

## НИКЕЛЬ-КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

© Д. А. Осинкин<sup>1,2</sup>, В. Д. Журавлев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН,  
620137, г. Екатеринбург, ул. Академическая, д. 20

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

<sup>3</sup> Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН,  
620990, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, д. 91

E-mail: OsinkinDA@mail.ru

Поступила в Редакцию 23 апреля 2019 г.

После доработки 22 ноября 2019 г.

Принята к публикации 14 декабря 2019 г.

*Композитные порошки состава 66 мас% NiO + 34 мас% Zr<sub>0.84</sub>Y<sub>0.16</sub>O<sub>1.92</sub> были получены методом Solution Combustion Synthesis кристаллизацией частиц оксида никеля на поверхности частиц Zr<sub>0.84</sub>Y<sub>0.16</sub>O<sub>1.92</sub>. Спрессованные из порошков образцы после спекания и восстановления во влажном водороде имели высокую электропроводность, более 16·10<sup>3</sup> См·см<sup>-1</sup> при комнатной температуре. Импеданс-спектроскопические исследования показали, что в атмосфере влажного водорода Ni-Zr<sub>0.84</sub>Y<sub>0.16</sub>O<sub>1.92</sub> электроды, сформированные на поверхности плотного Zr<sub>0.84</sub>Y<sub>0.16</sub>O<sub>1.92</sub> электролита, имеют низкую электрохимическую активность. Импрегнирование электродов раствором нитрата церия с последующим термолизом позволило повысить электрохимическую активность электрода на два-три порядка. Анализ спектров электрохимического импеданса через расчет функции распределения времени релаксации показал, что скорость окисления водорода на электродах ограничена поверхностно-адсорбционными процессами. После импрегнирования газодиффузионное сопротивление существенно ограничивает скорость электродной реакции.*

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент; никель-керамический анод; импеданс; функции распределения времени релаксации; импрегнирование

DOI: 10.31857/S004446182002019X

Одним из эффективных способов получения электроэнергии является прямое окисление газообразных веществ в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ) [1, 2]. Конструктивно ТОТЭ, как правило, состоит из газоплотного кислородпроводящего электролита и двух электродов, сформированных на противоположных сторонах электролита. На один из

электродов (анод) подается топливный газ, на другой (катод) — окислитель.

Перспективным направлением в области разработок ТОТЭ является использование тонкопленочных электролитов толщиной несколько микрометров, что позволяет существенно снизить омическое сопротивление топливного элемента и повысить его мощ-

ностные характеристики. В силу технологических особенностей изготовления тонкого слоя электролита его формирование необходимо проводить на несущей основе. В подавляющем большинстве случаев в качестве несущей основы выступает пористый катод [3–5] или анод [6–8] толщиной 0.5–1 мм.

Не менее перспективным направлением является использование высокопроводящих электролитных несущих слоев толщиной около 300 мкм, которые обеспечивают механическую прочность элемента. В этом случае электроды формируются на поверхности электролита в виде тонких пористых покрытий толщиной 30–50 мкм. Из-за малой толщины электрода его сопротивление вдоль поверхности (сопротивление электродного слоя) будет высоко, что впоследствии негативно скажется на мощностных характеристиках ТОТЭ. Следовательно, для изготовления тонких электродов необходимо использовать материалы с высоким уровнем электропроводности. Ранее было показано [9], что изготовление  $\text{NiO-Zr}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{O}_{1.92}$  композитов, которые являются основным материалом для изготовления анодов ТОТЭ, осаждением оксида никеля на керамический порошок позволяет получить электроды с высокой проводимостью. Однако было обнаружено [10], что такие электроды обладают высоким поляризационным сопротивлением.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения поляризационного сопротивления электродов

является введение в них активных добавок методом пропитки (импрегнирование) [11, 12]. В случае никель-керамических электродов в роли активной добавки в основном используют оксид церия [13, 14], который в условиях работы анода ТОТЭ обладает высоким уровнем смешанной проводимости.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния оксида церия на электрохимическую активность 61 мас% Ni + 39 мас%  $\text{Zr}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{O}_{1.92}$  анода, полученного кристаллизацией частиц оксида никеля на поверхности частиц  $\text{Zr}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{O}_{1.92}$ .

### Экспериментальная часть

На первом этапе изготовления композитных порошков был синтезирован  $\text{Zr}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{O}_{1.92}$  (YSZ) электролит, методика синтеза которого описана в [15]. Композитные порошки состава 66 мас% NiO + 34 мас% YSZ (далее NiO-YSZ) получали методом Solution Combustion Synthesis (SCS). В раствор нитрата никеля с глицином вносили при перемешивании расчетное количество порошка YSZ. В процессе нагревания и выпаривания воды из реакционной смеси исходных соединений происходило формирование ксерогеля, имеющего в своем составе не только комплексы глицин-нитрата никеля, но и инертные частицы YSZ. В результате окислительно-восстановительной реакции формирование частиц никеля происходило в основном на поверхности частиц YSZ:



Уравнение (1) записано при стехиометрическом соотношении окислителя и восстановителя. В условиях эксперимента количество глицина было уменьшено на 10% с целью снижения интенсивности горения и предотвращения образования металлического никеля. Полученные в результате горения порошки обжигали при 800°C в течение 4 ч в атмосфере воздуха.

Фазовый состав материалов контролировали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D-Max 2200 (Rigaku) в  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучении с монохроматором при комнатной температуре. Микроструктуру порошков и электродов изучали при помощи растрового электронного микроскопа MIRA 3 LMU (Tescan) с системой микроанализа INCA Energy 350 с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-MAX 80.

Измерение электропроводности выполнено на образцах в виде брусков размерами около  $3 \times 0.4 \times 0.2$  см. Для изготовления образцов порошки

прессовали и затем спекали при 1400°C в течение 2 ч в воздушной атмосфере. На поверхности спеченных образцов были изготовлены четыре зонда из платиновой проволоки, два из которых (токовые зонды) размещали вблизи торцов образца, а два потенциальных зонда были размещены на небольшом удалении от токовых и смещены к центру образца. Место контакта каждого зонда с образцом покрывали платиновой пастой и проводили обжиг при 950°C в течение 1 ч в атмосфере воздуха. Далее, не охлаждая образцы, проводили их восстановление. Для этого внутренний объем печи продували аргоном, далее смесью 5 об%  $\text{H}_2 + \text{Ar}$  и затем влажным (3 об%  $\text{H}_2\text{O}$ ) водородом с двухчасовой выдержкой.

Для исследования электрохимической активности электродов были изготовлены симметричные ячейки на несущем  $\text{Zr}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{O}_{1.92}$  электролите. Электродные пасты были приготовлены из смеси порошка NiO-YSZ, изопропилового спирта и поливинилбутираля. Электроды наносили на электро-

лит методом окрашивания, сушили при 100°C и припекали при 1400°C в течение 2 ч в воздушной атмосфере. Скорость нагрева и охлаждения составляла 150 град·ч<sup>-1</sup>. После припекания электродов печь охлаждали до 950°C и проводили восстановление образцов. Процедура восстановления была аналогична описанной выше. Толщина электрода после припекания и восстановления составляла около 30 мкм.

После восстановления электроды некоторых образцов пропитывали насыщенным водным раствором нитрата церия с последующим его термоллизом в атмосфере влажного водорода при 900°C в течение 1 ч.

Измерения электропроводности проводили четырехзондовым методом на постоянном токе при помощи EI-1287 (Solartron). Электрохимические исследования выполнены методом импедансной спектроскопии при помощи анализатора частотного отклика FRA-1260 и EI-1287 (Solartron). Все измерения выполнены в атмосфере влажного водорода в интервале температур 700–900°C. Схема организации эксперимента приведена в [16].

### Обсуждение результатов

Аттестацию фазового состава NiO-YSZ проводили на порошках, прошедших высокотемпературный обжиг при температуре 1400°C в течение 2 ч в атмосфере воздуха, что соответствует температуре изготовления образцов и припекания электродов. По данным рентгенофазового анализа (рис. 1) в композитном порошке не обнаружено примесных фаз. Микроскопические исследования композитного порошка показали, что он имеет рыхлую, губкообраз-

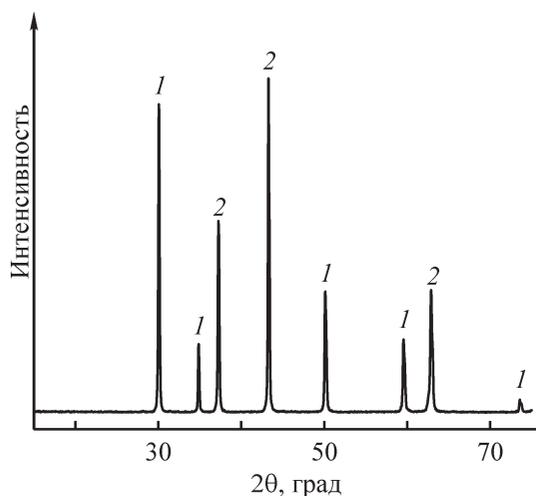


Рис. 1. Рентгенограмма порошка 66 мас% NiO + 34 мас% YSZ. 1 — рефлексы фазы YSZ, 2 — NiO.

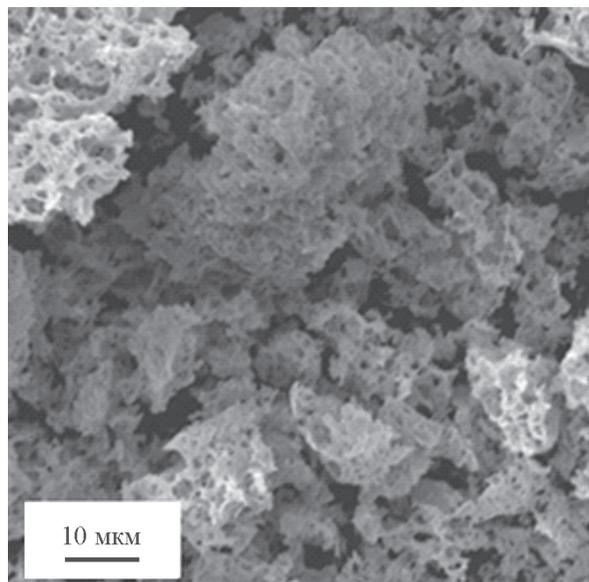


Рис. 2. Микрофотография порошка 66 мас% NiO + 34 мас% YSZ.

ную структуру (рис. 2). Как было показано ранее [9], рыхлая структура никель-керамических порошков позволяет изготавливать аноды с высокой пористостью без использования порообразователей. Высокая пористость никель-керамических анодов положительно сказывается на мощностных характеристиках топливных элементов, так как уменьшается сопротивление, связанное с диффузией газа в порах электрода.

Исследуемый 61 мас% Ni + 39 мас% YSZ композит (состав указан после восстановления, далее Ni-YSZ) имеет высокую электропроводность, около  $16 \cdot 10^3 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$  (см. таблицу). Это более чем в 2 раза выше электропроводности образца состава 50 мас% Ni + 50 мас% YSZ, приготовленного аналогичным образом, и примерно в 3 раза выше по сравнению с образцом состава 50 мас% Ni + 50 мас% YSZ, приготовленного методом сжигания стехиометрического раствора (без осаждения оксида никеля на частицы YSZ) [9]. Такое различие в электропроводности можно объяснить способом изготовления порошков. Поскольку электропроводность Ni-YSZ полностью определяется матрицей из металлического никеля

Значения электропроводности восстановленных никель-керамических образцов

Образец	Электропроводность, См·см <sup>-1</sup>
50 мас% Ni + 50 мас% YSZ	5521 [9]
50 мас% Ni + 50 мас% YSZ	7731 [9]
61 мас% Ni + 39 мас% YSZ	16512

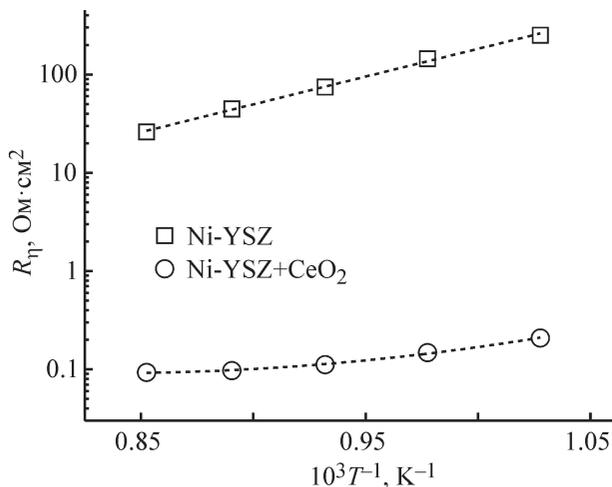


Рис. 3. Температурные зависимости поляризационного сопротивления Ni-YSZ электрода в атмосфере влажного водорода.

в объеме анода, при кристаллизации частиц оксида никеля на поверхности частиц YSZ с последующим спеканием и восстановлением реализуется более развитый металлический контакт в объеме электрода.

Несмотря на высокую электропроводность, электрохимическая активность Ni-YSZ электрода оказалась низкой. Поляризационное сопротивление при 900°C в атмосфере влажного водорода составило око-

ло 25 Ом·см<sup>2</sup> и около 200 Ом·см<sup>2</sup> при 700°C (рис. 3). Высокие значения поляризационного сопротивления, как и высокая электропроводность, обусловлены особенностью изготовления никель-керамического порошка. В Ni-YSZ электроде электрохимическая реакция локализована на трехфазной границе газ/электрод/электролит [17–19]. Осажденный на поверхности YSZ-частиц оксид никеля блокирует контакт между частицами YSZ, что негативно сказывается на переносе ионов кислорода в объеме электрода и приводит к высоким значениям поляризационного сопротивления.

После введения оксида церия в электрод его поляризационное сопротивление уменьшилось более чем на два порядка (рис. 3), до величин около 0.1 Ом·см<sup>2</sup> при 900°C и 0.2 Ом·см<sup>2</sup> при 700°C. При наличии частиц оксида церия в аноде электрохимическая реакция в основном протекает на их поверхности, а не только на трехфазной границе. Также столь существенному увеличению активности электродов способствует равномерное распределение частиц оксида церия в объеме электрода, что хорошо видно из результатов микроэлементных исследований поперечного сечения образца (рис. 4).

Существенное изменение электрохимической активности электрода после введения оксида церия

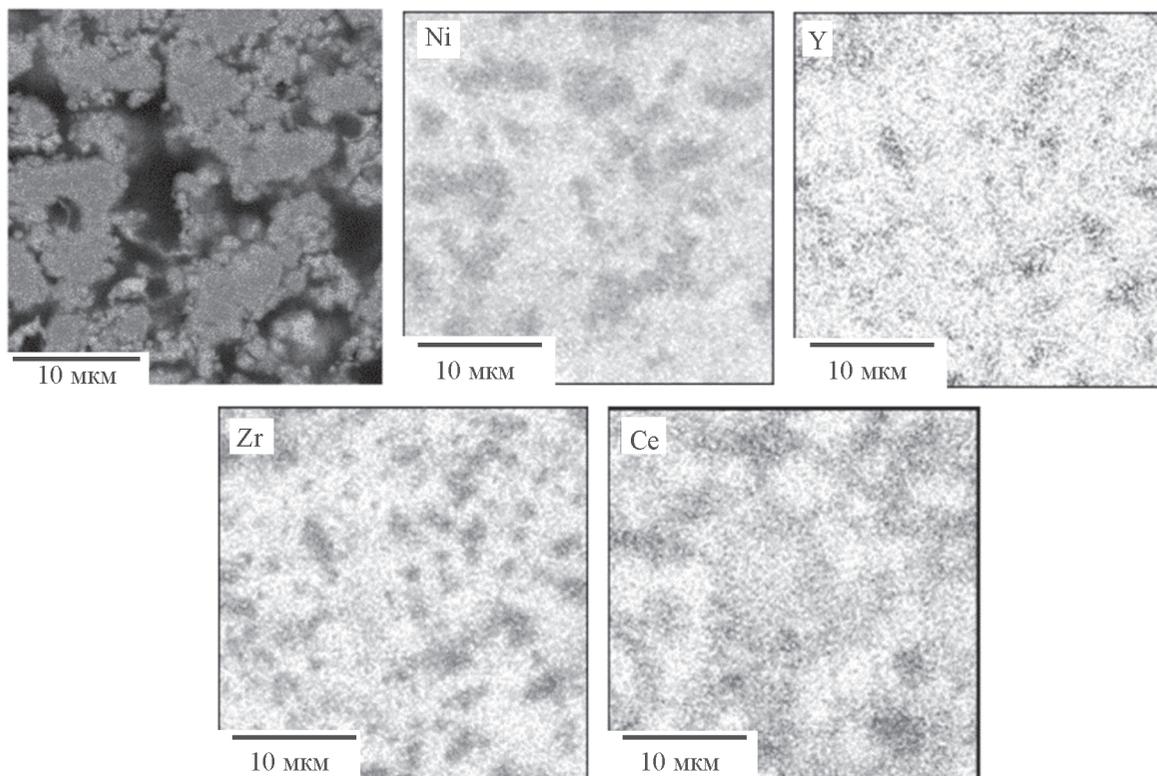


Рис. 4. Распределение элементов по площади в импрегнированном оксидом церия Ni-YSZ электроде.

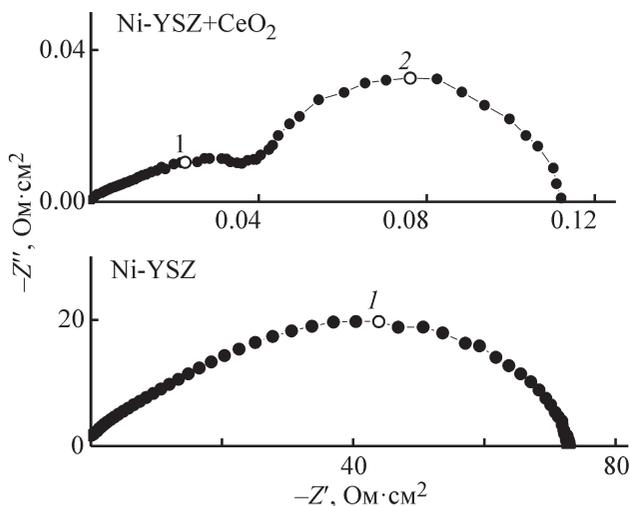


Рис. 5. Спектры электрохимического импеданса Ni-YSZ электродов до и после введения в электрод оксида церия (900°C, влажный водород).

$f$  (Гц): 1 — 100, 2 — 1.

не может происходить без изменения природы скоростьопределяющих стадий электродной реакции. Рассмотрим спектры электрохимического импеданса исследуемых электродов как до, так и после импрегнирования (рис. 5). Спектры имеют достаточно сложный вид без четкого разделения полуокружностей (для Ni-YSZ электрода), что делает затруднительным анализ данных спектров традиционным методом наименьших квадратов. Для анализа спектров был использован метод расчета функции рас-

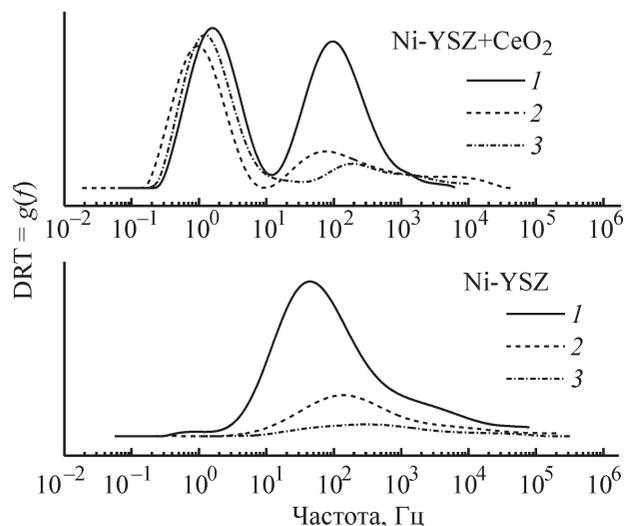


Рис. 6. Функции распределения времени релаксаций (DRT), рассчитанные из спектров импеданса.

Атмосфера влажного водорода.  
 $T$  (°C): 1 — 700, 2 — 800, 3 — 900°C.

пределения времени релаксации (DRT), который имеет высокую разрешающую способность и не требует выбора эквивалентных электрических схем [20, 21].

На функциях DRT (рис. 6) отчетливо видно несколько максимумов, каждый из которых соответствует скоростьопределяющей стадии электродной реакции. Электрохимическая реакция на исходном аноде (без импрегнирования) в основном определяется скоростью среднечастотного процесса с частотой максимума около 100 Гц. Такое поведение свидетельствует о доминирующем влиянии адсорбционно-поверхностных процессов, происходящих на поверхности электрода [19]. Введение в электрод оксида церия приводит к появлению низкочастотного электродного процесса в области 1 Гц. Обращает на себя внимание слабая зависимость данной стадии от температуры, что не характерно для термоактивационных процессов. Такое поведение возможно только в том случае, когда газодиффузионное сопротивление оказывает заметное влияние на скорость электродной реакции. Также стоит отметить, что электродный процесс, релаксирующий в области частот около 100 Гц, после импрегнирования также отчетливо виден на функции DRT, но его интенсивность существенно ниже по сравнению с интенсивностью низкочастотной стадии при высоких температурах.

## Выводы

В работе исследованы никель-керамические электроды состава 61 мас% NiO + 39 мас%  $Zr_{0.84}Y_{0.16}O_{1.92}$ , изготовленные из порошка, полученного осаждением оксида никеля на частицы  $Zr_{0.84}Y_{0.16}O_{1.92}$  электролита. Электроды показали высокий уровень электропроводности, более  $16 \cdot 10^3$  См·см<sup>-1</sup> при комнатной температуре, но низкую электрохимическую активность, поляризационное сопротивление при 900°C в атмосфере влажного водорода составило около 25 Ом·см<sup>2</sup>. Введение оксида церия в электрод позволило на два-три порядка снизить его поляризационное сопротивление. Анализ спектров электрохимического импеданса через расчет функции распределения времени релаксации показал, что скорость электродной реакции на аноде с введенным оксидом церия в основном ограничена скоростями газодиффузионной реакции и адсорбционно-поверхностными процессами.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А. С. Фарленкову за проведение микроскопических исследований.

При выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ, соглашение № 02.А03.21.0006 (Акт 211). Синтез композитных порошков выполнен в соответствии с государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН (тема № АААА-А19-119031890026-6).

### Конфликт интересов

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

### Информация о вкладе авторов

Д. А. Осинкин — изготовление образцов, проведение электрохимических экспериментов, обработка результатов, оформление рукописи.

В. Д. Журавлев — синтез композитных никель-керамических порошков, обсуждение результатов.

### Информация об авторах

Осинкин Денис Алексеевич, к.х.н., с.н.с. лаборатории твердооксидных топливных элементов ИВТЭ УрО РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6396-8551>; Scopus ID: 26536496100

Журавлев Виктор Дмитриевич, к.х.н., зав. лабораторией химии соединений редкоземельных элементов ИХТТ УрО РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5933-4310>; Scopus ID: 7202032601

### Список литературы

- [1] Fernandes M. D., Andrade S. T. P., Bistrizki V. N., Fonseca R. M., Zacarias L. G., Goncalves H. N. C., Castro A. F., Domingues R. Z., Matencio T. SOFC-APU systems for aircraft: A review // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. P. 16311–16333. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.004>
- [2] Ramadhani F., Hussain M. A., Mokhlis H., Hajimolana S. Optimization strategies for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) application: A literature survey // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017. V. 76. P. 460–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.052>
- [3] Wu L., Zhao L., Zhan Z., Xia C. Cathode supported tubular solid oxide fuel cells with nanostructured  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  electrocatalysts // *J. Power Sources*. 2014. V. 266. P. 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.055>
- [4] Береснев С. М., Бобренок О. Ф., Кузин Б. Л., Богданович Н. М., Куртеева А. А., Осинкин Д. А., Вдовин Г. К., Бронин Д. И. Единичная топливная ячейка с несущим LSM-катодом // *Электрохимия*. 2012. Т. 48. № 10. С. 1066–1072 [Beresnev S. M., Bobrenok O. F., Kuzin B. L., Bogdanovich N. M., Kurteeva A. A., Osinkin D. A., Vdovin G. K., Bronin D. I. Single fuel cell with supported LSM cathode // *Russ. J. Electrochem.* 2012. V. 48. P. 969–975. <https://doi.org/10.1134/S1023193512100035>].
- [5] Lei L., Bai Y., Liu J. Ni-based anode-supported  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -doped- $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized  $\text{ZrO}_2$  thin electrolyte solid oxide fuel cells with  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized  $\text{ZrO}_2$  buffer layer // *J. Power Sources*. 2014. V. 248. P. 1312–1319. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.023>
- [6] Chen X., Ni W., Du X., Sun Z., Zhu T., Zhong Q., Han M. Electrochemical property of multi-layer anode supported solid oxide fuel cell fabricated through sequential tape-casting and co-firing // *J. Mater. Sci. Tech.* 2019. V. 35. P. 695–701. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.015>
- [7] Timurkutluk B., Celik S., Ucar E. Influence of doctor blade gap on the properties of tape cast NiO/YSZ anode supports for solid oxide fuel cells // *Ceram. Int.* 2019. V. 45. P. 3192–3198. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.221>
- [8] Куртеева А. А., Береснев С. М., Осинкин Д. А., Кузин Б. Л., Вдовин Г. К., Журавлев В. Д., Богданович Н. М., Бронин Д. И., Панкратов А. А., Ярославцев И. Ю. Единичные твердооксидные топливные элементы с несущим Ni-керметным анодом // *Электрохимия*. 2011. Т. 47. С. 1478–1486 [Kurteeva A. A., Beresnev S. M., Osinkin D. A., Kuzin B. L., Vdovin G. K., Zhuravlev V. D., Bogdanovich N. M., Bronin D. I., Pankratov A. A., Yaroslavtsev I. Yu. Single solid-oxide fuel cells with supporting Ni-cermet anode // *Russ. J. Electrochem.* 2011. V. 47. P. 1381–1388. <https://doi.org/10.1134/S102319351112007X>].
- [9] Osinkin D. A., Bronin D. I., Beresnev S. M., Bogdanovich N. M., Zhuravlev V. D., Vdovin G. K., Demyanenko T. A. Thermal expansion, gas permeability, and conductivity of Ni-YSZ anodes produced by different techniques // *J. Solid State Electrochem.* 2014. V. 18. P. 149–156. <https://doi.org/10.1007/s10008-013-2239-4>
- [10] Osinkin D. A., Bogdanovich N. M., Beresnev S. M., Zhuravlev V. D. High-performance anode-supported solid oxide fuel cell with impregnated electrodes // *J. Power Sources*. 2015. V. 288. P. 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.098>
- [11] Futamura S., Muramoto A., Tachikawa Y., Matsuda J., Lyth S. M., Shiratori Y., Taniguchi S., Sasaki K. SOFC anodes impregnated with noble metal catalyst nanoparticles for high fuel utilization // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. P. 8502–8518. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.223>

- [12] *Chen J., Wan D., Sun X., Li B., Lu M.* Electrochemical impedance spectroscopic characterization of impregnated  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$  cathode for intermediate-temperature SOFCs // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. P. 9770–9776. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.223>
- [13] *Osinkin D. A., Kuzin B. L., Bogdanovich N. M.* Time dependence of electrochemical characteristics of high performance  $\text{CeO}_2$ -modified Ni-cermet electrode in multicomponent gas mixtures  $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{CO}_2$  // *Solid State Ionics*. 2013. V. 251. P. 66–69. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2013.03.012>
- [14] *Papaefthimiou V., Shishkin M., Niakolas D. K., Athanasiou M., Law Y. T., Arrigo R., Teschner D., Havecker M., Knop-Gericke A., Schlögl R., Ziegler T., Neophytides S. G., Zafeiratos S.* On the active surface state of nickel-ceria solid oxide fuel cell anodes during methane electrooxidation // *Adv. Energy Mater.* 2013. V. 3. P. 762–769. <https://doi.org/10.1002/aenm.201200727>
- [15] *Khaliullin S. M., Zhuravlev V. D., Bamburov V. G.* Solution-combustion synthesis of oxide nanoparticles from nitrate solutions containing glycine and urea: Thermodynamic aspects // *Int. J. Self-Propagating High-Temp. Synt.* 2016. V. 25. P. 139–148. <https://doi.org/10.3103/S1061386216030031>
- [16] *Osinkin D. A., Kuzin B. L.* Hydrogen oxidation kinetics at  $\text{Ni-Zr}_{0.9}\text{Sc}_{0.1}\text{O}_{1.95}$  anode: Influence of the difference of potential in the dense part of the double electric layer // *Electrochim. Acta*. 2018. V. 282. P. 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.06.039>
- [17] *Vogler M., Bieberle-Hutterb A., Gauckler L., Warnatz J., Bessler W. G.* Modelling study of surface reactions, diffusion, and spillover at a Ni/YSZ patterned anode // *J. Electrochem. Soc.* 2009. V. 156. P. B663–B672. <https://doi.org/doi:10.1149/1.3095477>
- [18] *Utz A., Stormer H., Leonide A., Weber A., Ivers-Tiffée E.* Degradation and relaxation effects of Ni patterned anodes in  $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  Atmosphere // *J. Electrochem. Soc.* 2010. V. 157. P. B920–B930. <https://doi.org/10.1149/1.3383041>
- [19] *Dasari H. P., Park S., Kim J., Lee J., Kim B., Je H., Lee H., Yoon K.* Electrochemical characterization of Ni–yttria stabilized zirconia electrode for hydrogen production in solid oxide electrolysis cells // *J. Power Sources*. 2013. V. 240. P. 721–728. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.033>
- [20] *Schmidt J., Berg P., Schönleber M., Weber A., Ivers-Tiffée E.* The distribution of relaxation times as basis for generalized time-domain models for Li-ion batteries // *J. Power Sources*. 2013. V. 221. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.100>
- [21] *Boukamp B. A.* Fourier transform distribution function of relaxation times; application and limitations // *Electrochim. Acta*. 2015. V. 154. P. 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.059>
-