06

Деградационные испытания батареи водородно-воздушных топливных элементов с открытым катодом при хранении с нерегулярной эксплуатацией

© М.З. Галин, А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, Е.В. Герасимова, А.В. Левченко

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия
E-mail: shmygleva@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 31 октября 2025 г.
В окончательной редакции 27 ноября 2025 г.
Принято к публикации 27 ноября 2025 г.

Представлены результаты исследования особенностей эксплуатации и хранения батареи водородно-воздушных топливных элементов с открытым катодом номинальной мощностью 1.1 kW. Для приближения к реальным условиям эксплуатации батарея топливных элементов запускалась без определенной периодичности на 0.6–6 h в течение трех лет. Показано, что при длительном хранении батареи топливных элементов между запусками (более 180 дней) наблюдается обратимое падение рабочих характеристик: максимальной мощности и времени разгона (времени выхода на номинальную мощность).

Ключевые слова: батарея топливных элементов, водород, деградация, ресурсные испытания.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62462.20550

Рост требований к надежности, энергоэффективности и экологичности источников питания стимулирует развитие систем резервного и автономного энергоснабжения на основе водородно-воздушных топливных элементов (ВВТЭ) [1,2]. Эти установки напрямую преобразуют химическую энергию водорода в электрическую, обеспечивая высокую эффективность преобразования энергии (КПД до 60 %), низкий уровень шума и отсутствие вредных выбросов [3]. В отличие от аккумуляторов ВВТЭ способны работать продолжительное время без подзарядки, обеспечивать быстрый пуск и масштабируемость мощности [2,4]. Особое внимание уделяется вопросам интеграции ВВТЭ с возобновляемыми источниками энергии (солнечными и ветровыми установками), что позволяет создавать полностью автономные энергетические комплексы [5]. Интегрирование ВВТЭ в солнечные фотоэлектрические системы с литий-ионными аккумуляторами приводит к повышению экономической эффективности таких систем [6]. Кроме того, с экологической точки зрения внедрение резервного питания с батареей топливных элементов (БТЭ) в существующие электросети более выгодно по сравнению с использованием дизель-генераторных установок [7].

Эксплуатация ВВТЭ в качестве резервных или вспомогательных источников энергии зачастую сопровождается длительными периодами простоя [5,8], а влияние таких условий эксплуатации на вольт- и ватт-амперные характеристики батарей неизвестно. Наиболее изученными факторами деградационных изменений к настоящему времени остаются частота запусков/остановок [9] и условия хранения [10]. Таким образом, проверка работоспособности батарей ВВТЭ при длительном хранении и нерегулярных запусках является важной для определения области их применимости. Поэтому целью настоящей работы являются сборка и трехлетнее испытание БТЭ с открытым катодом номинальной мощностью 1.1 kW, предназначенной для резервных источников питания.

Для создания электродов в качестве катализатора использовался коммерческий продукт российского производства Pt/C PM-40 (ООО „Прометей РД“), содержащий 40 wt.% Pt. Каталитические чернила наносились на установке PRISM BT (Ultrasonic Systems, Inc.) ультразвуковым напылением на газодиффузионный слой с микропористым слоем Freudenberg H23C3 (Freudenberg) по методике, описанной в работе [11]. Загрузка платины состав-

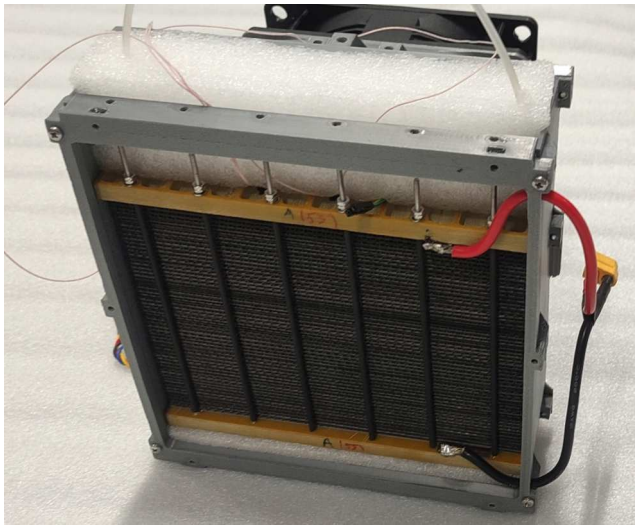


Рис. 1. Фотография исследуемой БТЭ.

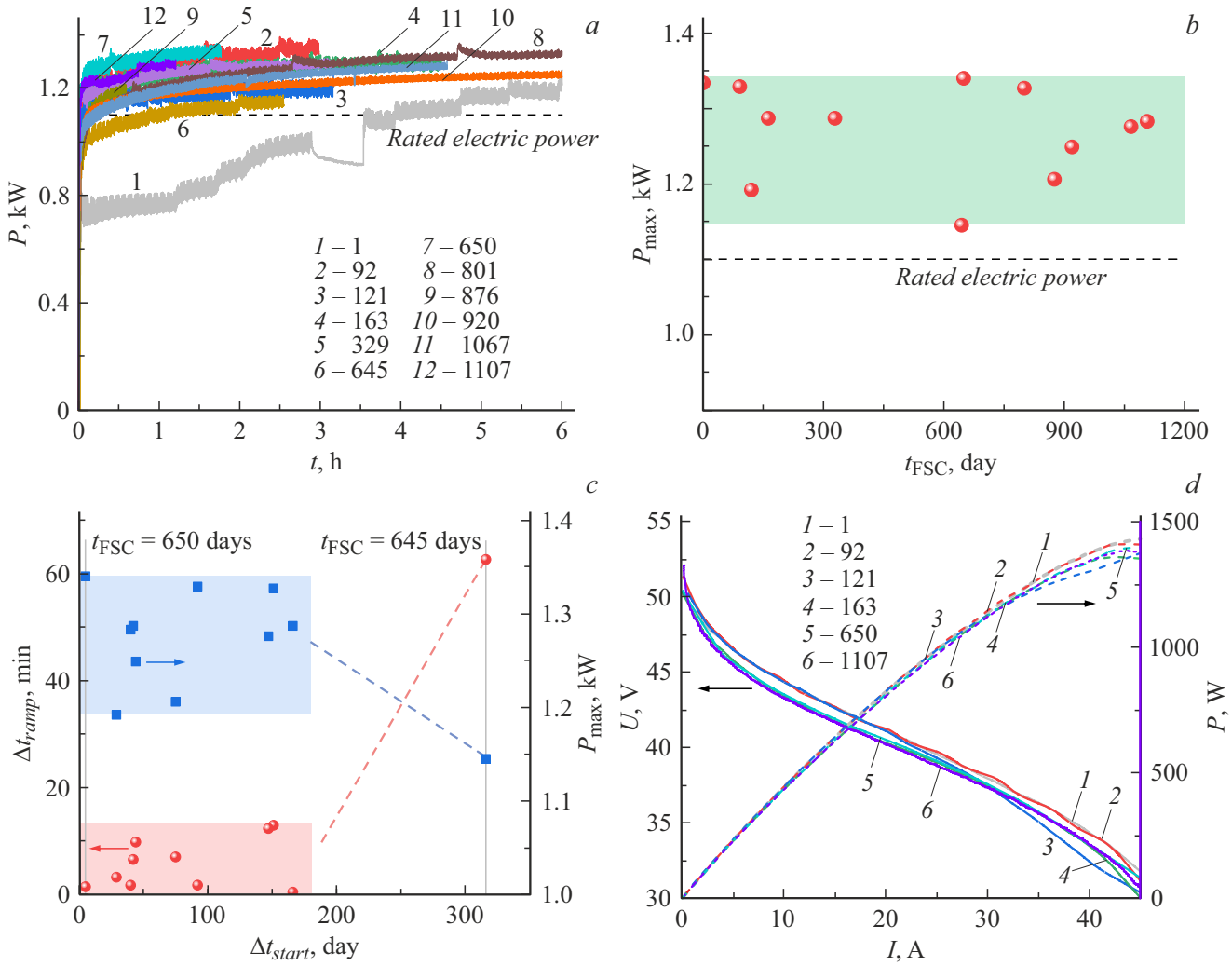


Рис. 2. *a* — зависимости мощности БТЭ от времени при каждом запуске; *b* — максимальная мощность БТЭ при каждом запуске; *c* — влияние длительности перерыва между запусками на максимальную мощность и время достижения номинальной мощности БТЭ; *d* — ВАХ и мощностные характеристики исследуемой БТЭ. Числа в легенде соответствуют количеству дней, прошедших с даты изготовления БТЭ (t_{FSC}).

ляла 0.6 и 0.4 mg/cm^2 на катоде и аноде соответственно. Мембранно-электродные блоки размером 18 × 4.5 cm с площадью активной области 71 cm^2 изготавливались горячим прессованием катод–мембрана–анод при 130 °C, в качестве протонпроводящей мембраны использовалась мембрана Nafion XL (Chemours, США). Для создания анодного полупространства применялась титановая фольга размером 18 × 4.5 cm, которая склеивалась силиконовым герметиком по периметру с анодной стороной мембраны. Для герметизации водородного газового канала между единичными топливными элементами (ЕТЭ) прокладывались силиконовые шайбы. БТЭ номинальной мощностью 1.1 kW была собрана из 55 ЕТЭ, разделенных гофрированной титановой фольгой с каналами подачи воздуха (рис. 1). С целью уменьшения контактного сопротивления и электрохимической коррозии использовалась титановая фольга с защитным покрытием [12].

Для управления нагрузкой и контроля/записи рабочих параметров (напряжения, силы тока, температуры, продувки анодной области и т. п.) использовался „Блок испытаний БТЭ 150x100МПН-1500“ (ООО „ИнЭнерджи“). Измерения напряжения на каждом ЕТЭ в батарее проводились с помощью модуля сбора данных 34980A (Keysigth) с установленным мультиплексором 34924A. Запуск БТЭ длительностью 0.6–6 h осуществлялся в течение трех лет без определенной периодичности для приближения к реальным условиям эксплуатации. Испытания проводились при использовании самоувлажнения посредством контролируемого пульсового нагрузочного режима, описанного в работе [13], при комнатной температуре, воздух подавался вентилятором из окружающей среды, водород — из баллона с избыточным давлением 0.7 atm. Запуски БТЭ осуществлялись в потенциостатическом режиме в расчете 0.6 V на ЕТЭ, сум-

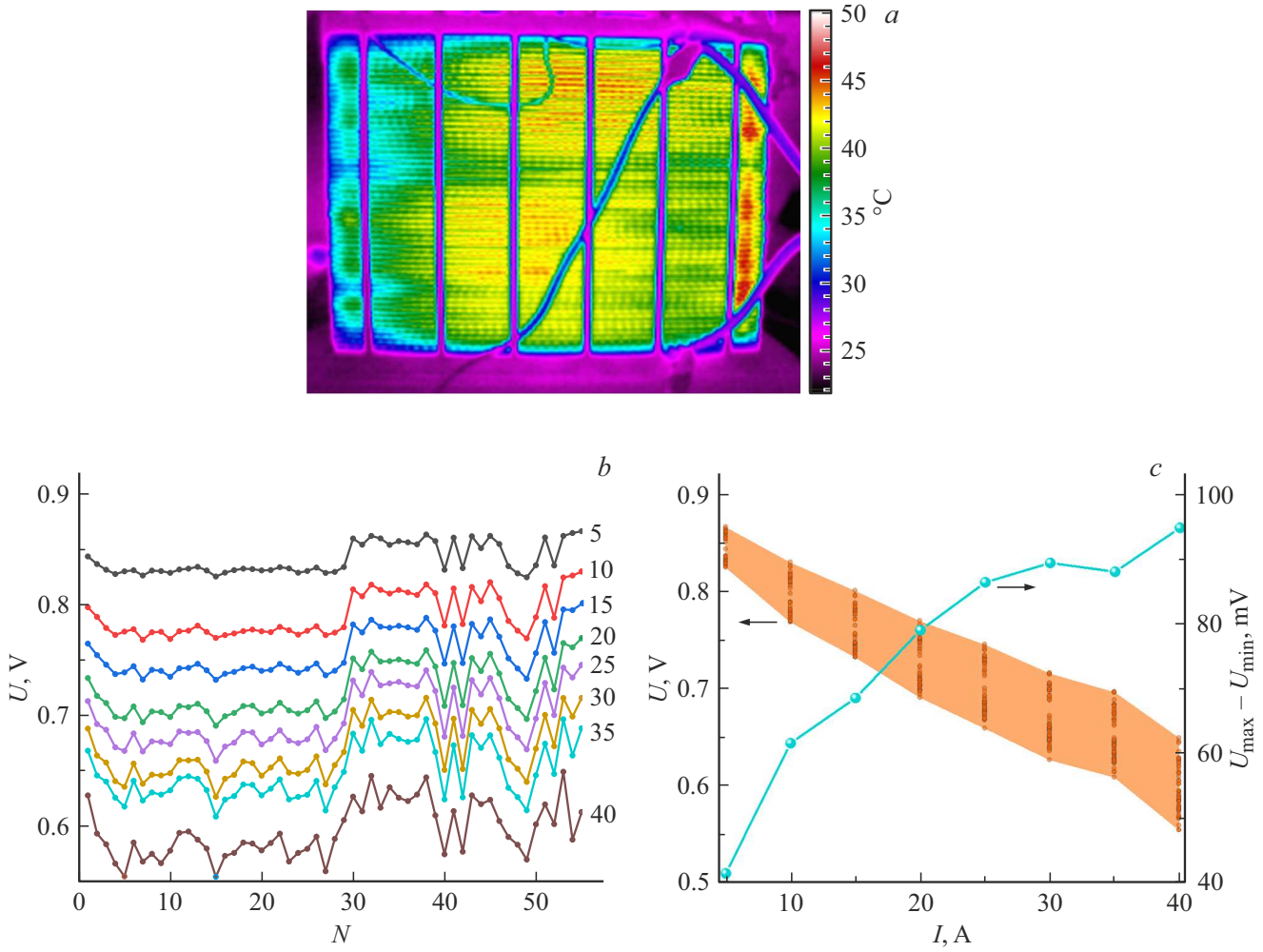


Рис. 3. Изменение напряжения на ЕТЭ в БТЭ. *a* — тепловизионная фотография лицевой части работающей при напряжении 33 V БТЭ; *b* — зависимости напряжения ЕТЭ от его номера, нумерация ЕТЭ идет снизу вверх (цифрами около кривых обозначен ток нагрузки в А); *c* — зависимости напряжения на ЕТЭ и неоднородности напряжения от тока нагрузки.

марное напряжение составляло 33 V. После выхода на номинальную мощность проводилась регистрация вольтамперных кривых в диапазоне токов 1–45 A. Хранение БТЭ между запусками осуществлялось без создания специальных условий: 20–32 °C, относительная влажность 19–60 %. По окончании работы при каждом запуске вход/выход в анодное полупространство батареи открывался для контакта с атмосферным воздухом. Дополнительной продувки анодной области не проводилось.

Полученные при каждом запуске БТЭ зависимости мощности от времени приведены на рис. 2, *a*. При первичном запуске (время, прошедшее с момента сборки БТЭ, $t_{FSC} = 1$ day) происходят длительные процессы активации при так называемом „разгоне“ БТЭ, который обычно проводят 2–8 h [14]. Причиной длительной активации с постепенным увеличением мощности БТЭ являются увеличение площади трехфазных границ, очистка поверхности катализатора, равномерное увлажнение электролита. Прямой зависимости мощности, развиваемой БТЭ, от температуры и относительной влажности окружающей среды не обнаружено.

В течение трех лет максимально достигаемая мощность БТЭ P_{max} была в пределах 1.15–1.34 kW без выраженного уменьшения со временем хранения (рис. 2, *b*). Однако при длительных перерывах между запусками БТЭ Δt_{start} ($\Delta t_{start} > 180$ days) наблюдается уменьшение P_{max} и увеличение времени разгона Δt_{ramp} (достижения номинальной мощности 1.1 kW) (рис. 2, *c*). Так, при $\Delta t_{start} < 180$ days Δt_{ramp} составляет не более 13 min, в то время как при $\Delta t_{start} = 316$ days время Δt_{ramp} увеличивается до 1 h. Поэтому в системах резервного электроснабжения рекомендуется производить периодические запуски БТЭ не реже одного раза в шесть месяцев.

Следует отметить, что снижение характеристик БТЭ даже при хранении в течение года является обратимым. Для примера рассмотрим два включения БТЭ, которые производились на 645 и 650 день соответственно. Первое из них произошло через год после предыдущего

запуска, и мощность БТЭ была минимальной среди всех запусков, проведенных в данном исследовании, а время разгона — максимальным, но уже при следующем запуске через 5 дней мощность БТЭ достигла максимальной величины (рис. 2, b, c).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) БТЭ имеют типичный для таких устройств вид [4] (рис. 2, d). При напряжении менее 36 V (~ 0.65 V на один ЕТЭ) наблюдаются диффузионные ограничения, связанные с транспортом кислорода и увлажнением электролита. В целом наблюдается отсутствие значимых изменений ВАХ и мощностных характеристик исследуемой БТЭ. Небольшие различия можно объяснить длительностью интервалов между запусками и изменением условий окружающей среды (температуры и влажности), влияющих на скорость разгона БТЭ, ее охлаждение и увлажнение катода.

После 11-го запуска ($t_{\mathrm{FSC}} = 1067$ days) изучали вклад каждого ЕТЭ в работу БТЭ. На тепловизионной картине при работе под номинальной электрической нагрузкой не наблюдается областей с чрезмерно выделяющейся температурой (рис. 3, a), что свидетельствует о нормальной и равномерной работе всех ЕТЭ в БТЭ. Для измерения напряжения в зависимости от приложенной электрической нагрузки к каждому из 55 ЕТЭ были подключены измерительные контакты. В исследуемом диапазоне поляризующих токов также не наблюдается заметной разницы между ЕТЭ, что свидетельствует об их нормальном функционировании в составе БТЭ. Разброс по напряжениям между ЕТЭ составляет 42–95 mV в зависимости от приложенного тока нагрузки (рис. 3, b). Наличие такого разброса можно объяснить неравномерностью подачи воздуха на входные каналы батареи, которая влияет на различие в температуре ЕТЭ, что довольно характерно для БТЭ с открытым катодом [15,16]. Отметим, что неоднородность распределения напряжения на ЕТЭ увеличивается с увеличением тока нагрузки (рис. 3, c), что хорошо согласуется с результатами работы [17].

Таким образом, тестирование БТЭ номинальной мощностью 1.1 kW в условиях трехлетней эксплуатации с нерегулярными запусками показало, что наблюдаемое падение рабочих характеристик при длительности хранения устройства является обратимым. Проведенные исследования позволяют выработать рекомендации по хранению батарей такого типа, а именно осуществлять запуск БТЭ не реже одного раза в шесть месяцев. Полученные результаты позволяют оптимизировать процессы эксплуатации и хранения БТЭ, что способствует повышению их надежности и эффективности в различных энергетических приложениях.

Финансирование работы

Работа выполнена по темам государственного задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, номера государственной регистрации: 125033104607-0 (трехлетнее исследование БТЭ) и 124013000692-4 (исследование ЕТЭ после последнего запуска БТЭ).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] И.А. Стенина, Е.Ю. Сафронова, А.В. Левченко, Ю.А. Добровольский, А.Б. Ярославцев, Теплоэнергетика, № 6, 4 (2016). [I.A. Stenina, E.Yu. Safronova, A.V. Levchenko, Yu.A. Dobrovolsky, A.B. Yaroslavtsev, Therm. Eng., **63** (6), 385 (2016). DOI: 10.1134/S0040601516060070].

[2] J. Mao, Z. Li, J. Xuan, X. Du, M. Ni, L. Xing, Energy AI, **17**, 100406 (2024). DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100406

[3] S. Bhogilla, A. Pandoh, U.R. Singh, Int. J. Hydrog. Energy, **52** (Pt D), 1147 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.028

[4] А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, А.А. Баранов, А.В. Левченко, Успехи химии, **93** (6), RCR5121 (2024). DOI: 10.59761/RCR5121 [A.A. Belmesov, L.V. Shmygleva, A.A. Baranov, A.V. Levchenko, Russ. Chem. Rev., **93** (6), RCR5121 (2024). https://doi.org/10.59761/RCR5121.]

[5] С.И. Нефедкин, Я.В. Исаев, В.Д. Михневич, В.Е. Елецких, М.А. Климова, Электрохимия, **60** (S12), 841 (2024). DOI: 10.31857/S0424857024120041 [S.I. Nefedkin, Ya.V. Isaev, V.D. Mikhnevich, V.E. Yeletsky, M.A. Klimova, Russ. J. Electrochem., **60** (12), 987 (2024). DOI: 10.1134/S1023193524700629].

[6] G. Jansen, Z. Dehouche, H. Corrigan, Int. J. Hydrog. Energy, **46** (35), 18153 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.205

[7] M.M. Samy, M.I. Mosaad, S. Barakat, Int. J. Hydrog. Energy, **46** (20), 11217 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.258

[8] E. Colombo, A. Casalegno, A. Bisello, L. Rovatti, A. Baricci, J. Electrochem. Soc., **172** (6), 064512 (2025). DOI: 10.1149/1945-7111/ade0f1

[9] Z. Liu, H. Chen, T. Zhang, Appl. Energy, **327**, 120058 (2022). DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120058

[10] C. Zhao, F. Wang, X. Wu, Renew. Sust. Energy Rev., **197**, 114408 (2024). DOI: 10.1016/j.rser.2024.114408

[11] M.A. Derendyaev, D.V. Koryakin, E.M. Filalova, A.B. Yalmaev, M.Z. Galin, E.V. Gerasimova, A.E. Antipov, A.V. Levchenko, Yu.A. Dobrovolsky, Nanotechnol. Russ., **15**, 797 (2020). DOI: 10.1134/S1995078020060087

[12] М.З. Галин, Е.В. Герасимова, Е.Ю. Евщик, А.В. Левченко, *Защитное покрытие для титановых пластин и способ его нанесения*, патент RU 2830566 C1 (заявл. 27.12.2023, опубл. 21.11.2024), бюл. 33. https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=babb167a8d02de849ea1f57b8908f563

[13] Е.А. Галицкая, Е.В. Герасимова, Ю.А. Добровольский, Г.М. Дон, А.С. Афанасьев, А.В. Левченко, А.В. Сивак, В.В. Синицын, Письма в ЖТФ, **44** (13), 36 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46325.17078 [E.A. Galitskaya, E.V. Gerasimova, Yu.A. Dobrovol'skii, G.M. Don, A.S. Afanas'ev, A.V. Levchenko, A.V. Sivak, V.V. Sinitsyn, Tech. Phys. Lett., **44** (7), 570 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018070064].

[14] S. Zink, L. Joerissen, ECS Meet. Abstr., **MA2024-02**, 3226 (2024). DOI: 10.1149/MA2024-02463226mtgabs
[15] P. Bujlo, C. Cornelius, O. Barron, N. Dyantyi, V. Linkov, S. Pasupathi, Int. J. Hydrog. Energy, **46** (57), 29478 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.235
[16] X. Yu, H. Chang, X. Luo, Z. Tu, Int. J. Hydrog. Energy, **47** (85), 36204 (2022). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.177
[17] G.M. Cabello González, B. Toharias, A. Iranzo, C. Suárez, F. Rosa, Energy, **282**, 128781 (2023). DOI: 10.1016/j.energy.2023.128781