

**Р. А. Пимкин, Е. А. Кораблева, Д. В. Харитонов,
А. А. Анашкина**

ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ZrO_2 НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Ключевые слова: твердый электролит, химическое осаждение, комплексная стабилизирующая добавка, диоксид циркония.

В настоящее время стремительно растет потребление электроэнергии, а традиционные способы ее производства по типу электромеханических преобразователей не дают достаточную автономность и производительность. Поэтому встает острая потребность в автономных альтернативных источниках энергии. Одним из перспективных направлений являются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), в которых энергия топлива в результате химической реакции переходит в электрическую. По сравнению с обычными электромеханическими преобразователями они показывают гораздо более высокий КПД, который достигает 75 %. При этом ТОТЭ обеспечивают бесшумность работы, экологичность за счет отсутствия выбросов в атмосферу, долгосрочную стабильность и надежность, а также возможность производить энергоустановки очень высокого диапазона мощности за счет использования однотипных элементов. ТОТЭ в настоящее время уже используются во многих областях: в транспорте, в частности в автомобилях на водородном топливе; в вахтовых поселках, когда в отдаленных населенных пунктах одна установка обеспечивает электричеством целый вахтовый поселок, мощность установки может достигать 10 000 кВт в час; в портативных источниках тока; в коммунальном хозяйстве; в катодной защите на газопроводе. Твердый электролит является основой ТОТЭ, поэтому эффективность его работы во многом зависит от характеристик твердого электролита. В данной работе рассмотрены физико-химические закономерности синтеза порошков на основе ZrO_2 с комплексной стабилизирующей добавкой из оксидов иттрия и скандия, обладающих свойствами, необходимыми для спекания и создания плотной структуры твердого электролита и достижения высоких значений ионной проводимости. Проведен сравнительный анализ исходных порошков, полученных тремя разными способами химического осаждения. Исследована ионная проводимость твердого электролита в зависимости от способа получения и состава исходного материала. Экспериментально показано влияние способа химического осаждения и вводимых стабилизирующих добавок на конечные свойства твердого электролита.

**R. A. Pimkin, E. A. Korableva, D. V. Kharitonov,
A. A. Anashkina**

EFFECT OF CHEMICAL PRECIPITATION METHODS FOR ZrO_2 -BASED POWDERS ON THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF SOLID ELECTROLYTES

Keywords: solid electrolyte, chemical precipitation, the complex stabilizing additive, zirconium dioxide.

Now promptly electricity consumption grows, and traditional ways of electricity generation as electromechanical converters do not give sufficient autonomy and productivity. Therefore, there is sharp need for autonomous alternative energy sources. One of the perspective directions are solid oxide fuel cells (TOTE) in which energy of fuel as a result of chemical reaction passes into electric. In comparison with normal electromechanical converters, they show much higher efficiency which reaches 75%. At the same time TOTE provide noiselessness of work, environmental friendliness due to lack of atmospheric emissions, long-term stability and reliability, and also opportunity to make power stations of very high range of power due to use of the same elements. TOTE are already used in many areas now: in transport, in particular in electric vehicles on hydrogen fuel; in working camps when in the remote human settlements one installation provides with electricity the whole working camp, plant capacity can reach 10 000 kW an hour; in portable sources of current; in municipal services; in the cathode protection on the gas pipeline. Solid electrolyte are TOTE basis therefore efficiency of its work in many respects depends on characteristics of solid electrolyte. In this work physical and chemical patterns of synthesis of powders on the basis of ZrO_2 with the complex stabilizing additive from the yttrium oxides and scandium having the properties necessary for agglomeration and creation of dense structure of solid electrolyte and obtaining high values of ionic conduction are considered. Comparative analysis of the initial powders received by three different ways of chemical precipitation is carried out. Ionic conduction of solid electrolyte depending on way of receiving and structure of starting material is investigated. Influence of way of chemical precipitation and the entered stabilizing additives on final properties of solid electrolyte is experimentally shown.

Введение

На протяжении последних десятилетий существует острая потребность в автономных альтернативных источниках энергии. Сегодня в энергетической промышленности основное производство энергии происходит благодаря электромеханическим преобразователям за счет преобразования тепловой энергии, получаемой от сгорания топлива, в механическую, а затем в электрическую энергию. Средняя эффективность тепловых электростанций находится

в пределах 35-45%. Наиболее эффективные комбинированные циклы электростанций достигают эффективности 60-62%, что считается почти максимально возможным с учетом существующих технологий и экономических соображений [1-4].

Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) являются перспективной заменой традиционным электромеханическим преобразователям (ЭМП). Эти устройства, в результате химической реакции, напрямую преобразуют энергию топлива в электричество.

Они обладают бесшумной работой, экологичностью за счет отсутствия выбросов в атмосферу, долгосрочной стабильностью и возможностью производить энергоустановки очень высокого диапазона мощности за счет использования однотипных элементов. Маломасштабные установки топливных элементов достигают эффективности около 60%, в то время как крупномасштабные гибридные системы могут достигать 75% эффективности.

В настоящее время топливные элементы используются во многих областях, где нужен автономный источник тока: в транспорте, в частности в электромобилях на водородном топливе; в вахтовых поселках; портативных источниках тока; коммунальном хозяйстве; для катодной защиты на газопроводе [5].

ТОТЭ состоит из пористого катода, пористого анода и газоплотного твердого электролита, который разделяет их. Реакция восстановления кислорода протекает на катоде, на аноде идет реакция окисления топлива, продуктом реакции является вода. Общая реакция выглядит, как при обычном горении водорода. В результате того, что реакция протекает в среде электролита, помимо тепла вырабатывается электрический ток. В основе работы ТОТЭ лежит твердый электролит, который в основном изготавливают из диоксида циркония [6]. Для обеспечения ионной проводимости материал твердого электролита должен иметь кубическую кристаллическую структуру. В связи с тем, что диоксид циркония обладает свойством обратного полиморфизма, то для устойчивости кубической структуры, его стабилизируют путем введения оксидов различных металлов [7].

В качестве стабилизатора кубической модификации ZrO_2 чаще всего используют Y_2O_3 . Материалы на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия ($ZrO_2 - Y_2O_3$), обладают структурой со стабильной кубической фазой диоксида циркония, однако для обеспечения достаточной проводимости им необходима рабочая температура не менее 1000 °С, что сокращает срок службы ТОТЭ в связи с быстрым износом металлических интерконнекторов и других составных элементов ТОТЭ. В литературе есть сведения о том, что более высокий уровень ионной проводимости по сравнению $ZrO_2 - Y_2O_3$ имеют материалы, изготавливаемые из $ZrO_2 - Sc_2O_3$, что позволяет, кроме того, снизить и рабочую температуру ТОТЭ. Однако в материалах $ZrO_2 - Sc_2O_3$ наблюдается нестабильность кубической фазы ZrO_2 , которая при температуре при 1000 °С переходит в тетрагональную, что приводит к деградации свойств в процессе эксплуатации [8-12].

Таким образом, целью данного исследования является определение физико-химических закономерностей синтеза порошков на основе ZrO_2 с комплексной стабилизирующей добавкой из оксидов иттрия и скандия, обладающих свойствами, необходимых для спекания, создания плотной структуры и получения высоких значений ионной проводимости твердых электролитов. Высокая ионная проводимость мате-

риалов обеспечивается введением Sc_2O_3 , а стабильность кубической фазы при рабочих температурах обеспечивается введением Y_2O_3 .

Экспериментальная часть

Исходными веществами для получения порошка ZrO_2 стабилизированного Y_2O_3 и Sc_2O_3 служили хлористые соли циркония, иттрия и скандия. В данной работе синтез необходимых керамических нанокристаллических порошков производился методом прямого соосаждения аморфных гидроксидов из растворов хлористых солей, при котором 3 %-й раствор аммиака приливали с определенной скоростью к раствору хлористых солей циркония и стабилизирующим добавкам солей иттрия и скандия. В результате реакции осаждения образовывалась гелеобразная смесь гидроксидов. Технологическая схема получения порошков, методом химического осаждения из хлористых солей приведена на рис. 1.

Метод осаждения в химическом реакторе позволяет регулировать морфологические характеристики частиц порошка на стадии осаждения и обеспечивает равномерность распределения вводимых добавок. Контролируемый процесс удаления физически и химически связанной воды при переводе осажденных гидроксидов в оксиды позволяет получать частицы порошка с контролируемой степенью агломерации [13-16].

Исходные порошки получали тремя способами (табл.1). В первом способе (ZrScY-1) состав осаждался из водных растворов солей циркония, иттрия и скандия. Во втором способе (ZrScY-2) нитрат скандия добавлялся после сушки в роторном испарителе порошка, полученного химическим осаждением из раствора солей циркония и иттрия. В третьем способе (ZrScY-3) состав получали методом химического осаждения из смеси твердых солей циркония, иттрия и скандия. Количество компонентов при получении порошков каждым из трех способов было одинаковым.

Механоактивация порошка производилась помолом в бисерной мельнице при 5000 оборотах в минуту в течении 2 часов. Обожженный порошок массой 200 г смешивался с 155 мл дистиллированной воды до получения сметанообразной массы. Далее суспензия загружалась в барабан бисерной мельницы, в который добавлялось 190 мл керамического бисера из ZrO_2 диаметром 1 мм. По окончании помола суспензия извлекалась из барабана при помощи сжатого воздуха и сушилась на воздухе. Затем высушенная масса протиралась через микронную капроновую сетку с размером ячеек 0,056 мм.

Согласно результатам определения гранулометрического состава методом лазерной дифракции (табл. 2), размер агломератов в порошке состава ZrScY-3, полученного методом химического осаждения из твердой фазы, заметно меньше, чем в порошках состава ZrScY-1 и ZrScY-2, полученные методом химического осаждения из растворов. Следовательно, порошок данного состава имеет менее прочные и более пористые агломераты, которые разрушаются до 1-2 мкм при бисерном помоле.

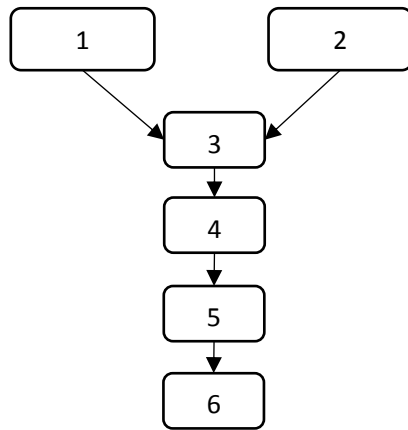


Рис. 1 – Технологическая схема получения порошков, методом химического осаждения из хлористых солей: 1 - проведение реакции химического осаждения гидроксидов циркония, иттрия и скандия из растворов солей, 2 - проведение реакции химического осаждения гидроксидов циркония, иттрия и скандия из твердых солей, 3 - отмывка осажденных гелей от хлористых солей методом декантации дистиллированной водой до pH=6, 4 - отделение твердой фазы от жидкой методом выпаривания в роторном испарителе, 5 - сушка порошков гидроксидов циркония, иттрия и скандия в сушильном шкафу, 6 - термообработка при 1200°C с выдержкой 4 часа

Fig. 1 – Flowchart of the process for producing powders by chemical precipitation from chloride salts: 1 - carrying out the chemical precipitation of zirconium, yttrium, and scandium hydroxides from salt solutions, 2 - Chemical precipitation of zirconium, yttrium, and scandium hydroxides from solid salts, 3 - Washing the precipitated gels to remove chloride salts by decanting with distilled water to pH = 6, 4 - separating the solid phase from the liquid phase by evaporation in a rotary evaporator, 5 - drying the zirconium, yttrium, and scandium hydroxide powders in an oven, 6 - heat treatment at 1200 °C for 4 hours

**Таблица 1 – Способы химического осаждения
Table 1 – Chemical Deposition Methods**

ZrScY-1	ZrScY-2	ZrScY-3
Хим. осаждение из растворов		Хим. осаждение из твердой фазы
Исходные вещества: 2500 г ZrOCl ₂ *8H ₂ O, 48 г YCl ₃ *6H ₂ O и 369 г Sc(NO ₃) ₂ *4H ₂ O, которые предварительно растворили в воде до получения раствора		Исходные вещества: 2500 г ZrOCl ₂ *8H ₂ O, 48 г YCl ₃ *6H ₂ O и 369 г Sc(NO ₃) ₂ *4H ₂ O, взятые в виде сухой смеси солей

Для получения твердого электролита из наноструктурного порошка был выбран способ пленочного литья шликера на движущуюся подложку. Сам шликер представляет собой густую суспензию, которая состоит из смеси керамического порошка и временной технологической связки (ВТС). ВТС для пленочного литья состоит из следующих компонентов:

- связующее, которое соединяет и удерживает частицы порошка после получения пленки;
- растворители, необходимые для растворения связующего и других компонентов ВТС;
- пластификатор, необходимый для обеспечения эластичности пленки после удаления растворителей при литье и сушке пленки;
- ПАВ, для улучшения смачиваемости частиц керамического порошка, а также увеличения стабильность шликера.

Таблица 2 – Гранулометрический состав частиц порошков

Table 2 – Particle size distribution of the powders

Содержание, %	Диаметр частиц агломератов, мкм					
	ZrScY - 1		ZrScY - 2		ZrScY - 3	
	До по-мола	После помола	До по-мола	После помола	До по-мола	После помола
5	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
10	1,2	0,5	1,7	0,4	0,6	0,3
25	1,8	1,2	3,6	0,6	2,0	0,6
50	3,9	1,9	8,9	1,2	2,5	1,2
75	9,1	2,7	12,1	1,8	5,6	1,7
90	17,9	4,3	18,7	3,7	10,3	1,9
99	21,0	6,0	34,0	4,5	15,7	2,1

В качестве связующего выбран поливинилбутираль (ПВБ) марки ПШ-1 из-за его высоких пленкообразующих свойств. Растворителем служил этиловый спирт, без остатка растворяющий ПВБ и улучшающий смачиваемость частиц керамического порошка ПАВ. Также для разбавления шликера до оптимальной вязкости использован второй растворитель, которым являлся трихлорэтилен.

В качестве пластификатора применяли дибутилфталат марки «Ч», поскольку он обладает высокими пластифицирующими свойствами, малой летучестью и способствует более легкому отделению готовой пленки от движущей ленты. В качестве ПАВ взят полиоксиэтилен – алкиламид марки «Синтаид – 5». Данная добавка позволила повысить адгезию ПВБ с твердыми частицами порошка, благодаря чему количество связующего снизилось до 2,8 мас %.

Состав порошка с временной технологической связкой (ВТС) представлен в таблице 3.

Получение готового шликера проводилось путем перемешивания в планетарном миксере в течении 90 секунд для удаления пузырьков газа.

Литье готового шликера производилось на движущуюся майларовую подложку, изготовленную из полиэтилентерефталата на установке ленточного литья. Шликер подавался через дозирующее устройство из резервуара. В свою очередь толщина пленки регулировалась изменением расстояния от металлического ракеля до поверхности подложки. Поскольку на толщину пленки влияет скорость подачи конвейером майларовой подложки для получения пленки толщиной 260-280 мкм выбрана скорость движения конвейера 0,3 м/ч.

Таблица 3 – Состав порошка с временной технологической связкой (ВТС)**Table 3 – Composition of powder with temporary binder (TB)**

№ компонента	Название компонента шликера	Количество, %
1	Порошок диоксида циркония, стабилизированный оксидами скандия и иттрия	65-68
2	Поливинилбутираль (ПВБ)	2,5-2,7
3	Дибутилфталат (ДФБ)	2,8-3,0
4	Этиловый спирт	8 - 8,5
5	Трихлoэтиллен	16 - 18
6	Синтаמיד	0,06-0,08

Далее полученная сырая пленка из нанокристаллических порошков на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами иттрия и скандия, была разрезана на квадраты размером 60 x 60 мм на специализированной установке. Следующий этап заключался в нанесении металлизированного покрытия на вырезанные образцы. Для этого использовалась платиновая паста, которая наносилась методом трафаретной печати. Платиновая паста состояла из 65% непосредственно порошка платины, 7% порошка диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия и скандия, 3% связующего ПВБ и терпинеола в качестве растворителя.

Спекание образцов проводили в высокотемпературной печи с нагревателями из дисилицида молибдена при 1600-1700°C на пористых подложках из оксида алюминия, имеющих открытую пористость 40%. Для сохранения необходимых условий сверху образцы накрывали такой же подложкой. При температуре до 1000° С происходило выгорание ВТС в пленке и пасте, далее с повышением температуры протекал процесс твердофазного спекания частиц диоксида циркония.

Окончательной целью спекания являлось получение плотной структуры с максимальной плотностью и открытой пористостью до 0,02%.

Результаты измерения физико-химических свойств исследуемых образцов после спекания представлены в таблице 4. Плотность и пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания при нормальных условиях.

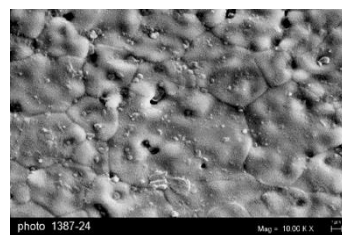
Микроструктура спеченных образцов изображена на рисунке 2.

Определение ионной проводимости полученных образцов твердых электролитов при нагреве до 1000°C проводили четырехзондовым методом. При температуре около 450 °С у образцов твердого электролита появлялась ионная проводимость, при дальнейшем нагреве с шагом в 50 °С приборы фиксировали показания проводимости. На графике (рис. 3) представлены значения удельного сопротивления и удельной

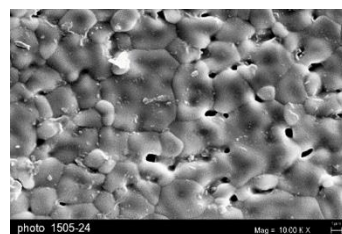
проводимости образцов твердых электролитов при разных температурах.

Таблица 4 – Результаты измерения физико-химических свойств исследуемых образцов после спекания**Table 4 – Results of measurements of the physico-chemical properties of the tested samples after sintering**

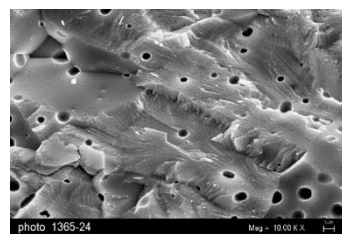
Номер партии	Режим спекания Tmax, С (ч)	Свойства спеченных образцов		
		Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Фазовый состав, %
ZrScY-1	1600 (2ч)	5,56	3,5	Куб-100
	1700 (2ч)	5,74	0,01	Куб-100
ZrScY-2	1600 (2ч)	5,48	2,7	Куб-100
	1700 (2ч)	5,75	0,01	Куб-100
ZrScY-3	1600 (2ч)	5,80	0,01	Куб-100
ZrY-8	1700 (2ч)	5,79	0,02	Куб-100
Куб- кубическая кристаллическая модификация ZrO ₂				



а

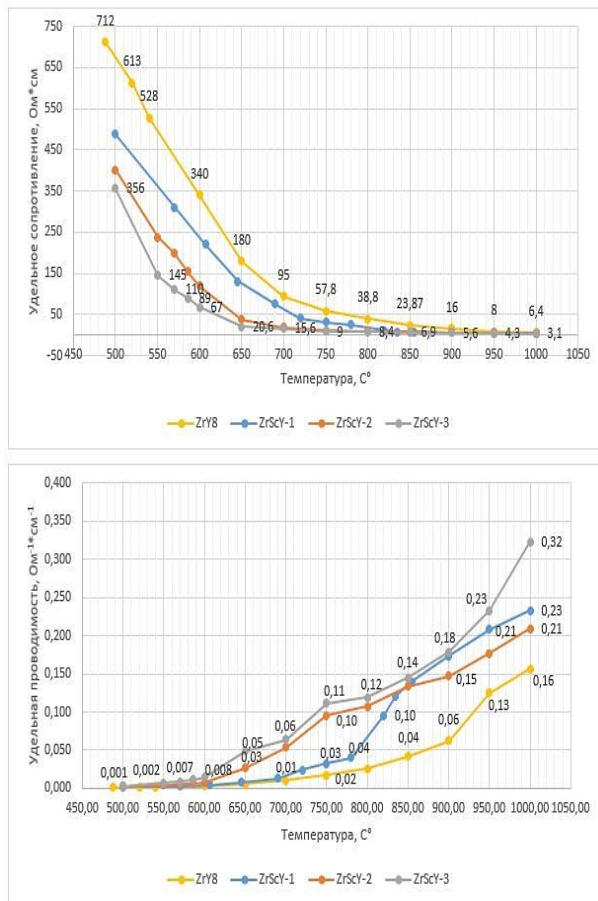


б



в

Рис. 2 – Микроструктура спеченных образцов при увеличении 10 000×: а – ZrScY-1; б – ZrScY-2; в – ZrScY-3**Fig. 2 – Microstructure of sintered samples at 10,000× magnification: а – ZrScY-1; б – ZrScY-2; в – ZrScY-3**



- T.V. Volkova, *Materials Letters*, 205, 186-189 (2017). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.06.059.
13. Е.А. Шокодько, А.И. Ситников, А.В. Шокодько, А.И. Огарков, С.С. Стрельникова, А.С. Чернявский, К.А. Солнцев, *Перспективные материалы*, 12, 67-72 (2024). DOI: 10.30791/1028-978X-2024-12-67-72.
 14. В.В. Осико, Е.Е. Ломонова, *Вестн. РАН*, 82, 9, 790-800 (2012).
 15. M. Singh, D. Zappa, E. Comini, *Int. J. Hydrogen Energy*, 46(54), 27643 - 27674 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.020.
 16. Ю. А. Митюшова, С. А. Красиков, А. А. Марков, Э.И. Денисова, В.В. Карташов, *Бутлеровские сообщения*, 58, 5, 105-109 (2019).
 7. O. V. Tiunova, O. Yu. Zadorozhnaya, Yu. K. Nepochatov, I. N. Burmistrov, I. E. Kuritsyna, S. I. Bredikhin, *Electrochemistry*, 50, 8, 801 (2014). DOI: 10.7868/S0424857014080155.
 8. D. V. Kharitonov, E. A. Korableva, D. O. Lemeshev, A. A. Anashkina, *Special Ceramic Refractories. High-Temperature Materials Based on Zirconium Dioxide*, Moscow: D.I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2024. 156 pp.
 9. E.E. Lomonova, D.A. Agarkov, M.A. Borik, G.M. Korableva, A.V. Kulebyakin, I.E. Kuritsyna, M.N. Mayakova, F.O. Milovich, V.A. Myzina, N.Yu. Tabachkova, E.I. Chernov, *Electrochemistry*, 58, 2, 66-75 (2022). DOI: 10.31857/S0424857022020074.
 10. E.A. Korableva, A.A. Anashkina, D.O. Lemeshev, D.Yu. Zhukov, *Nonferrous Metals*, 10, 13-20 (2021). DOI: 10.17580/tsm.2021.10.01.
 11. E.A. Korableva, D.V. Kharitonov, A.A. Anashkina, D.O. Lemeshev, *Nonferrous Metals*, 10, 61-66 (2019). DOI: 10.17580/tsm.2019.10.10.
 12. M.A. Borik, A.V. Kulebyakin, E.E. Lomonova, V.A. Myzina, V.V. Osiko, S.I. Bredikhin, I.E. Kuritsyna, V.T. Bublik, F.O. Milovich, N.Y. Tabachkova, P.A. Ryabochkina, T.V. Volkova, *Materials Letters*, 205, 186-189 (2017). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.06.059.
 13. E.A. Shokodko, A.I. Sitnikov, A.V. Shokodko, A.I. Ogarkov, S.S. Strelnikova, A.S. Chernyavsky, K.A. Solntsev, *Promising Materials*, 12, 67-72 (2024). DOI: 10.30791/1028-978X-2024-12-67-72.
 14. V.V. Osiko, E.E. Lomonova, *Vestnik RAN*, 82, 9, 790-800 (2012).
 15. M. Singh, D. Zappa, E. Comini, *Int. J. Hydrogen Energy*, 46(54), 27643-27674 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.020.
 16. Yu. A. Mityushova, S. A. Krasikov, A. A. Markov, E. I. Denisova, V. V. Kartashov, *Butlerovskie Soobshcheniya*, 58, 5, 105-109 (2019).

References

1. A.V. Nikonov, A.S. Kaigorodov, K.A. Kuterbekov, K.Zh. Bekmyrza, *Inorganic Materials*, 53, 9, 957-962 (2017). DOI: 10.7868/S0002337X17090081.
2. R.A. Pimkin, Yu.A. Perkin, *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 37, 5, 90-92 (2023).
3. Yu. N. Zaitseva, S. D. Kirik, A. S. Samoilo, P. S. Dubinin, O. E. Bezrukova, A. N. Zaloga, S. G. Ruzhnikov, I. S. Yakimov, *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 15, 1, 22-31 (2022). DOI: 10.17516/1998-2836-0268.
4. V. P. Danilov, E. S. Borisova, V.E. Shukshin, K.I. Runina, P.V. Strekalov, M.N. Mayakova, O.B. Petrova, *Glass and Ceramics*, 81, 9-10, 428-434 (2025). DOI: 10.1007/s10717-025-00722-4.
5. E. A. Agarkova, M. A. Borik, A. V. Kulebyakin, I. E. Kuritsyna, E.E. Lomonova, F.O. Milovich, V.A. Myzina, V.V. Osiko, N.Yu. Tabachkova, *Inorganic Materials*, 55, 7, 793-798 (2019). DOI: 10.1134/S0002337X19070029.
6. O. Yu. Zadorozhnaya, E. A. Agarkova, O. V. Tiunova, Yu. K. Nepochatov, *Electrochemistry*, 56, 2, 133-140 (2020). DOI: 10.31857/S0424857020020139.

© **Р. А. Пимкин** – аспирант кафедры Химической технологии керамики и огнеупоров (ХТКО), Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева), Москва, Россия, pimkin-roma@mail.ru; **Е. А. КорABLEVA** – канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Калужская область, Россия; **Д. В. Харитонов** – д-р техн. наук, доцент кафедры ХТКО, РХТУ им. Д.И. Менделеева; **А. А. Анашкина** – канд. техн. наук, начальник лаборатории, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

© **R. A. Pimkin** – PhD-student of the department of Chemical Technology of Ceramics and Refractory Materials (CTCRM), D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (D.I. Mendeleev RUCT), Moscow, Russia, pimkin-roma@mail.ru; **E. A. Korableva** – PhD (Technical sci.), Lead Process Engineer, A.G. Romashin ONPP “Tekhnologiya” JSC, Obninsk, Kaluga Region, Russia; **D. V. Kharitonov** - Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate professor of the CTCRM department, D.I. Mendeleev RUCT; **A. A. Anashkina** – PhD (Technical Sci.), Head of Laboratory, A.G. Romashin ONPP “Tekhnologiya” JSC.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 02.03.26.