

Особенности электрических свойств композитного материала системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$

Аносов Н. В.^{ID}, Вязьмин В. В.^{ID}, Иванов О. Н.^{ID}, Никулин И. С.^{ID}, Никуличева Т. Б.^{ID}, Тельнова О. А.^{ID}
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
nikulicheva@bsuedu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования особенностей электрофизических характеристик композитного микроструктурно-неоднородного материала системы сульфат кальция – фосфорная кислота – углерод. Изучены электропроводность и механизм проводимости образцов материала при комнатной температуре. Электропроводность материала оказалась достаточно большой и типичной для твердых электролитов.

Ключевые слова: сульфат кальция, твердый электролит, метод импедансной спектроскопии, ионная проводимость

Для цитирования: Аносов Н.В., Вязьмин В.В., Иванов О.Н., Никулин И.С., Никуличева Т.Б., Тельнова О.А. Особенности электрических свойств композитного материала системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$. *Прикладная математика & Физика*. 2025;57(4):290–297. DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-4-290-297 EDN PQQQGH

Short Communication

Features of Electrical Properties of Composite Material of the $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$ System

Nikita V. Anosov^{ID}, Vitaly V. Vyazmin^{ID}, Oleg N. Ivanov^{ID}, Ivan S. Nikulin^{ID}, Tatiana B. Nikulicheva^{ID},
Olga A. Telpova^{ID}
Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
nikulicheva@bsuedu.ru

Abstract. This paper presents the results of a study of the electrical properties of a microstructurally heterogeneous composite material consisting of a calcium sulfate, phosphoric acid, and carbon system. The electrical conductivity and conductivity mechanism of the material samples at room temperature were studied. The material's electrical conductivity was found to be quite high and typical of solid electrolytes.

Keywords: Calcium Sulfate, Solid Electrolyte, Impedance Spectroscopy Method, Ionic Conductivity

For citation: Anosov NV., Vyazmin VV., Ivanov ON., Nikulin IS., Nikulicheva TB., Telpova OA. Features of Electrical Properties of Composite Material of the $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$ System. *Applied Mathematics & Physics*. 2025;57(4):290–297 (In Russ.). DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-4-290-297 EDN PQQQGH

1. Введение. Разработка стабильных твердых электролитов является важнейшим вопросом в решении проблем нехватки энергии, поскольку она может максимально повысить эффективность использования возобновляемых и устойчивых альтернативных источников энергии. Тем не менее немаловажным также является вопрос обеспечения безопасности эксплуатации устройств на основе твердых электролитов из-за использования легковоспламеняющихся органических электролитов [1]. Твердотельные литий-ионные аккумуляторы привлекли большой интерес благодаря негорючести твердых электролитов и дальнейшему повышению безопасности и надежности. Кроме того, неорганические твердые электролиты имеют более низкую электропроводность, лучшие электрохимические характеристики при высоких температурах и более широкий диапазон электрохимической стабильности, чем жидкие, полимерные и гелевые электролиты. К классификации проводящих материалов следует добавить также смешанные ионно-электронные проводники, сочетающие оба типа проводимости: электрический заряд переносится посредством движения свободных электронов и свободных или слабосвязанных положительно и/или отрицательно заряженных ионов [2, 3] Хотя эти привлекательные свойства неорганических твердых электролитов широко известны, их достаточно низкая ионная проводимость и плохая химическая и электрохимическая стабильность препятствуют их практическому использованию [4, 5]. В этом отношении разработка новых материалов для твердых электролитов остается актуальной задачей современного физического материаловедения. Одним из эффективных способов решения этой задачи является легирование твердых электролитов различными элементами для увеличения ионной проводимости при комнатной температуре как, например, описано в [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Целью данной работы является исследование возможности использования в качестве твердых электролитов композитных образцов, состоящих из матрицы сульфата кальция CaSO_4 , обработанного ортофосфорной кислотой H_3PO_4 , и углерода.

2. Получение и характеристика образцов композитного материала системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$.

В качестве исходного материала для получения разрабатываемого твердотельного электролита использовали полугидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Сначала из цитрогипса, являющегося отходом биохимического производства лимонной кислоты, получали дигидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Оксидный состав цитрогипса приведен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

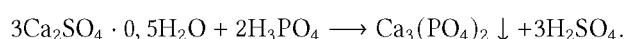
Химический состав цитрогипса
Chemical composition of citrogypsum

Оксид	SO_3	CaO	SiO_2	FeO	SrO	Al_2O_3	MgO	Na_2O	P_2O_5	K_2O
Содержание, %	55,47	43,36	0,54	0,15	0,14	0,13	0,06	0,04	0,08	0,03

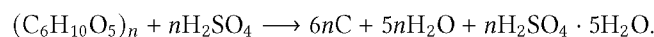
По результатам дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГ) было установлено, что цитрогипс представляет собой двухфазный материал, состоящий из дигидрата сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (85 мас.%) и полугидрата сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (15 мас. %).

Для получения исследуемого композитного материала был разработан следующий технологический процесс. Сначала цитрогипс был переведен в однофазный материал $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Для этого просеивали 100 г исходного цитрогипса через сито 100 мкм. Затем цитрогипс растворяли с избытком в дистиллированной воде из расчета 250 мл H_2O на 10 г цитрогипса. Не растворившийся осадок отфильтровывали и сушили в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 2 ч. Полученный $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ выдерживали в сушильном шкафу при температуре 170 °С в течение 4 часов. В результате $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ был полностью переведен в ангидрит сульфата кальция CaSO_4 , который далее выдерживали при комнатной температуре в течение 24 ч для превращения CaSO_4 в $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Полученный порошок обрабатывали при температуре 90 °С в течение 15 мин в 85%-м водном растворе ортофосфорной кислоты H_3PO_4 из расчета 50 мл ортофосфорной кислоты на 20 г сухого вещества. После этого полученную смесь разбавляли 500 мл дистиллированной воды и отфильтровывали через бумажный фильтр с размером пор 2-3 мкм (синяя лента). После фильтрации порошок на бумажном фильтре сушили при комнатной температуре в течение 24 часов, а затем в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 5 суток. В процессе сушки происходило разрушение фильтровальной бумаги и порошок постепенно приобретал черный цвет. Фазовые превращения материала, выявленные для данного технологического процесса, определяются процессами гидратации, дегидратации, кислотно-основного взаимодействия и карбонизации, которые можно выразить следующими соответствующими реакциями.

1. Ортофосфорная кислота H_3PO_4 реагирует с полугидратом сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (источник ионов Ca^{2+}), образуя фосфат кальция:



2. Серная кислота H_2SO_4 выступает как сильный дегидратирующий агент, разрывая гликозидные связи и отнимая воду от глюкозных звеньев целлюлозы, из которой состоит бумажный фильтр:



В результате выделяется практически чистый углерод в аморфной форме (черный углеродистый остаток), смешанный с гидратами, которые за счет капиллярного эффекта постепенно равномерно обволакивают частицы порошка сульфата кальция с небольшим содержанием фосфата кальция.

Из полученного порошкового материала методом одноосного прессования при давлении 5 МПа были скомпактированы объемные образцы диаметром 12 мм и толщиной 2 мм. Для прессования использовали универсальную испытательную машину Instron 3369. Прессование проводили без добавления воды в прессуемый порошок. Фотография типичного объемного образца на основе исходного порошка после обработки ортофосфорной кислотой и сушки на фильтровальной бумаге показана на рисунке 1 (слева). Для визуального сравнения приведена на рисунке 1 (справа) фотография объемного образца, исходный порошок для компактирования которого сушили не на бумажном фильтре, а на поверхности корундовой керамики. Объемный образец, полученный после его сушки на фильтровальной бумаге, имеет черный цвет, что связано с внедрением в этот образец аморфного углерода в процессе сушки, т. е. такой материал следует рассматривать как микроструктурно-неоднородный композитный материал,

состоящий из матрицы и наполнителя. Объемный образец, полученный после сушки на керамической поверхности, остается светло-серым, как и исходный порошок, т. е. его можно рассматривать как микроструктурно-однородный материал. То есть сушка скомпактированного образца на фильтровальной бумаге позволяет получить композитный материал на основе CaSO_4 с добавлением аморфного углерода, играющего роль наполнителя композита.

Рентгеноструктурный анализ полученного композитного материала проводили на дифрактометре Rigaku SmartLab с фокусировкой по Брэггу-Брентано с использованием CuK_α -излучения при напряжении 60 кВ и токе 60 мА. Съемки проводили в диапазоне углов 2θ от 5 до 80° . Шаг сканирования составлял $0,02^\circ$, время экспозиции – 20 с. На дифрактограмме (рисунок 2) наблюдаются рефлексы только от одной фазы – ангидрита сульфата кальция CaSO_4 .



Рис. 1. Фотографии объемного образца композитного микроструктурно-неоднородного материала $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4\text{-C}$ после сушки на фильтровальной бумаге (слева), и объемного образца микроструктурно-однородного материала $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4$ после сушки на поверхности корундовой керамики (справа)

Fig. 1. Photographs of a bulk sample of the composite microstructurally inhomogeneous material $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4\text{-C}$ after drying on filter paper (left), and a bulk sample of the microstructurally homogeneous material $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4$ after drying on the surface of corundum ceramics (right)

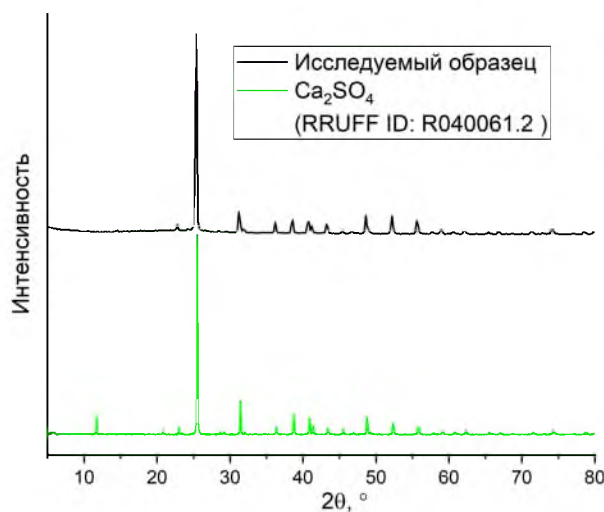


Рис. 2. Рентгеновский спектр исследуемого образца и положение пиков из базы данных RRUFF

Fig. 2. X-ray spectrum of the studied sample and peak positions from the RRUFF database

Аморфный углерод в композитном материале является рентгеноаморфным и на дифрактограмме не фиксируется. На данном этапе исследований его наличие в исследуемых образцах подтверждается только характерным черным цветом образцов и химическими превращениями, которые происходят в процессе обработки $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ортофосфорной кислотой и последующим взаимодействием

образовавшейся кислоты H_2SO_4 с материалом бумажного фильтра в процессе сушки. Также в образцах композитного материала, на основе EDX анализа, был обнаружен фосфор Р (таблица 2). Наличие Р обусловлено обработкой материала ортофосфорной кислотой и является ожидаемым [16]. Анализ выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Nova NanoSem 450, оснащенного EDX детектором.

Таблица 1

Table 1

Результаты EDX анализа исследуемого образца композитного материала системы $CaSO_4-H_3PO_4-C$

Results of EDX analysis of the studied sample of composite material of the $CaSO_4-H_3PO_4-C$ system

O, мас.%	Al, мас.%	Si, мас.%	P, мас.%	S, мас.%	K, мас.%	Ca, мас.%	Ni, мас.%
59,14	0,22	0,25	7,74	12,57	0,06	18,14	1,88

3. Электрические свойства образцов композитного материала системы $CaSO_4-H_3PO_4-C$. Электрические характеристики (тангенс угла диэлектрических потерь и полный импеданс, включающий действительную и мнимую части), образцов композитного материала изучали с помощью импедансного спектрометра Novocontrol Concept-43 в диапазоне частот 20–2400 Гц при комнатной температуре. Электрические контакты наносили серебряной проводящей пастой на контактные площадки противоположных граней образцов, к которым крепили измерительные зонды.

На рисунке 3 представлена частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. С увеличением частоты $\tan \delta$ вначале быстро возрастает, при частоте $f = 820$ Гц достигает максимума, а затем медленно уменьшается, стремясь к постоянному значению. Вид кривой $\tan \delta(f)$ отражает частотную зависимость диэлектрических потерь с учетом влияния релаксационных механизмов и электропроводности материала. Наличие максимума на кривой $\tan \delta(f)$ свидетельствует о наличии релаксационных потерь в образце, поэтому для дальнейшего анализа особенностей его электрических свойств применяли метод диаграмм Коула – Коула.

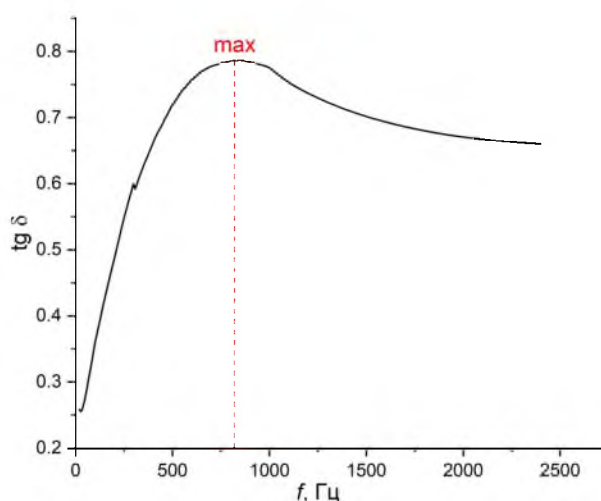


Рис. 3. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для образца композитного материала системы $CaSO_4-H_3SO_4-C$

Fig. 3. Frequency dependence of the dielectric loss tangent for a sample of composite material of the $CaSO_4-H_3SO_4-C$ system

Типичный вид спектра импеданса в координатах Найквиста (зависимость мнимой части полного импеданса $-Im(Z)$ от его действительной части $Re(Z)$) представлен на рисунке 4. Диаграмма Найквиста представляет собой одну дугу, близкую к полуокружности, что объясняется наличием одного механизма проводимости.

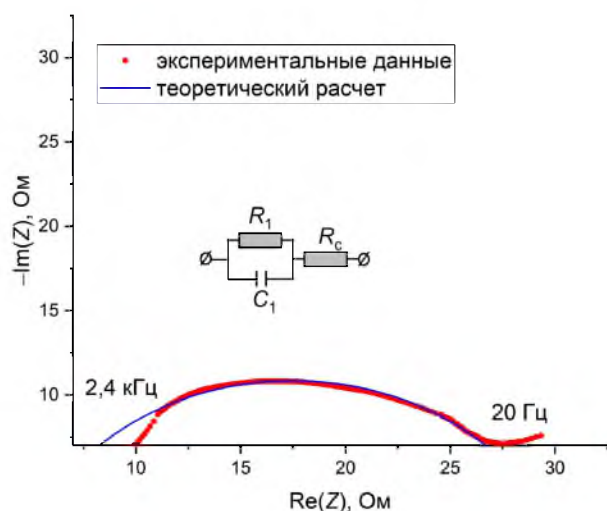


Рис. 4. Спектр импеданса и эквивалентная схема образца композитного материала системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4\text{-C}$ при комнатной температуре

Fig. 4. Impedance spectrum and equivalent circuit of a sample of composite material of the $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{SO}_4\text{-C}$ system at room temperature

Эквивалентная схема, соответствующая такой диаграмме, также приведена на рисунке. Она состоит из контура, который включает параллельно подключенные сопротивление и емкость, а также сопротивления контактов и элемента постоянной фазы. Контур R_1C_1 , предположительно, характеризует проводимость по объему зеренных глобул, которые составляют матрицу сульфата кальция. Элемент постоянной фазы (прямой участок на рисунке 4) может быть связан с протонной диффузией в образце на основе сульфата кальция, обработанного ортофосфорной кислотой, при низких частотах [16]. Величина сопротивления ($Z_{\max} = (\text{Im}(Z)^2 + \text{Re}(Z)^2)^{-1/2} = 19,7 \text{ Ом}$) указывает на существенный вклад в проводимость аморфного углерода, т. к. сульфат кальция является диэлектриком. Для примера на рисунке 5 приведен спектр импеданса в координатах Найквиста для сульфата кальция, также обработанного при температуре 90°C в течение 15 мин в 85%-м водном растворе фосфорной кислоты, но высушенного на керамической подложке. Хорошо видно, что в отсутствии аморфного углерода сопротивление меняется более чем в 10 раз, полуокружность не завершена.

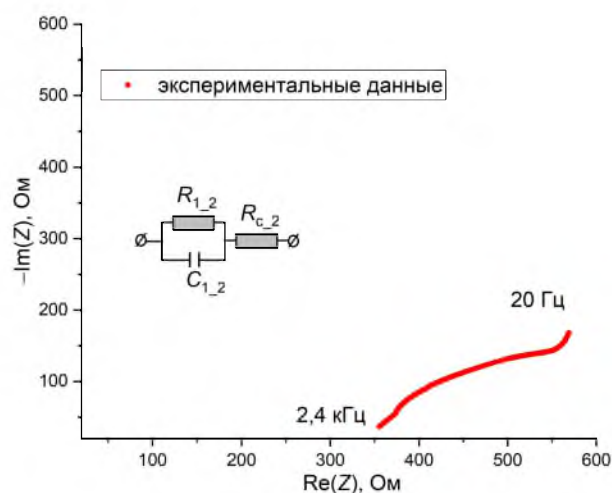


Рис. 5. Спектр импеданса образца, высушенного на керамической подложке, при комнатной температуре

Fig. 5. Impedance spectrum of a sample dried on a ceramic substrate at room temperature

Электрический импеданс модели Коула – Коула [17] на угловой частоте ω_i ($i = 1 \div N$) определяется как:

$$Z(\omega_i) = \text{Re}(Z)(\omega_i) + j\text{Im}(Z)(\omega_i) = R_\infty + \frac{R_0 - R_\infty}{1 + (R_0 - R_\infty)C(j\omega_i)^\alpha},$$

где $\text{Re}(Z)(\omega_i)$ – действительная часть полного сопротивления:

$$\operatorname{Re}(Z)(\omega_i) = R_\infty + \frac{(R_0 - R_\infty) \left(1 + \omega_i^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)}{\left(1 + \omega_i^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)^2 + \left(\omega_i^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)^2},$$

и $\operatorname{Im}(Z)(\omega_i)$ – мнимая часть полного сопротивления:

$$\operatorname{Im}(Z)(\omega_i) = - \frac{\left(\omega_i^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)}{\left(1 + \omega_i^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)^2 + \left(\omega_i^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2} (R_0 - R_\infty) C \right)^2}.$$

Коэффициент распределения времени релаксации α и время релаксации τ определяются как:

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{b}{R},$$

$$\tau = \frac{\left(\frac{R_0 - R_\infty}{Z_c - R_\infty} - 1 \right)^{1/\alpha}}{\omega_c} \arccos \frac{b}{R},$$

где ω_c – частота, на которой абсолютное значение мнимой части полного сопротивления имеет максимум. Затем в соответствии с алгоритмом [17] определяются остальные параметры:

$$R_\infty = \operatorname{Re}(Z_c) + \frac{\operatorname{Im}(Z_c)}{\operatorname{tg} \frac{\alpha\pi}{4}},$$

$$R_0 = \operatorname{Re}(Z_c) - \frac{\operatorname{Im}(Z_c)}{\operatorname{tg} \frac{\alpha\pi}{4}},$$

$$C = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha\pi}{4}}{2 \cdot \operatorname{Im}(Z_c) \omega_c^\alpha}.$$

Для исследуемого образца эти параметры были оценены как $R_\infty \approx 4,75$ Ом, $R_0 \approx 30,8$ Ом, $C \approx 0,2$ мкФ, $\alpha \approx 0,87$ и $\tau \approx 0,14$ мс.

4. Заключение. Таким образом, исследованы особенности электрических свойств композитного материала системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4\text{-C}$, полученного путем обработки сыпучего прессованного порошкообразного материала CaSO_4 85 мас.% водным раствором ортофосфорной кислоты с последующей сушкой на бумажном фильтре. Установлено, что введение углерода в систему $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4$ существенно влияет на электрофизические свойства. Наблюдается увеличение электропроводности более чем в 10 раз по сравнению с двухкомпонентной системой $\text{CaSO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4$. Механизм проводимости носит преимущественно ионный характер. Полученные результаты демонстрируют перспективность исследуемой системы для применения в электротехнических устройствах. Выявленные закономерности могут быть использованы при разработке новых функциональных материалов.

Список литературы

1. Пехотиков В.А., Смелков Г.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Анализ нормативных требований в области обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей. *Актуальные проблемы пожарной безопасности*. 2020:487–493.
2. Lei C., Simpson M.F., Virkar A.V. Investigation of ion and electron conduction in the mixed ionic-electronic conductor-La-Sr-Co-Fe-oxide (LSCF) using alternating current (AC) and direct current (DC) techniques. *Journal of the Electrochemical Society*. 2022;169:014506.
3. Ghosh S., Majhi J., Sharma S., Priya K., Bandyopadhyay A. A review on the development of electron and ion conductive polymer hydrogels and their composites for flexible and smart supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. 2023;74(B):109423.

4. Liu H.M., Saikia D., Wu C.G., Fang J., Kao H.M. Solid polymer electrolytes based on coupling of polyetheramine and organosilane for applications in electrochromic devices. *Solid State Ionics*. 2017;303:144–153.
5. Уваров Н.Ф., Пономарёва В.Г., Лаврова Г.В. Композиционные твердые электролиты *Электрохимия*. 2010;46;№7:772–784.
6. Гусейнов Р.М., Гаджиев С.М. Методы активации твердых электролитов. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2009;52;№11:3–6.
7. Wu Y., Ao X., Wang Y., Liu Y., Zhao S., Yang X., Zhou N. Innovative doping strategies for Li_2ZrC_6 solid electrolytes: A first-principles approach. *Journal of Energy Storage*. 2025;107:115017.
8. Kosir J., Mousavihashemi S., Suominen M., Kobets A., Wilson B.P., Rautama E.-L., Kallio T. Supervalent doping and its effect on the thermal, structural and electrochemical properties of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolytes. *Advanced Materials*. 2024;5:5260–5274.
9. Ali A.A.A., Acharya S., Bhongale K., Shirbhate S., Kulkarni S., Joshi S. Investigation of Sr doping effect on oxygen ion de-localization in $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ pyrochlore system and its influence on charge relaxation dynamics and ionic conductivity: as electrolyte for IT-SOFCs. *Ionics*. 2024;30:7293–7310.
10. Gupta M., Shirbhate S., Ojha P., Acharya S. Processing and conductivity behavior of La, Sm, Fe singly and doubly doped ceria: As electrolytes for IT-SOFCs. *Solid State Ionics*. 2018;320:199–209.
11. Nguyen M.H., Park S. Synergetic effect of Li-ion concentration and triple doping on ionic conductivity of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolyte. *Nanomaterials*. 2022;12:2946.
12. Yang T., Li Y., Wu W., Cao Z., He W., Gao Y., Liu J., Li G. The synergistic effect of dual substitution of Al and Sb on structure and ionic conductivity of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ceramic. *Ceramics International*. 2018;44:1538.
13. Dashjav E., Ma Q., Xu Q., Tsai C.-L., Giarola M., Mariotto G., Tietz F. The influence of water on the electrical conductivity of aluminum-substituted lithium titanium phosphates. *Solid State Ionics*. 2018;321:83–90.
14. Ivanov O.N., Trusova Ya.V. Electrical conductivity peculiarities of $\text{SrTiO}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic system. *Ceramics International*. 2016;42:5245–5249.
15. Abe Y., Nishizaki S., Muroi T., Kato Y., Hench L.L. Conversion of gypsum into a superprotonic conductor. *Materials Research Innovations*. 2006;10:93–109.
16. Nikulin I., Nikulicheva T., Vyazmin V., Ivanov O., Anosov N., Telpova O. Effect of high-temperature treatment with orthophosphoric acid on the phase composition, elemental composition, microstructure and electrical properties of calcium sulfate hemihydrate. *Journal of Solid State Chemistry*. 2026;353:125656.
17. Simic M., Jeoti V., Stojanovic G.M. Parameter extraction of the Cole-impedance model for in-situ monitoring of electrochemical sources. *Journal of Energy Storage*. 2024;77:109895.

References

1. Pekhotikov V.A., Smelkov G.I., Nazarov A.A., Gruzina O.I. Analysis of regulatory requirements in the field of fire safety of lithium-ion batteries. *Current issues of fire safety*. 2020:487–493 (In Russ.).
2. Lei C., Simpson M.F., Virkar A.V. Investigation of ion and electron conduction in the mixed ionic-electronic conductor-La-Sr-Co-Fe-oxide (LSCF) using alternating current (AC) and direct current (DC) techniques. *Journal of the Electrochemical Society*. 2022;169:014506.
3. Ghosh S., Majhi J., Sharma S., Priya K., Bandyopadhyay A. A review on the development of electron and ion conductive polymer hydrogels and their composites for flexible and smart supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. 2023;74(B):109423.
4. Liu H.M., Saikia D., Wu C.G., Fang J., Kao H.M. Solid polymer electrolytes based on coupling of polyetheramine and organosilane for applications in electrochromic devices. *Solid State Ionics*. 2017;303:144–153.
5. Uvarov N.F., Ponomareva V.G., Lavrova G.V. Composite solid electrolytes *Electrochemistry*. 2010;46;№7:772–784 (In Russ.).
6. Guseynov R.M., Gadzhiev S.M. Methods of Activation of Solid Electrolytes. *News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2009;52;№11:3–6 (In Russ.).
7. Wu Y., Ao X., Wang Y., Liu Y., Zhao S., Yang X., Zhou N. Innovative doping strategies for Li_2ZrC_6 solid electrolytes: A first-principles approach. *Journal of Energy Storage*. 2025;107:115017.
8. Kosir J., Mousavihashemi S., Suominen M., Kobets A., Wilson B.P., Rautama E.-L., Kallio T. Supervalent doping and its effect on the thermal, structural and electrochemical properties of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolytes. *Advanced Materials*. 2024;5:5260–5274.
9. Ali A.A.A., Acharya S., Bhongale K., Shirbhate S., Kulkarni S., Joshi S. Investigation of Sr doping effect on oxygen ion de-localization in $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ pyrochlore system and its influence on charge relaxation dynamics and ionic conductivity: as electrolyte for IT-SOFCs. *Ionics*. 2024;30:7293–7310.
10. Gupta M., Shirbhate S., Ojha P., Acharya S. Processing and conductivity behavior of La, Sm, Fe singly and doubly doped ceria: As electrolytes for IT-SOFCs. *Solid State Ionics*. 2018;320:199–209.
11. Nguyen M.H., Park S. Synergetic effect of Li-ion concentration and triple doping on ionic conductivity of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolyte. *Nanomaterials*. 2022;12:2946.

12. Yang T., Li Y., Wu W., Cao Z., He W., Gao Y., Liu J., Li G. The synergistic effect of dual substitution of Al and Sb on structure and ionic conductivity of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ceramic. *Ceramics International*. 2018;44:1538.
13. Dashjav E., Ma Q., Xu Q., Tsai C.-L., Giarola M., Mariotto G., Tietz F. The influence of water on the electrical conductivity of aluminum-substituted lithium titanium phosphates. *Solid State Ionics*. 2018;321:83–90.
14. Ivanov O.N., Trusova Ya.V. Electrical conductivity peculiarities of $\text{SrTiO}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic system. *Ceramics International*. 2016;42:5245–5249.
15. Abe Y., Nishizaki S., Muroi T., Kato Y., Hench L.L. Conversion of gypsum into a superprotonic conductor. *Materials Research Innovations*. 2006;10:93–109.
16. Nikulin I., Nikulicheva T., Vyazmin V., Ivanov O., Anosov N., Telpova O. Effect of high-temperature treatment with orthophosphoric acid on the phase composition, elemental composition, microstructure and electrical properties of calcium sulfate hemihydrate. *Journal of Solid State Chemistry*. 2026;353:125656.
17. Simic M., Jeoti V., Stojanovic G.M. Parameter extraction of the Cole-impedance model for in-situ monitoring of electrochemical sources. *Journal of Energy Storage*. 2024;77:109895.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 02.10.2025

Поступила после рецензирования 19.11.2025

Принята к публикации 21.11.2025

Received October 2, 2025

Revised November 19, 2025

Accepted November 21, 2025

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аносов Никита Витальевич – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Вязьмин Виталий Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Иванов Олег Николаевич – ведущий научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Никулин Иван Сергеевич – заведующий лабораторией физико-химических методов исследования растений, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Никуличева Татьяна Борисовна – заведующий лабораторией перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Тельпова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita V. Anosov – Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Vitaly V. Vyazmin – Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Oleg N. Ivanov – Leading Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Ivan S. Nikulin – Head of the Laboratory of Physical and Chemical Methods of Plant Research, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Tatiana B. Nikulicheva – Head of the Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Olga A. Telpova – Junior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

[К содержанию](#)