ с анионной функцией является использование электродно-активных веществ с предсказуемыми ионообменными свойствами. Для определения активности (концентрации) неорганических анионов в жидких средах наибольшее распространение получили электроды на основе мембран, допированных ЭАВ с заряженными активными центрами (ионные ассоциаты с крупными органическими катионами, способные в той или иной степени диссоциировать в фазе мембраны) [21–23]. В частности, ионные ассоциаты высших чет-

вертичных аммониевых оснований с различной стерической доступностью обменного центра хорошо зарекомендовали себя в качестве ЭАВ в анион-селективных электродах [24–26]. В связи с этим нами был изготовлен ИСЭ с ПВХ-мембраной, содержащей ассоциат октагидротриборат-аниона с тетрадециламмонием [(C₁₀H₂₁)₄N][B₃H₈], и изучено его поведение в водных растворах соли Cs[B₃H₈].

Классическая полимерная мембрана ИСЭ представляет собой трехкомпонентную композицию: ЭАВ–пластификатор–полимерная матрица, свойства которой в значительной степени зависят от природы и соотношения мембранообразующих компонентов. При этом электроаналитические параметры сенсоров на основе ионных ассоциатов существенно зависят как от содержания ЭАВ, так и от природы пластификатора в фазе мембраны. Селективность потенциометрического отклика таких сенсоров, как правило, определяется энергией гидратации (сольватации) определяемого аниона и специфичностью его взаимодействия с центром связывания [27]. Поэтому основное внимание при разработке нового ИСЭ нами было уделено вопросу оптимизации состава ионочувствительной ПВХ-мембраны.

Выбор концентрации ЭАВ. В результате изучения зависимости потенциометрического отклика изготовленных ИСЭ на основе ПВХ-мембраны, пластифицированной ДБФ и содержащей разные количества [(C₁₀H₂₁)₄N][B₃H₈], было установлено, что сенсор, содержащий в фазе мембраны 0.8 мас. % ЭАВ, показывает наилучшие результаты по отношению к иону V₃H₈⁻ (табл. 1).

При увеличении содержания ЭАВ в полимерной композиции наблюдали ухудшение нижнего предела обнаружения ($c_{\text{мин}}$) октагидротриборат-аниона в растворе, что можно объяснить ростом активности потенциалопределяющего аниона в поверхностном мембранном слое относительно водного раствора. При уменьшении содержания ЭАВ в полимерной композиции наблюдали нестабильность регистрируемого потенциала. Последнее, вероятно, связано с уменьшением ионообменных центров в фазе мембраны.

Зависимость отклика электрода от природы пластификатора. Другим важным параметром, который следует учитывать для достижения наилучших характеристик ионочувствительных сенсоров, является природа пластификатора, используемого в составе мембраны. Пластификатор, составляющий, как правило, >60% массового состава мембраны, служит растворителем мембранообразующих соединений, определяет степень ассоциации образующихся ионных пар и обеспечивает ее диэлектрические и механические свойства [28–30]. В качестве пластификаторов нами были изучены ДБФ, *o*-НФОЭ, ББПА и ТЭГФ, различающиеся природой активных групп, длиной радикала и величинами диэлектрической проницаемости. При сравнении использовали соотношение мембранных компонентов, соответствующих следующему составу мембранной фазы (мас. %): ЭАВ – 0,8, пластификатор – 70,2, ПВХ – 29,0. Результаты, полученные при изучении влияния природы пластификатора на потенциометрический отклик по отношению к ионам $V_3H_8^-$, представлены на рис. 3 и суммированы в табл. 2.

Согласно полученным экспериментальным данным, все изготовленные сенсоры показали практически одинаковый диапазон линейности электродной функции. Однако угловой коэффициент (крутизна S) и диапазон выполнения электродной функции в области разбавленных растворов $Cs[V_3H_8]$ оказались зависимыми от природы пластификатора. Наилучшие результаты с точки зрения крутизны электродной функции продемонстрировали сенсоры, содержащие ДБФ ($\epsilon_\gamma = 6.4$) и ББПА ($\epsilon_\gamma = 5.3$). Напротив, сенсоры, изготовленные с использованием более полярных пластификаторов, таких как ТЭГФ ($\epsilon_\gamma = 9.9$) и *o*-НФОЭ ($\epsilon_\gamma = 21.0$), показали субнернстовский наклон. Наименьшее значение нижнего предела обнаружения $V_3H_8^-$ было установлено для ИСЭ на основе ДБФ, наибольшее – на основе *o*-НФОЭ. Очевидно, что при замене пластификатора про-

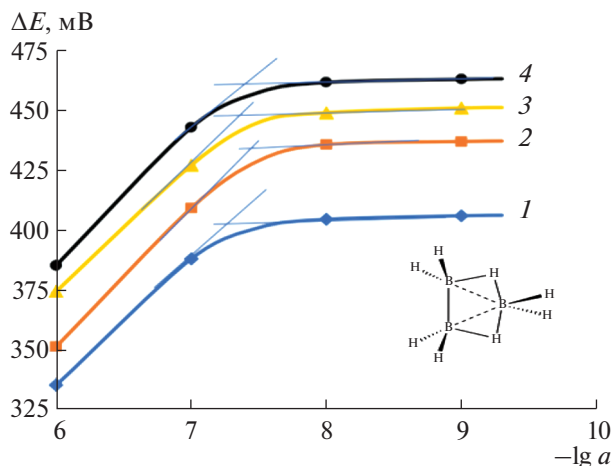


Рис. 3. Электродные функции ИСЭ на основе ПВХ-мембран, содержащих $[(C_{10}H_{21})_4N]^+[V_3H_8]^-$ и различные пластификаторы, в разбавленных растворах $Cs[V_3H_8]$. Пластификаторы: 1 – *o*-НФОЭ; 2 – ДБФ; 3 – ТЭГФ; 4 – ББПА.

исходит изменение степени ассоциации ионной пары $[(C_{10}H_{21})_4N]^+[V_3H_8]^-$ в мембранной фазе и активности (свободной концентрации) ионов $V_3H_8^-$ на границе раздела фаз мембрана/раствор.

На рис. 4 представлена диаграмма, характеризующая коэффициенты потенциометрической селективности, рассчитанные для изученных мембранных систем с наилучшими электродными характеристиками методом смешанных растворов [31]. Видно, что исследуемые электроды проявляют избирательность по отношению к $V_3H_8^-$. При этом порядок изменения $\lg K_{i,j}^{pot}$ соответствует известной шкале экстрагируемости неорганических анионов четвертичными аммониевыми основаниями, начиная с липофильного ClO_4^- и заканчивая гидрофильным SO_4^{2-} [32].

Зависимость потенциометрического отклика от pH исследуемого водного раствора. Для оценки ра-

Таблица 2. Характеристики потенциометрического отклика изученных ИСЭ в зависимости от природы пластификатора в фазе мембраны

Пластификатор	Уравнение регрессии	Диапазон линейности, М	$c_{мин}, М$
ДБФ	$\Delta E = 57.92 \lg a + 4.79$ ($R^2 = 0.9997$)	$1 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-8}$	$10^{-7.3}$
ББПА	$\Delta E = 58.81 \lg a + 33.04$ ($R^2 = 0.9999$)	$1 \times 10^{-2} - 9 \times 10^{-8}$	$10^{-7.2}$
<i>o</i> -НФОЭ	$\Delta E = 52.54 \lg a + 21.12$ ($R^2 = 0.9983$)	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-7}$	$10^{-7.0}$
ТЭГФ	$\Delta E = 54.19 \lg a + 49.43$ ($R^2 = 0.9992$)	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-7}$	$10^{-7.1}$

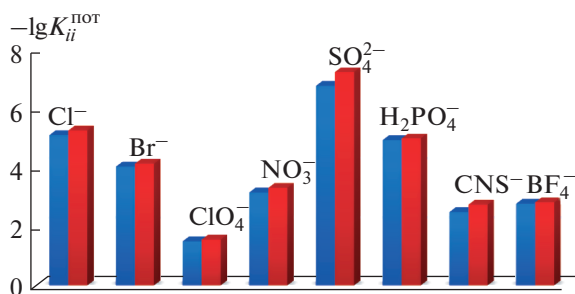


Рис. 4. Коэффициенты потенциометрической селективности ИСЭ на основе ПВХ-мембран, пластифицированных ДБФ (синий) и ББПА (красный).

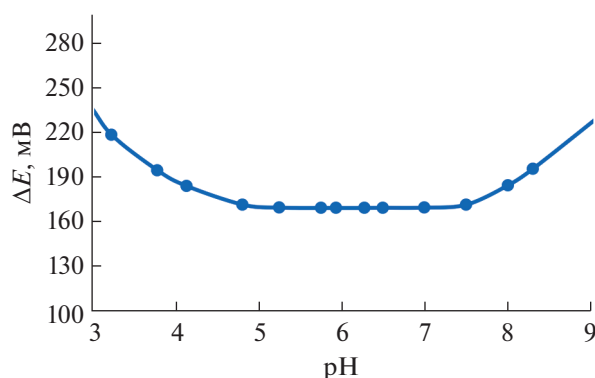


Рис. 5. Зависимость потенциометрического отклика ИСЭ с мембраной на основе ДБФ от pH водного раствора, содержащего 1×10^{-3} М Cs[B₃H₈].

бочего pH-диапазона изготовленного сенсора с оптимальным составом мембраны, пластифицированной ДБФ, была получена зависимость электродного потенциала в 1×10^{-3} М растворах Cs[B₃H₈] в интервале pH от 2 до 9. Из рис. 5 видно, что потенциометрический отклик сенсора практически не зависит от pH исследуемого раствора при pH 4.8–7.5.

Это подтверждает известные данные о том, что водные растворы солей октагидротриборатионов обладают достаточно высокой стабильностью [33]. Однако при $4.5 \leq \text{pH} \leq 7.8$ наблюдается некоторый рост электродного потенциала, свидетельствующий об уменьшении свободной концентрации B₃H₈⁻ в щелочной и кислой среде.

На основании полученных данных можно заключить, что разработанный ИСЭ с пластифицированной ПВХ-мембраной, содержащей [(C₁₀H₂₁)₄N][B₃H₈] в качестве ЭАВ, характеризуется высокой чувствительностью и селективностью по отношению к B₃H₈⁻ в присутствии ряда неорганических анионов в широком интервале pH водного раствора. Разработанный электрод

может быть рекомендован для экспресс-анализа технологических водных растворов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводили с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН и Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках проекта МК-207.2022.1.3.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stock A. The Hydrides of Boron and Silicon. Cornell University Press, 1933.
2. Bykov A. Y., Zhizhin K. Y., Kuznetsov N. T. // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. V. 59. № 13. P. 1539. <https://doi.org/10.1134/S0036023614130026>
3. Hagemann H. // Molecules. 2021. V. 26. № 24. P. 7425. <https://doi.org/10.3390/molecules26247425>
4. Kubasov A. S., Novikov I. V., Starodubets P. A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 7. P. 984. <https://doi.org/10.1134/S0036023622070130>
5. Avdeeva V. V., Kubasov A. S., Korolenko S. E. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 5. P. 628. <https://doi.org/10.1134/S0036023622050023>
6. Tumor L. B. // Журн. неорганической химии. 2003. V. 48. № 10. P. 1613.
7. Goedde D. M., Windler G. K., Girolami G. S. // Inorg. Chem. 2007. V. 46. № 7. P. 2814. <https://doi.org/10.1021/ic0621300>
8. Pylypko S., Zadick A., Chatenet M. et al. // J. Power Sources. 2015. V. 286. P. 10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.143>
9. Fu H., Wang X., Shao Y. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. № 1. P. 384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.081>
10. Moury R., Gigante A., Remhof A. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. № 35. P. 12168. <https://doi.org/10.1039/D0DT02170A>
11. Gigante A., Leick N., Lipton A. S. et al. // ACS Appl. Energy Mater. 2021. V. 4. № 4. P. 3737. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00159>
12. Суворцев Е. Л., Хаин Е. С., Шевченко Ю. Н. // Журн. аналит. химии. 1980. V. 35. № 7. P. 1439.
13. Копытин А. В., Жижин К. Ю., Быков А. Ю. Мембрана ионоселективного электрода для определения октагидротриборатного аниона. Пат. RU2621888C1, 2017.
14. Buck R. P. // Theory and principles of membrane electrodes. Ion-Selective Electrodes Anal. Chem. 1978. P. 1

15. Bakker E., Pretsch E. // *Angew. Chem.Int. Ed.* 2007. V. 46. № 30. P. 5660.
<https://doi.org/10.1002/anie.200605068>
16. Zdrachek E., Bakker E. // *Anal. Chem.* 2019. V. 91. № 1. P. 2.
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b04681>
17. Craggs A., Moody D.J., Thomas J.D.R. // *J. Chem. Educ.* 1974. V. 51. № 8. P. 541.
18. Bykov A.Y., Razgonyaeva G.A., Mal'tseva N.N. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2012. V. 57. № 4. P. 471.
<https://doi.org/10.1134/S0036023612040055>
19. Bykov A.Y., Mal'tseva N.N., Generalova N.B. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2013. V. 58. № 11. P. 1321.
<https://doi.org/10.1134/S003602361311003X>
20. Turyshev E.S., Kopytin A.V., Zhizhin K.Y. et al. // *Talanta.* 2022. V. 241. P. 123239.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123239>
21. Coetzee C.J., Freiser H. // *Chem.* 1969. V. 41. № 8. P. 1128.
22. Kopytin A.V., Zhizhin K.Y., Urusov Y.I. et al. // *J. Anal. Chem.* 2011. V. 66. № 7. P. 666.
<https://doi.org/10.1134/S1061934811070070>
23. Kopytin A.V., Zhizhin K.Y., Urusov Y.I. et al. // *J. Anal. Chem.* 2012. V. 67. № 2. P. 168.
<https://doi.org/10.1134/S1061934812020074>
24. Wegmann D., Weiss H., Ammann D. et al. // *Mikrochim. Acta.* 1984. V. 84. № 1–2. P. 1.
<https://doi.org/10.1007/BF01204153>
25. Матвейчук Ю.В., Рахманько Е.М., Окаев Е.Б. Ионоселективные электроды на основе высших четвертичных аммониевых солей, обратимые к двухзарядным неорганическим анионам. Минск, 2018.
26. Matveichuk Y.V. // *Anal. Chem. Lett.* 2018. V. 8. № 4. P. 428.
27. Schaller U., Bakker E., Pretsch E. // *Anal. Chem.* 1995. V. 67. № 18. P. 3123.
<https://doi.org/10.1021/ac00114a005>
28. Бережковская О.М., Макарова Е.Д., Матерова Е.А. // *Вестн. ЛГУ.* 1986. № 4. P. 65.
29. Смирнова А.Л., Грекович А.Л., Матерова Е.А. // *Электрохимия.* 1987. V. 10. P. 1187.
30. Kopytin A.V., German K.E., Zhizhin K.Y. et al. // *Sens. Actuators, B: Chem.* 2020. V. 310. P. 127853.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127853>
31. Buck R.P., Lindner E. // *Pure Appl. Chem.* 1994. V. 66. № 12. P. 2527.
<https://doi.org/10.1351/pac199466122527>
32. Szigeti Z., Vigassy T., Bakker E. et al. // *Electroanalysis.* 2006. V. 18. № 13–14. P. 1254.
<https://doi.org/10.1002/elan.200603539>
33. Huang Z., Chen X., Yisgedu T. et al. // *Inorg. Chem.* 2011. V. 50. № 8. P. 3738.
<https://doi.org/10.1021/ic2000987>