

ОЧИСТКА ОРГАНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОЛИТА – 1,1'-БИСПИРОПИРРОЛИДИНИЯ ТЕТРАФТОРОБОРАТА

К.Ю. Новолоков, А.А. Бакибаев, А.С. Князев

Кирилл Юрьевич Новолоков (ORCID 0000-0001-6418-6914)*, Абдигали Абдимонапович Бакибаев (ORCID 0000-0002-3335-3166)

Лаборатория органического синтеза, Национальный Исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: novolokov.kirill@gmail.com*, bakibaev@mail.ru

Алексей Сергеевич Князев (ORCID 0000-0001-6112-403X)

Лаборатория полимеров и композиционных материалов, Национальный Исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Российская Федерация, 634050

E-mail: kas854@mail.ru

Для стабильной работы электрохимических устройств необходимо соблюдение строгих норм по содержанию примесных компонентов. Например, таким требованиям должны соответствовать органические электролиты, которые служат одним из основных компонентов при сборке суперконденсаторов или могут использоваться в качестве добавки при создании электродов. В данной работе предложена удобная методика очистки 1,1'-биспиропиirroлидиния тетрафторобората (SBP-BF₄), с помощью которой возможно получать высокочистый целевой продукт, что в свою очередь позволит использовать SBP-BF₄ в современной электрохимической промышленности. Разработанный способ очистки представляет собой перекристаллизацию продукта из бинарного растворителя с оптимальным соотношением воды и спирта. Найдено, что наиболее эффективным растворителем для перекристаллизации является смесь изопропилового спирта с водой в массовом соотношении 95:5. После однократной перекристаллизации удается достичь минимального содержания катионов, тогда как после трехкратной перекристаллизации удастся минимизировать содержание галоген-анионов в целевом продукте. Данный метод позволяет достичь следующих показателей качества конечного продукта: содержание катионов металлов Na⁺ и K⁺ – менее 5 ppm; суммарная концентрация галоген-анионов (Cl⁻ и Br⁻) – менее 100 ppm. Для контроля количественного содержания мешающих ионов были применены следующие аналитические методы исследования: атомно-эмиссионная спектроскопия позволила установить содержание катионов натрия, калия; прямая потенциометрия с ионселективными электродами позволила установить содержание хлорид- и бромид-анионов. Синтез целевого органического электролита SBP-BF₄ проводился путем взаимодействия пиirroлидина и 1,4-дибромбутана в присутствии натрия тетрафторобората по известной методике. Для подтверждения качественного состава полученного органического электролита использовали метод ЯМР-спектроскопии на ядрах ¹H и ¹³C в ДМСО-d₆.

Ключевые слова: суперконденсаторы, SBP-BF₄, растворители для перекристаллизации, очистка

Для цитирования:

Новолоков К.Ю., Бакибаев А.А., Князев А.С. Очистка органического электролита – 1,1'-биспиропиirroлидиния тетрафторобората. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 2. С. 72–77. DOI: 10.6060/ivkkt.20266902.6780.

For citation:

Novolokov K.Yu., Bakibaev A.A., Knyazev A.S. Purification of organic electrolyte – 1,1'-bispyrrolidinium tetrafluoroborate. *ChemChemTech* [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2026. V. 69. N 2. P. 72–77. DOI: 10.6060/ivkkt.20266902.6780.

**PURIFICATION OF ORGANIC ELECTROLYTE –
1,1'-BISPYRROLIDINIUM TETRAFLUOROBORATE**

K.Yu. Novolokov, A.A. Bakibaev, A.S. Knyazev

Kirill Yu. Novolokov (ORCID 0000-0001-6418-6914)*, Abdigali A. Bakibaev (ORCID 0000-0002-3335-3166)
Laboratory of Organic Synthesis, National Research Tomsk State University, Lenin ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: novolokov.kirill@gmail.com*, bakibaev@mail.ru

Alexey S. Knyazev (ORCID 0000-0001-6112-403X)

Laboratory of Polymers and Composite Materials, National Research Tomsk State University, Lenin ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: kas854@mail.ru

The stable operation of electrochemical devices, strict impurity content standards must be met. For example, organic electrolytes, which serve as key components in supercapacitor assembly or can be used as additives in electrode fabrication, are subject to such requirements. This paper proposes a convenient method for purifying 1,1'-bispyrrolidinium tetrafluoroborate (SBP-BF₄), which enables the production of a highly pure target product, thereby enabling its use in the modern electrochemical industry. Developed purification method is based on recrystallization using a binary solvent system, relying on the selection the optimal water-to-alcohol ratio. The most effective binary mixture for recrystallization was found to be isopropyl alcohol and water in a mass fraction of 95:5. After a single recrystallization, it is possible to achieve a minimum content of cations, whereas after three recrystallizations, it is possible to minimize the content of halide anions in the target product. This method allows achieving the following quality indicators the final product: the content of metal cations Na⁺ and K⁺ is less than 5 ppm; the total concentration of halogen anions (Cl⁻ and Br⁻) is less than 100 ppm. The following analytical methods were used to control the quantitative content of interfering ions: atomic emission spectroscopy allowed us to determine the content of sodium and potassium cations; direct potentiometry with ion-selective electrodes allows us to determine the content of chloride and bromide anions. Synthesis the target organic electrolyte SBP-BF₄ was carried out by the interaction pyrrolidine and 1,4-dibromobutane in the presence sodium tetrafluoroborate according to a known method. To confirm the qualitative composition the obtained organic electrolyte, the NMR spectroscopy method was used on ¹H and ¹³C nuclei in DMSO-d₆.

Keywords: supercapacitors, SBP-BF₄, recrystallization solvents, purification

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует множество различных источников электроэнергии. Одним из устройств хранения и накопления энергии являются суперконденсаторы, которые получили широкое распространение в автомобилестроении [1-3], медицине, современных электроприборах и т.д. [4-6]. Главным преимуществом суперконденсаторов является высокая удельная и разрядная мощность. Данная особенность обусловлена фор-

мированием двойного электрического слоя (ДЭС) на электродах, погруженных в электролит, а накопление заряда обеспечивается за счет пористого покрытия на электродах [7]. В качестве электролитов могут использоваться органические соли, как, например, четвертичные аммонийные соединения или ионные жидкости на основе фосфорсодержащих соединений [8, 9]. Применение ионных жидкостей в суперконденсаторах осложнено высокими значениями температуры плавления (свыше + 100 °C) и вязкости [10, 11].

Наиболее распространенными органическими электролитами являются: триэтилметилламмония тетрафтороборат (ТЕМА-BF₄) [12, 13], 1,1'-биспиропирролидиния тетрафтороборат (SBP-BF₄) [14-16] и диметилпирролидиния тетрафтороборат (DMP-BF₄) [17-19]. Данные соединения применяются при создании суперконденсаторов, т.к. растворы на основе этих солей обладают высокими значениями электропроводности и широким рабочим диапазоном температуры. Среди вышеперечисленных веществ наиболее перспективным является SBP-BF₄, т.к. данное соединение является электрохимически стабильным, а растворы, содержащие SBP-BF₄, имеют невысокую вязкость [20-22].

Одним из ключевых факторов при создании суперконденсаторов является чистота органического электролита. От этого показателя зависят следующие характеристики устройства: стабильность, долговечность и электрохимические показатели, поэтому содержание примесей является строго нормируемым параметром. Например, содержание катионов Na⁺ и K⁺ должно быть на уровне ниже 10 ppm, а содержание галоген-анионов ниже 100 ppm. Для достижения таких показателей существуют различные методы очистки SBP-BF₄. В настоящее время известны способы очистки с применением краун-эфиров. Данный способ позволяет избавиться лишь от катионов металлов и требует постоянной регенерации эфиров, что усложняет разделение реакционной смеси. Очистка с применением распространенных катионообменных смол не позволяет достичь необходимой степени чистоты, а специализированные ионообменные смолы ввиду своей специфичности изготовления не производятся серийно. Поэтому разработка универсального метода очистки органического электролита является актуальной задачей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Структуру 1,1'-биспиропирролидиния тетрафторобората (SBP-BF₄) подтверждали методом ЯМР-спектроскопии (Bruker Avance III HD с рабочей частотой 400 МГц ¹H, 101 МГц ¹³C). Для установления содержания катионов использовали оптико-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой (ОЭС-ИСП) EXPEC 6500, для анионов – анализатор лабораторный серии АНИОН 4100.

Синтез соли SBP-BF₄ проводили по методике [15]: в трехгорлую колбу последовательно вносили ацетонитрил, гидроксид натрия, тетрафто-

роборат натрия, 1,4-дибромбутан в молярном соотношении 2,5:1:1,2:1. К реакционной массе по каплям добавляли пирролидин (молярное соотношение 1,4-дибромбутан : пирролидин 1:1). Нагревали реакционную массу до кипения и выдерживали в течение 12 ч. По завершении реакции отфильтровывали неорганические соли, маточный раствор концентрировали до выпадения осадка. Полученный осадок перекристаллизовывали из смеси изопропилового спирта (ИПС) и воды следующим образом: к SBP-BF₄ добавляли экспериментально найденное количество растворителя, нагревали до кипения, затем полученный раствор охлаждали до комнатной температуры и выпавшие кристаллы отфильтровывали с помощью вакуума. Продукт помещали в вакуумный шкаф при +70 °C на 6 ч для удаления растворителя. Высушенный образец передавали на анализ. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

Структуру полученного соединения подтверждали методом ЯМР-спектроскопии. ¹H NMR (400 MHz, DMSO-d₆) δ 2,03 – 2,11 м.д. (s, 8 H, -CH₂-), δ 3,44 – 3,52 м.д. (t, J = 6,6 Hz, 8H, -CH₂-N-CH₂-); ¹³C NMR (101 MHz, DMSO-d₆) δ 22 м.д. (-C-C-), δ 62,28 м.д. (-C-N-C-).

Анализ катионов: Содержание калия и натрия определяют методом атомно-эмиссионной спектроскопии с микроволновой или индуктивно-связанной плазмой. Проводят измерение интенсивности излучения (эмиссии) возбужденных атомов и ионов определяемых элементов в высокотемпературной зоне плазмы. Навеску пробы SBP-BF₄ растворяли в растворе азотной кислоты, добавили в полученный раствор внутренний стандарт и провели измерение. Зависимость аналитического сигнала от массовой концентрации элемента в растворе устанавливают с помощью градуировочных растворов, получая градуировочные характеристики для каждого определяемого элемента.

Анализ анионов. Содержание бромид-ионов и хлорид-ионов определяют потенциометрическим методом с ионселективным электродом и электродом сравнения. Метод основан на измерении показателя активности анионов. Электродная система, при погружении в раствор пробы, развивает электродвижущую силу, линейно зависящую от показателя активности бромид- и хлорид-ионов. Навеску пробы SBP-BF₄ растворяли в дистиллированной воде, добавили раствор нитрата калия для регулирования общей ионной силы. В стакан с раствором пробы опустили электроды и провели измерение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментов показано, что в синтезированном нами образце SBP-BF₄ содержится около 200 ppm катионов щелочных металлов и свыше 0,5% массовых процентов галогенид-анионов (табл. 1). Для создания электрохимической ячейки с применением SBP-BF₄ необходимо уменьшить содержание примесных ионов до следующих значений: содержание Na⁺ менее 10 ppm, содержание K⁺ менее 10 ppm и содержание суммы галоген-анионов менее 100 ppm. Для достижения необходимых показателей чистоты нами был выбран метод перекристаллизации.

Основным методом очистки SBP-BF₄ является перекристаллизация вещества в различных спиртах C₁-C₄ [15, 21-23]. Однако применение данных растворителей не позволяет достичь необходимой чистоты. Экспериментально нами было установлено, что использование абсолютизированных спиртов оставляет без изменений содержание катионов металлов и галоген-анионов, однако выход продукта после перекристаллизации составляет более 95%.

Перекристаллизация в 80% этаноле позволяет уменьшить значение примесных ионов, однако выход продукта после перекристаллизации составляет 60%. Так для достижения нормируемого показателя содержания примесных ионов необхо-

димо использовать многократную перекристаллизацию, что влечет за собой резкое снижение выхода конечного продукта.

Использование смеси растворителей ИПС : этанол в различных соотношениях позволило приблизиться к получению особо чистого SBP-BF₄ за одну перекристаллизацию (табл. 1). Однако по мере увеличения содержания этанола в смеси растворителя наблюдается уменьшение выхода конечного продукта. Очевидно, что данный экспериментальный факт обусловлен увеличением относительного содержания воды в системе. Экспериментально установлено, что наиболее эффективной смесью для перекристаллизации является растворитель следующего состава: этанол : ИПС = 80:20 (массовые проценты). После перекристаллизации содержание катионов металлов составляет менее 10 ppm, однако содержание анионов составляет 870 ppm. Для достижения необходимого содержания анионов операцию перекристаллизации повторяли еще 2 раза (суммарно перекристаллизовывали 3 раза, табл. 2). Выход продукта после каждого этапа очистки составил 85%, а суммарный выход 61%. Однако использование этанола в бинарной смеси растворителя для перекристаллизации влечет за собой изменение изначального соотношения этанола и воды из-за летучести спирта.

Для решения возникшей проблемы была апробирована смесь изопропилового спирта с водой в качестве растворителя для перекристаллизации.

Таблица 1

Анализ SBP-BF₄ после однократной перекристаллизации
Table 1. Analysis of SBP-BF₄ after single recrystallization

Массовое соотношение растворителей для перекристаллизации	Содержание ионов			Содержание остаточной влаги, %	Выход SBP-BF ₄ , %
	Na ⁺ , ppm	K ⁺ , ppm	Суммарное содержание галоген-анионов (Cl ⁻ и Br ⁻), ppm		
Содержание ионов в образце SBP-BF ₄ до очистки	203	4	5400	-	-
20% этанол : 80% ИПС	16	< 1 ppm	1480	0,17	83
40% этанол : 60% ИПС	22	< 1 ppm	1810	0,13	93
60% этанол : 40% ИПС	16	< 1 ppm	1210	0,20	90
80% этанол : 20% ИПС	3	< 1 ppm	870	0,17	85
5% вода : 95% ИПС	3	< 1 ppm	860	0,15	93
10% вода : 90% ИПС	< 1 ppm	< 1 ppm	740	0,20	82

Таблица 2

Анализ SBP-BF₄ после трехкратной перекристаллизации
Table 2. Analysis of SBP-BF₄ after three recrystallization

Массовое соотношение растворителей для перекристаллизации	Содержание ионов			Содержание остаточной влаги, %	Выход SBP-BF ₄ , %
	Na ⁺ , ppm	K ⁺ , ppm	Суммарное содержание галогенид-ионов, ppm		
80% этанол : 20% ИПС	< 1 ppm	< 1 ppm	75	0,15	61
5% вода : 95% ИПС	< 1 ppm	< 1 ppm	67	0,13	81

В соотношении вода : ИПС = 5:95 (массовые проценты) наблюдаются наилучшие результаты очистки, не уступающие смеси этанол:ИПС = 80:20 (массовые проценты). Содержание катионов металлов составляет менее 10 ppm по каждому компоненту, однако содержание анионов остается высоким. Выход продукта в случае смеси растворителей вода : ИПС = 5:95 (массовые проценты) составляет 93%. Для достижения необходимой чистоты продукта проводили повторную перекристаллизацию (табл. 2). Суммарный выход продукта после всех операций составил 81%.

Смесь вода : ИПС = 10:90 (массовые проценты) не позволяет получить более чистый продукт и ведет к значительному снижению выхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при использовании смеси растворителей вода : ИПС = 5:95 (массовое соотношение) достигаются необходимые параметры чистоты продукта для его успешного применения в электрохимических приборах. Выход целевого продукта после перекристаллизации составляет 81%. Найденные условия очистки 1,1'-биспиропирролидиния тетрафторобората позволяют получить целевой продукт необходимого качества при сборке суперконденсаторов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Pal B., Yang S., Ramesh S., Thangadurai V., Jose R. Electrolyte selection for supercapacitive devices: A critical review. *Nanoscale Adv.* 2019. V. 1. N 10. P. 3807–3835. DOI: 10.1039/c9na00374f.
2. Pikma P., Ers H., Siinor L., Zhao J., Oll O., Romann T., Grozovski V., Siimenson C., Väärtnõu M., Paalo M., Härmäs R., Lust K., Thomberg T., Jänes A., Nerut J., Jäger R., Valk P., Kivi I., Maide M., Möller P., Kanarbik R., Nurk G., Lust E. The review of advances in interfacial electrochemistry in Estonia: electrochemical double layer and adsorption studies for the development of electrochemical devices. Berlin, Heidelberg: Springer. 2023. P. 1547–1591. DOI: 10.1007/s10008-022-05338-0.
3. Melchiorre M., Esposito R., Di Serio M., Abbate G., Lampasi A., Balducci A., Ruffo F. Lactic acid-based solvents for sustainable edlc electrolytes. *Energies*. 2021. V. 14. N 14. P. 4250. DOI: 10.3390/en14144250.
4. Saito M., Kawaharasaki S., Ito K., Yamada S., Hayamizu K., Seki S. Strategies for fast ion transport in electrochemical capacitor electrolytes from diffusion coefficients, ionic conductivity, viscosity, density and interaction energies based on HSAB theory. *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 24. P. 14528–14535. DOI: 10.1039/c7ra00455a.
5. Li H., Yang H., Yan J., Cen K., Ostrikov K. (Ken), Bo Z. Energy and entropy generation analysis in a supercapacitor for different operating conditions. *Energy*. 2022. V. 260. P. 124932. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124932.
6. Yong H., Park H., Jung C. Quasi-solid-state gel polymer electrolyte for a wide temperature range application of acetonitrile-based supercapacitors. *J. Power Sources*. 2020. V. 447. P. 227390. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227390.
7. Дё В.В., Филимонов И.С., Урванов С.А., Казеннов Н.В., Караева А.Р., Мордкович В.З. Бумага из сверхдлинных углеродных нанотрубок как электродный материал для суперконденсаторов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 9. С. 43–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.5y. De V.V., Filimonenkov I.S., Urvanov S.A., Kazennov N.V., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z. Ultra-long carbon nanotube paper as an electrode material for supercapacitors. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 9. P. 43–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20256809.5y.
8. Ярмоленко О.В., Баймуратова Г.Р., Тулибаева Г.З., Юдина А.В., Якущенко И.К., Шестаков А.Ф. Перспективные органические катодные материалы для высокоэнергетических источников тока и электролитные системы, совместимые с ними. *Рос. хим. ж.* 2023. Т. LXVII. № 4. С. 54–58. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.10. Yarmolenko O.V., Baymuratova G.R., Tulibaeva G.Z., Yudina A.V., Yakushchenko I.K., Shestakov A.F. Perspective organic cathode materials for high-energy power sources and electrolyte systems compatible with them. *Russ. Khim. Zhurn.* 2023. V. 67. N 4. P. 54–58 (in Russian). DOI: 10.6060/RCJ.2023674.10.
9. Jover J.F., Lugo R., Toulhoat H., Simon P., De Bruin T. Screening methodology for the efficient pairing of ionic liquids and carbonaceous electrodes applied to electric energy storage. *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. N 2. P. 864–872. DOI: 10.1021/jp409995q.
10. Krummacker J., Schütter C., Hess L.H., Balducci A. Non-aqueous electrolytes for electrochemical capacitors. *Curr. Opin. Electrochem.* 2018. V. 9. P. 64–69. DOI: 10.1016/j.coelec.2018.03.036.
11. Thakur R.C., Sharma A., Sharma R., Kaur H. A comparative analysis of volumetric, viscometric and conductometric properties of Triethylmethylammonium Tetrafluoroborate (TEMABF₄) and Tetraethylammonium Tetrafluoroborate (TEABF₄) in pure propylene carbonate (PC) and binary aqueous propylene carbonate. *J. Mol. Liq.* 2023. V. 374. P. 121244. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121244.
12. Yang S., Kim I.J., Choi I.S., Bae M.K., Kim H.S. Influence of electrolytes (TEABF₄ and TEMABF₄) on electrochemical performance of graphite oxide derived from needle coke. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2013. V. 13. N 5. P. 3747–3751. DOI: 10.1166/jnn.2013.7331.
13. Zhang X., Su K., Hu Y., Xue K., Wang Y., Han M., Lang J. [SBP]BF₄ Additive Stabilizing Zinc Anode by Simultaneously Regulating the Solvation Shell and Electrode Interface. *Batteries*. 2024. V. 10. N 3. P. 1–16. DOI: 10.3390/batteries10030102.
14. Yu X., Ruan D., Wu C., Wang J., Shi Z. Spiro-(1,1')-bipyrrolidinium tetrafluoroborate salt as high voltage electrolyte for electric double layer capacitors. *J. Power Sources*. 2014. V. 265. P. 309–316. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.144.
15. Shi Z., Yu X., Wang J., Hu H., Wu C. Excellent low temperature performance electrolyte of spiro-(1,1')-bipyrrolidinium tetrafluoroborate by tunable mixtures solvents for

- electric double layer capacitor. *Electrochim. Acta*. 2015. V. 174. P. 215–220. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.05.133.
16. **Köps L., Kreth F.A., Bothe A., Balducci A.** High voltage electrochemical capacitors operating at elevated temperature based on 1,1-dimethylpyrrolidinium tetrafluoroborate. *Energy Storage Mater.* 2022. V. 44. P. 66–72. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.10.006.
 17. **Pringle J.M., Adebahr J., MacFarlane D.R., Forsyth M.** Unusual phase behaviour of the organic ionic plastic crystal N,N-dimethylpyrrolidinium tetrafluoroborate. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2010. V. 12. N 26. P. 7234–7240. DOI: 10.1039/b925501j.
 18. **Nguyen H.V.T., Kwak K., Lee K.K.** 1,1-Dimethylpyrrolidinium tetrafluoroborate as novel salt for high-voltage electric double-layer capacitors. *Electrochim. Acta*. 2019. V. 299. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.12.155.
 19. **Arkhipova E.A., Ivanov A.S., Levin M.M., Maslakov K.I., Kupreenko S.Y., Savilov S.V.** Study of tetraalkylammonium salts in acetonitrile solutions: Transport properties, density, thermal expansion and phase transitions. *J. Mol. Liq.* 2022. V. 367. P. 120536. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.120536.
 20. **Nikiforidis G., Phadke S., Anouti M.** Comparative Internal Pressure Evolution at Interfaces of Activated Carbon for Supercapacitors Containing Electrolytes Based on Linear and Cyclic Ammonium Tetrafluoroborate Salts in Acetonitrile. *Adv. Mater. Interfaces*. 2023. V. 10. N 2. DOI: 10.1002/admi.202202046.
 21. **Hong J., Hwang B., Lee J., Kim K.** Effects of cyclic structure of ammonium ions on capacitance in electrochemical double layer supercapacitors. *J. Electrochem. Sci. Technol.* 2017. V. 8. N 1. P. 1–6. DOI: 10.5229/JECST.2016.8.1.1.
 22. **Zhou H. ming, Sun W. jiao, Li J.** Preparation of spiro-type quaternary ammonium salt via economical and efficient synthetic route as electrolyte for electric double-layer capacitor. *J. Cent. South Univ.* 2015. V. 22. N 7. P. 2435–2439. DOI: 10.1007/s11771-015-2770-9.
 23. **DeRosa D., Higashiya S., Schulz A., Rane-Fondacaro M., Haldar P.** High performance spiro ammonium electrolyte for Electric Double Layer Capacitors. *J. Power Sources*. 2017. V. 360. P. 41–47. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.05.096.

Поступила в редакцию 06.10.2025

Принята к опубликованию 07.11.2025

Received 06.10.2025

Accepted 07.11.2025