

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
РАСТВОРОВ

УДК 544.6.018.462

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ПЕРХЛОРАТА
НАТРИЯ В СУЛЬФОЛАНЕ

© 2021 г. Л. В. Шеина^{а,*}, Е. В. Карасева^{а,**}, В. С. Колосницын^а

^а Российская академия наук, Уфимский федеральный исследовательский центр,
Уфимский Институт химии, Уфа, Россия

*e-mail: sheina.l.v@gmail.com

**e-mail: karaseva@anrb.ru

Поступила в редакцию 16.06.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

Оценена растворимость и изучены физико-химические свойства (электропроводность, вязкость и относительная плотность) растворов перхлората натрия в сульфолане в широком концентрационном и температурном диапазонах. Установлено, что растворимость NaClO_4 в сульфолане (0.53 моль/л) значительно ниже растворимости LiClO_4 (2.77 моль/л). Удельные электропроводности растворов перхлоратов натрия и лития равных концентраций в сульфолане сопоставимы, а вязкость растворов перхлората натрия выше, чем растворов перхлората лития. Показано, что коррелированная электропроводность растворов перхлората натрия в сульфолане выше, чем растворов перхлората лития, что указывает на более высокую степень электролитической диссоциации перхлората натрия. Сделан вывод, что энергии активации электропроводности и вязкого течения сульфолановых растворов перхлората натрия выше, чем перхлората лития, что обусловлено большим размером сольватированных ионов Na^+ , по сравнению с сольватированными ионами Li^+ . Анодная устойчивость раствора перхлората натрия в сульфолане составляет 5.45 В отн. Na/Na^+ электрода сравнения, что на 0.2–0.5 В превышает анодную устойчивость растворов перхлората натрия в органических карбонатах.

Ключевые слова: сульфолан, перхлорат натрия, электролитные растворы, натриевые аккумуляторы

DOI: 10.31857/S0044453721050241

Преимуществом литий-ионных и литий-серных аккумуляторов являются высокие удельные энергия и мощность, недостатком — высокая цена [1, 2]. Высокая стоимость литиевых аккумуляторов во многом объясняется растущим спросом на литий и ограниченностью запасов литийсодержащего сырья. Содержание натрия в недрах планеты на три порядка превосходит содержание лития, цены на натрий существенно ниже цен на литий, и поэтому натрий-ионные и натрий-серные аккумуляторы рассматриваются как перспективные направления развития “пост-литиевых” технологий хранения энергии.

Натрий-ионные и натриевые аккумуляторы уступают литий-ионным и литиевым аналогам по удельной энергии, поскольку удельная электрохимическая емкость и стандартный электродный потенциал металлического натрия ($Q_{\text{Na}} = 1166$ (мА·ч)/г, $E(\text{Na}^+/\text{Na}) = -2.71$ В) меньше удельной емкости и стандартного электродного потенциала лития ($Q_{\text{Li}} = 3860$ мА·ч/г, $E(\text{Li}^+/\text{Li}) = -3.05$ В). Имея неоспоримое преимущество по

экономическим показателям, натрий-ионные аккумуляторы несомненно будут востребованы в областях, где не так важны энергетические характеристики, а решающим фактором является стоимость источника энергии, например, в стационарных системах хранения энергии [1–4].

Важной задачей разработки натрий-ионных и натрий-серных аккумуляторов является создание стабильных электролитов. Согласно библиографическому анализу, проведенному Vignagooban К. с соавт. [5], за последние 25 лет наблюдается рост исследований по электролитам для натриевых и натрий-ионных аккумуляторов. Наиболее изученными жидкими электролитными системами являются электролитные растворы на основе органических карбонатов, их смесей, а также смесей с некоторыми эфирами (глимами, тетрагидрофураном) [5–7]. В качестве электролитных солей исследуются такие соли натрия, как перхлорат (NaClO_4), тетрафторборат (NaBF_4), трифторметансульфонат (NaSO_3CF_3), гексафторфосфат

(NaPF_6) и бис(трифторметансульфонил)имид ($\text{NaN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$).

Сульфоны, благодаря высокой электрохимической устойчивости, давно признаны перспективными электролитными растворителями и соразтворителями для электролитов высоковольтных литиевых и литий-ионных аккумуляторов [8, 9]. Еще более перспективно применение электролитных растворов на основе сульфонов в натриевых аккумуляторах, поскольку более низкий электродный потенциал натрия может быть компенсирован применением в положительных электродах высокопотенциальных электродных материалов. Однако свойства растворов солей натрия в сульфонах практически не изучены. Наиболее ранние публикации [10, 11] посвящены изучению электропроводности сильно разбавленных растворов перхлората натрия в водно-сульфоляновых смесях при 30 и 35°C. В последнее десятилетие появились работы, в которых сульфолян предлагается в качестве соразтворителя в электролитных системах на основе карбонатов [12], в смесях с ионными жидкостями [13] и в полимерных электролитах [14] с целью повышения термической устойчивости электролитов и пожаробезопасности натрий-ионных аккумуляторов в целом.

Целью данной работы являлись оценка растворимости и изучение физико-химических свойств растворов перхлората натрия в сульфоляне в широком концентрационном и температурном диапазонах и сравнение со свойствами растворов перхлората лития в сульфоляне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Тетраметиленсульфон (сульфолян) (99%, Sigma-Aldrich) осушали двойной вакуумной перегонкой. Перхлорат натрия получали реакцией нейтрализации гидроокиси натрия (“х.ч.”, ГОСТ 4328-77) хлорной кислотой (“х.ч.”, ТУ 6-09-2878-84). Соль очищали перекристаллизацией из водного раствора и осушали в вакууме при температуре 100°C в присутствии цеолитов (4 Å). Содержание воды в соли контролировали методом ИК-спектроскопии по интенсивности полосы поглощения в области 3450–3620 см^{-1} , соответствующей валентным симметричным колебаниям гидроксильной группы. Спектры поглощения твердой соли снимали в таблетках с мелкокристаллическим бромидом калия (KBr) на ИК-спектрометре Shimadzu IR Prestige 21. Использовали бромид калия марки FT-IR grade, $\geq 99\%$ (Sigma Aldrich), который дополнительно прокачивали при 600°C и снимали его спектр. В спектре прокаленного KBr полосы валентных колебаний гидроксильных групп отсутствовали. Для исключения адсорбции атмосферной влаги в мелкокристаллический бромид калия подготовку образцов (взятие навески

NaClO_4 , перетирание с KBr в агатовой ступке, загрузку образца в пресс-форму и прессование таблеток) проводили в перчаточном боксе в атмосфере осушенного воздуха. Система осушки атмосферы внутри перчаточного бокса позволяет поддерживать влажность на уровне 10–20 ppm.

Приготовление электролитных растворов осуществляли объемно-весовым методом в перчаточном боксе в атмосфере осушенного воздуха (содержание H_2O 10–20 ppm). Содержание влаги в электролитных растворах устанавливали методом кулонометрического титрования в среде реактива Фишера с использованием автоматического титратора Titroline®7500 KF trace (SI Analytics). Содержание воды в 0.53 М растворе NaClO_4 в сульфоляне по результатам кулонометрического титрования составляло 45 ± 4 ppm.

Удельную электропроводность электролитных растворов определяли в кондуктометрических ячейках с платиновыми черненными электродами, откалиброванных по стандартным растворам KCl [15]. Для измерения относительной плотности и кинематической вязкости использовали стеклянные пикнометры и вискозиметры Убеллоде [16], модернизированные для работы с безводными растворами.

Электрохимическую устойчивость растворов перхлоратов натрия и лития в сульфоляне определяли методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) в трехэлектродной стеклянной ячейке с платиновым рабочим электродом ($S = 0.092 \text{ см}^2$) относительно Na/Na^+ (для раствора NaClO_4 в сульфоляне) и относительно Li/Li^+ (для раствора LiClO_4 в сульфоляне) в диапазоне потенциалов –100–6000 мВ при комнатной температуре ($22 \pm 1^\circ\text{C}$). Скорость развертки потенциала варьировалась от 2 до 100 мВ/с.

Растворимость перхлората натрия в сульфоляне при $25 \pm 1^\circ\text{C}$ оценивали методом последовательного растворения навесок и разбавления насыщенного раствора соли до исчезновения донной фазы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Растворимость перхлората натрия в сульфоляне при $25 \pm 1^\circ\text{C}$, оцененная методами растворения навески соли и последовательного разбавления насыщенного раствора, составила около 0.43 моль/кг, что соответствует 0.53 моль/л. Это значение значительно ниже, чем растворимость перхлората лития в сульфоляне (2.77 моль/л [17]).

Физико-химические свойства растворов NaClO_4 в сульфоляне, изученные в температурном диапазоне 30–60°C, суммированы в табл. 1 и 2.

Удельные электропроводности растворов перхлоратов натрия и лития в сульфоляне практиче-

Таблица 1. Удельная электропроводность растворов перхлората натрия в сульфолане

C_{NaClO_4} , моль/л	$\chi \times 10^3$, Ом ⁻¹ см ⁻¹				
	293.15 К	303.15 К	313.15 К	323.15 К	333.15 К
0.014	0.042	0.115	0.145	0.178	0.214
0.034	0.129	0.260	0.329	0.404	0.486
0.270	1.042	1.352	1.710	2.109	2.575
0.532	1.410	1.868	2.410	3.020	3.497

Таблица 2. Динамическая вязкость и относительная плотность растворов перхлората натрия в сульфолане

C_{NaClO_4} , моль/л	$\eta \times 10^3$, Па с				ρ , г/см ³			
	303.15 К	313.15 К	323.15 К	333.15 К	303.15 К	313.15 К	323.15 К	333.15 К
0.014	—	—	—	—	1.2734	1.2658	1.2550	1.2465
0.034	—	—	—	—	1.2748	1.2666	1.2572	1.2482
0.068	11.06	8.46	6.61	5.25	1.2764	1.2681	1.2583	1.2508
0.135	11.89	9.10	7.19	5.71	1.2797	1.2717	1.2629	1.2542
0.270	13.93	10.53	8.28	6.46	1.2892	1.2818	1.2729	1.2647
0.532	18.87	13.96	10.59	8.05	1.3080	1.2983	1.2908	1.2803

Таблица 3. Энергии активации электропроводности ($E_{\text{акт}}(\chi)$) и вязкого течения ($E_{\text{акт}}(\eta)$) растворов перхлоратов натрия и лития [15] в сульфолане (303.15–333.15 К)

C_{NaClO_4} , моль/л	$E_{\text{акт}} \pm 0.1$ кДж моль ⁻¹		C_{LiClO_4} , моль/л	$E_{\text{акт}} \pm 0.1$ кДж моль ⁻¹	
	$E_{\text{акт}}(\chi)$	$E_{\text{акт}}(\eta)$		$E_{\text{акт}}(\chi)$	$E_{\text{акт}}(\eta)$
0.068	17.2	20.7	0.069	17.1	20.3
0.135	17.2	20.4	0.136	16.8	20.6
0.270	18.0	21.4	0.268	15.7	20.5
0.532	17.7	23.8	0.527	15.6	20.8

ски совпадают (рис. 1а), а вязкость растворов перхлората натрия (рис. 1б) выше вязкости растворов перхлората лития равной концентрации [15]. Электропроводность, исправленная на вязкость (корректированная электропроводность), растворов перхлората натрия выше, чем растворов перхлората лития (рис. 1в). Это указывает на то, что степень диссоциации перхлората натрия в сульфолане выше, чем перхлората лития.

С увеличением концентрации соли энергия активации электропроводности перхлората натрия в сульфолане изменяется слабо, а энергия активации вязкого течения увеличивается. Энергии активации электропроводности и вязкого течения сульфолановых растворов перхлората натрия выше, чем растворов перхлората лития равных концентраций (табл. 3). Этот факт может быть следствием большего размера сольватированных сульфоланом ионов натрия, по сравнению с размерами сольватированного иона лития.

Сравнительный анализ литературных [10, 11, 15, 18–21] и полученных нами экспериментальных данных показал, что предельная эквивалентная электропроводность (λ_0) растворов перхлората натрия в сульфолане, как и в других апротонных растворителях (АДР), незначительно выше, чем растворов перхлората лития (табл. 4), а константы ассоциации этих солей примерно равны.

Удельная электропроводность растворов NaClO_4 и LiClO_4 в сульфолане в 3–6 раз ниже удельной проводимости растворов этих солей в карбонатных растворителях. Но значения корректированной электропроводности этих растворов отличаются незначительно (табл. 5). Это указывает на то, что причиной низкой электропроводности растворов перхлоратов натрия и лития в сульфолане является высокая вязкость, которая в 4–6 раз превышает вязкость карбонатных растворов. Различия в физико-химических свойствах растворов перхлоратов натрия и лития коррели-

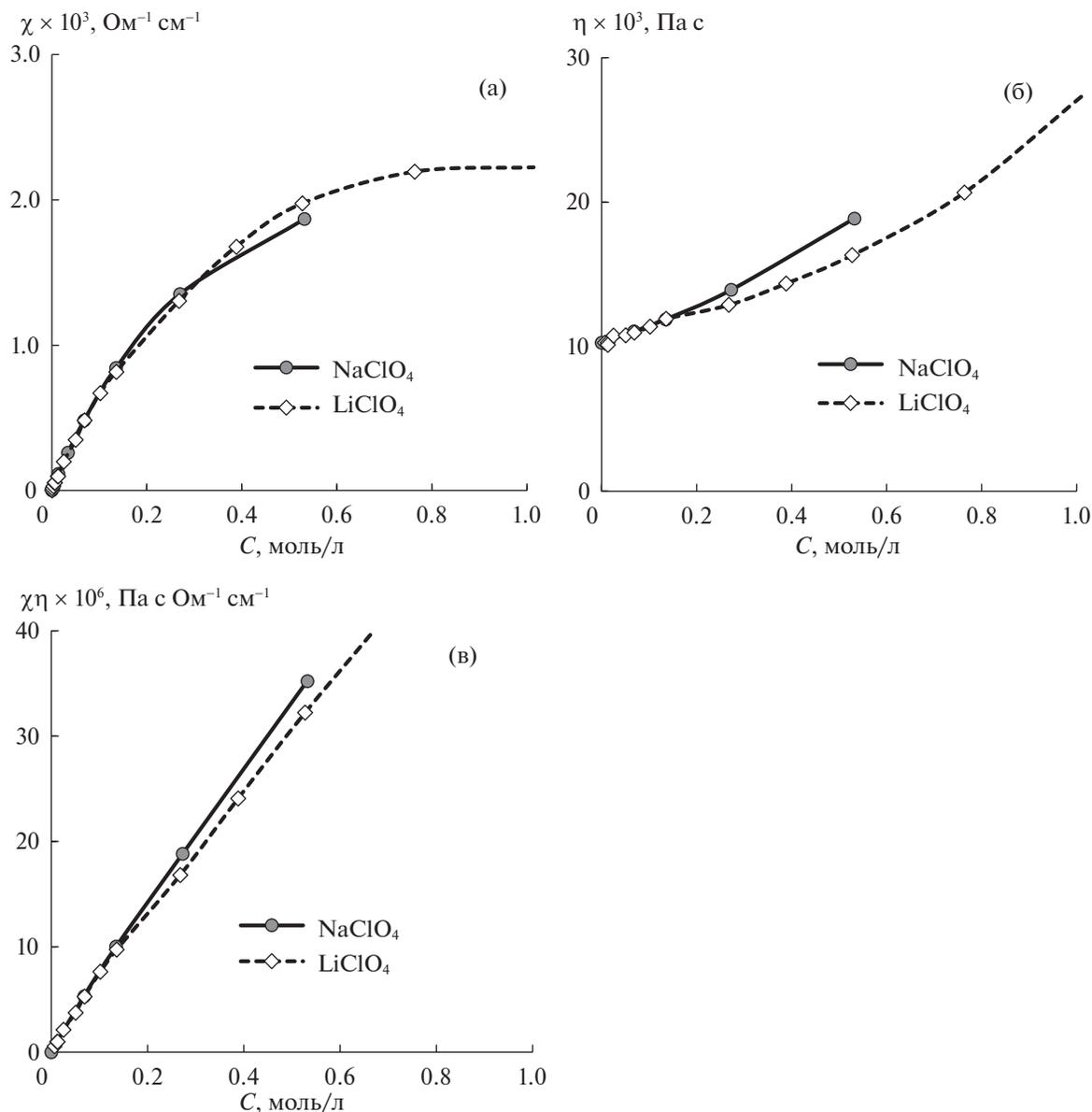


Рис. 1. Изотермы (303.15 К) удельной электропроводности (а), динамической вязкости (б) и скорректированной электропроводности (в) растворов перхлората натрия и перхлората лития в сульфолане.

руют с размерами катионов, катион натрия примерно на 25% больше катиона лития.

Различия в электропроводностях перхлората лития и перхлората натрия в сульфолане и пропиленкарбонате обусловлены как различиями в степенях ассоциации солей, так и различиями в ионной подвижности (табл. 4). В концентрированных растворах эти тенденции сохраняются. Поскольку сульфолан обладает более слабыми донорными свойствами, по сравнению с пропиленкарбонатом, различия в энергии сольватации катионов лития и натрия в сульфолане проявляются в меньшей степени, чем в пропиленкарбонате. Эта гипотеза подтверждается сравнением

величин электропроводности, исправленной на вязкость, растворов LiClO_4 и NaClO_4 в сульфолане и пропиленкарбонате (табл. 5), показывающим, что различия в ионных концентрациях растворов солей в сульфолане существенно ниже, чем в пропиленкарбонате.

Известно, что сульфолан отличается высокой устойчивостью к окислению, но может подвергаться восстановлению. Наши исследования электрохимической стабильности растворов литиевых солей в сульфолане показали, что их анодная устойчивость составляет от 5.0 до 5.8 В (относительно Li/Li^+) в зависимости от аниона соли [15].

Таблица 4. Предельная молярная электропроводность (λ_0) и константы ассоциации ($K_{\text{асс}}$) перхлоратов натрия и лития в сульфолане (SL), пропиленкарбонате (PC), гамма-бутиролактоне (γ -BL) и ацетонитриле (AN) при 298.15 K [10, 15, 18–21]

АДР	$\lambda_0 \times 10^4, \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^2 \text{ моль}^{-1}$		$K_{\text{асс}}, \text{ дм}^3 \text{ моль}^{-1}$	
	NaClO ₄	LiClO ₄	NaClO ₄	LiClO ₄
SL (303.15 K)	10.35 [10]	9.50 [15]	–	24.7 [15]
PC	28.30 [19]	26.75 [19]	6.9 [20]	1.2 [19] 3.67 [21]
γ -BL [18, 20]	40.07	39.18	2.85	4.43
AN [18, 20]	180.38	173.29	19.4	19.6

Таблица 5. Удельная электропроводность, динамическая вязкость и скорректированная электропроводность растворов NaClO₄ и LiClO₄ в PC, в смесях PC с этиленкарбонатом (EC), диметилкарбонатом (DMC) и в диметилсульфоксиде (DMSO) при 298.15 K

АДР	Соль	$C_{\text{соли}}, \text{ моль/л}$	$\chi \times 10^3, \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	$\eta \times 10^3, \text{ Па с}$	$\chi\eta \times 10^6, \text{ Па с Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	Ссылка
SL (303.15 K)	NaClO ₄	0.532	1.9	18.9	35.3	
	LiClO ₄	0.524	2.0	16.3	32.6	[15]
PC	NaClO ₄	1.0	6.4	6.9	44.9	[7]
	LiClO ₄	1.0	8.2	3.9	32.0	[22]
EC : PC	NaClO ₄	1.0	8.0	5.0	45.0	[7]
EC : PC : DMC	NaClO ₄	1.0	10.0	3.5	35.0	[7]
DMC	LiClO ₄	1.0	9.44	1.75	16.5	[23]
DMSO	LiClO ₄	1.0	9.45	3.82	36.1	[23]

Изучение электрохимической устойчивости растворов перхлоратов натрия и лития в сульфолане равных концентраций методом ЦВА на платиновом электроде показало, что анодная (окислительная) устойчивость раствора NaClO₄ в сульфолане составляет 5.45 В (относительно Na/Na⁺), а LiClO₄ в сульфолане 5.65 В (относительно Li/Li⁺) (рис. 2). Мы полагаем, что разница окислительных потенциалов растворов перхлоратов натрия и лития (~0.2 В) может быть обусловлена разницей стандартных электродных потенциалов лития и натрия ($E(\text{Li}^+/\text{Li}) = -3.05 \text{ В}$, $E(\text{Na}^+/\text{Na}) = -2.71 \text{ В}$).

Следует отметить, что катодное осаждение натрия из растворов NaClO₄ в сульфолане осуществляется с трудом (рис. 2а) – пик катодного тока при скорости поляризации 2 мВ/с очень незначительный (0.1 мА/см²). Отсутствие ответного пика анодного тока, вероятно, указывает на активное взаимодействие электрохимически осажденного натрия с сульфоланом. Напротив, для LiClO₄ в сульфолане при той же скорости поляризации (рис. 2б) наблюдаются значительные (3.0 мА/см²) пики катодного тока и ответного

анодного тока, соответствующие процессам катодного осаждения и анодного растворения лития.

Анодная устойчивость раствора перхлората натрия в сульфолане на 0.2–0.5 В выше анодной устойчивости растворов перхлората натрия в органических карбонатах (табл. 6).

Таким образом, проведенные исследования показали, что растворимость перхлората натрия в сульфолане при комнатной температуре (0.53 моль/л) ниже, чем перхлората лития (2.77 моль/л). Удельные электропроводности растворов перхлоратов натрия и лития равных концентраций практически совпадают, а вязкость растворов перхлората натрия выше вязкости растворов перхлората лития. Скорректированная (исправленная на вязкость) электропроводность растворов перхлората натрия в сульфолане выше, чем растворов перхлората лития, что указывает на более высокую степень электролитической диссоциации перхлората натрия. Энергии активации электропроводности и вязкого течения сульфолановых растворов перхлората натрия выше, чем перхлората лития, что обусловлено большим размером сольватированных ионов Na⁺, по сравнению с сольватированными ионами Li⁺. Окислительная

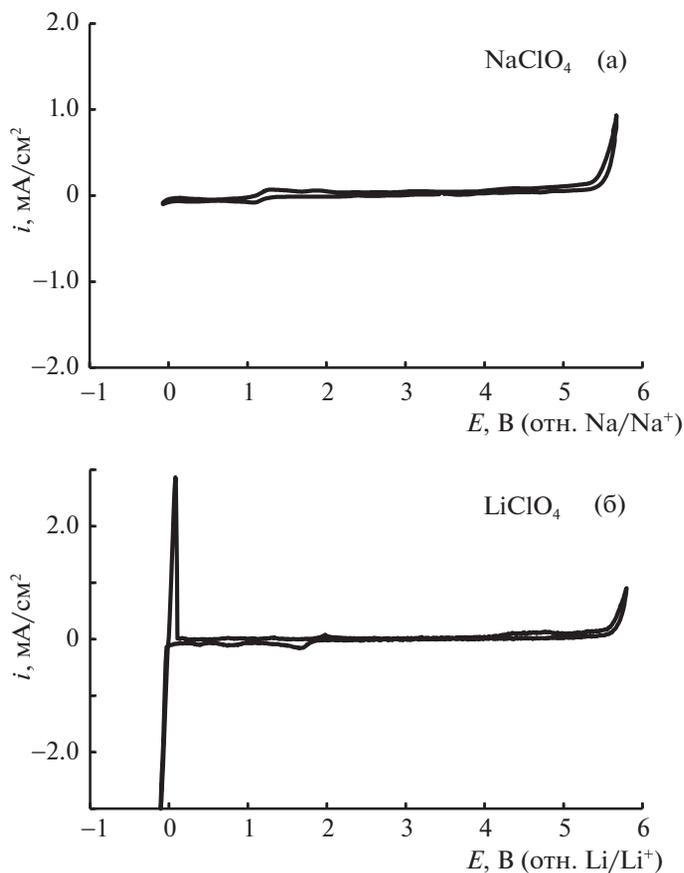


Рис. 2. Циклические вольтамперограммы (на Pt электроде) растворов 0.53 М NaClO₄ (а) и 0.52 М LiClO₄ (б) в сульфолане. Температура 22 ± 1°С, скорость развертки потенциала 2 мВ/с.

устойчивость раствора перхлората натрия в сульфолане составляет 5.45 В (отн. Na/Na⁺), что на 0.2–0.5 В превышает окислительную устойчивость растворов перхлората натрия в органических карбонатах.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А20-120012090022-1 “Развитие методов повышения эффективности аккумулярования электрической энергии в электрохимических системах различного типа. Разра-

Таблица 6. Окислительная (анодная) устойчивость растворов перхлората натрия в карбонатных растворителях (РС, ЕС, DMC, диэтилкарбонате (DEC)) и тетраглиме [6, 24–27]

Электролит	Рабочий электрод	$E_{\text{окисл.}}$, В (отн. Na/Na ⁺)	Ссылка
1 М NaClO ₄ в тетраглиме	нерж. сталь	3.7	[24]
1 М NaClO ₄ в РС	нерж. сталь	5.02	[25]
1 М NaClO ₄ в РС	Al	5.0	[26]
0.5 М NaClO ₄ в ЕС : РС	нерж. сталь	4.5	[6]
1 М NaClO ₄ в ЕС : РС	Al	5.1	[26]
1 М NaClO ₄ в ЕС : DMC	нерж. сталь	4.6	[25]
1 М NaClO ₄ в ЕС : DMC	Al	5.0	[26]
1 М NaClO ₄ в ЕС : DMC (30 : 70)	углерод GDL	4.5	[27]
1 М NaClO ₄ в ЕС : DEC	нерж. сталь	4.7	[25]
1 М NaClO ₄ в ЕС : DEC	Al	4.9	[26]
0.5 М NaClO ₄ в ЕС : РС : DMC	нерж. сталь	4.6	[6]

ботка новых электролитов и электродных материалов для суперконденсаторов, литиевых и литий-ионных аккумуляторов, повышающих их удельную энергию, мощность и длительность эксплуатации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li F., Wei Z., Manthiram A. et al.* // *J. Mater. Chem. A.* 2019. V. 7. P. 9406.
<https://doi.org/10.1039/c8ta11999f>
2. *Кулова Т.Л., Скундин А.М.* // *Электрохимическая энергетика.* 2016. Т. 16. № 3. С. 122.
<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2016-3-122-150>
3. *Kuzu S., Kageura J., Matsumoto S. et al.* // *SUMITOMO KAGAKU (English Edition).* V. 2013. Report 3. P. 1.
4. *Slater M.D., Kim D., Lee E., Johnson C.S.* // *Adv. Funct. Mater.* 2013. V. 23. P. 947.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201200691>
5. *Vignarooban K., Kushagra R., Elango A. et al.* // *Intern. J. of Hydrogen Energy.* 2016. 41 (4). P. 2829.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.090>
6. *Lee Y., Lee J., Kim H. et al.* // *J. Power Sources.* 2016. V. 320. P. 49.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.070>
7. *Ponrouch A., Monti D., Boschin A. et al.* // *J. Mater. Chem. A.* 2015. V. 3 (1). P. 22.
<https://doi.org/10.1039/c4ta04428b>
8. *Xu K.* // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. P. 11503.
<https://doi.org/10.1021/cr500003w>
9. *Borodin O., Behl W., Jow T.R.* // *J. Phys. Chem. C.* 2013. V. 117. P. 8661.
<https://doi.org/10.1021/jp400527c>
10. *Petrella G., Sacco A., Castagnolo M. et al.* // *J. Solution Chemistry.* 1977. V. 6 (1). P. 13.
<https://doi.org/10.1007/BF00650788>
11. *Petrella G., Castagnolo M., Sacco A.* // *Z. Naturforsch.* 1975. V. 30a. P. 533.
12. *Thanh V.D., An P.L.B., Binh T.T. et al.* // *Science & Technology Development Journal.* 2019. V. 22 (3). P. 335.
<https://doi.org/10.32508/stdj.v22i3.1682>
13. *Sulfolane based binary sodium ion electrolyte and preparation method thereof* // Patent CN 105811001 A. 2016.
14. *Vondrák J., Musil M., Sedlářiková M. et al.* // *Electrochem. Energy Technol.* 2016. V. 2. P. 6.
<https://doi.org/10.1515/eetech-2016-0002>
15. *Колосницын В.С., Шеина Л.В., Мочалов С.Э.* // *Электрохимия.* 2008. Т. 44. № 5. С. 620.
16. *Абросимов В.К., Королев В.В., Афанасьев В.Н.* *Экспериментальные методы химии растворов: денсиметрия, вискозиметрия, кондуктометрия и другие методы.* М.: Наука, 1997. 351 с.
17. *Karaseva E.V., Kuzmina E.V., Kolosnitsyn D.V. et al.* // *Electrochim. Acta.* 2019. V. 296. P. 1102.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.019>
18. *Chernozyuk T., Kalugin O.* // *Chemistry & Chemical technology.* 2016. V. 10 (1). P. 9.
19. *Salomon M.* // *J. of Solution Chemistry.* 1990. V. 19 (12). P. 1225.
<https://doi.org/10.1007/BF00652547>
20. *Salomon M., Plichta E.* // *Electrochim. Acta.* 1984. V. 29 (6). P. 731.
21. *Moumouzias G., Ritzoulif G.* // *Bes Bunsenges. Phys. Chem.* 1998. V. 102 (5). P. 786.
22. *Nwokobia F.U., Cookey G.A., Abia A.A.* // *J. Appl. Chem.* 2015. V. 8 (2). P. 35.
<https://doi.org/10.9790/5736-08223541>
23. *Edimeh A.I., Cookey G.A., Maduelosi J.N., Abia A.A.* // *Chem Sci Rev Lett.* 2017. V. 6 (23). P. 1773.
24. *Kim J.-S., Lee S.-W., Liu X. et al.* // *Current Applied Physics.* 2011. V. 11. S11.
25. *Chen J., Huang Z., Wang C. et al.* // *Chem. Commun.* 2015. V. 51. P. 9809.
<https://doi.org/10.1039/c5cc02901e>
26. *Ponrouch A., Marchante E., Courty M. et al.* // *Energy Environ. Sci.* 2012. V. 5. P. 8572.
27. *Bhide A., Hofmann J., Dúrr A. K. et al.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. V. 16 (5). P. 1987.
<https://doi.org/10.1039/C3CP53077A>