

06

Дизайн активной области мембранно-электродного блока в батарее топливных элементов с открытым катодом

© М.З. Галин, А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, Д.В. Новиков, 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 28 мая 2026 г.

В окончательной редакции 17 июля 2026 г.

Принято к публикации 25 августа 2026 г.

Представлены результаты исследования вклада различных участков активной области мембранно-электродного блока в характеристики батареи водородно-воздушных топливных элементов с открытым катодом. Показана возможность снижения стоимости, увеличения ресурса и КПД такой батареи за счет инактивации каталитических слоев в районе коллекторов подачи и отвода водорода.

Ключевые слова: батарея топливных элементов, водород, деградация, дизайн активной области, открытый катод.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63888.20791

Батареи водородно-воздушных топливных элементов (БТЭ) с открытым катодом представляют собой химические источники тока, отличающиеся высокой энергоемкостью [1]. Благодаря быстрому выходу на рабочий режим и простоте конструкции они находят широкое применение в качестве мобильных, стационарных и резервных источников питания [2,3]. Протекание электрохимических реакций в таких устройствах происходит неравномерно по всей активной области мембранно-электродного блока (МЭБ) и зависит от ряда факторов. Так, например, в случае БТЭ с открытым катодом используют биполярные пластины (БП) из тонких металлов (титана или нержавеющей стали). Это позволяет достигать высокой удельной мощности БТЭ как на единицу активной области, так и на единицу массы [4] благодаря возможности создания в металлических БП отдельных каналов охлаждения, что в свою очередь способствует уменьшению пересыхания катода и, как следствие, снижению омических потерь.

Вместе с тем при анализе тепловизионного изображения БТЭ с титановыми БП в нашей предыдущей работе [5] было установлено, что область коллекторов подачи и отвода водорода представляет собой зону локального температурного максимума. Известно, что подобные локальные перегревы ускоряют деградацию компонентов топливного элемента [6]. Дополнительно в [7] показано, что в топливных элементах с подачей водорода при постоянном давлении и периодическими продувками скорость деградации компонентов возрастает по мере приближения к выходному коллектору водорода, что объясняется накоплением воды и азота в среде водорода.

Исходя из изложенного выше целью настоящей работы стало определение влияния дизайна активной области МЭБ в БТЭ с открытым катодом и воздуш-

ным охлаждением на ее мощностные характеристики, а именно оценка целесообразности протекания электрохимических реакций в областях коллекторов подачи и отвода водорода, характеризующихся наиболее высокой скоростью деградации.

БТЭ собирали из восьми единичных топливных элементов (ЕТЭ) размером 180×45 мм и титановых БП с углеродным покрытием [8] (рис. 1, а). Схемы сборки БТЭ и измерительного стенда приведены в [9]. МЭБ изготавливали методом декального переноса каталитического слоя на мембрану Gore-Select® M775.15 толщиной $15.5 \mu\text{m}$ в прессе для горячего прессования Carver [10]. Каталитический слой содержал катализатор Pt/C PM-40 (ООО „Прометей РД“) с содержанием Pt 40 wt.% и иономер Нафийон ($m(\text{I})/m(\text{C}) = 0.9$). Загрузка платины на катоде и аноде составляла 0.35 и 0.20 mg Pt/cm^2 соответственно. Газодиффузионные слои (ГДС) Freudenberg H23C3 подпрессовывали к каталитическим слоям при 130°C и давлении 30 kg/cm^2 .

Запуск БТЭ проводили в потенциостатическом режиме в расчете 0.6 V на ЕТЭ при суммарном напряжении 4.8 V . Для управления нагрузкой и контроля/записи рабочих параметров (напряжения, силы тока, температуры, продувок анодной области и т.п.) использовали „Блок испытаний БТЭ 150x100МПН-1500“ (ООО „ИнЭнерджи“). Подачу воздуха в катодные и охлаждающие каналы обеспечивали вентилятором, забирающим воздух из окружающей среды ($24\text{--}26^\circ\text{C}$, относительная влажность 24 %). Скорость вентилятора регулировалась для поддержания температуры БТЭ около 54°C . Эксперимент проводили в отапливаемом помещении без дополнительного контроля температуры и влажности окружающего воздуха. Сухой водород подавали из баллона с избыточным давлением $0.8\text{--}0.9 \text{ atm}$ в один из коллекторов водорода (справа на рис. 1). БТЭ работала

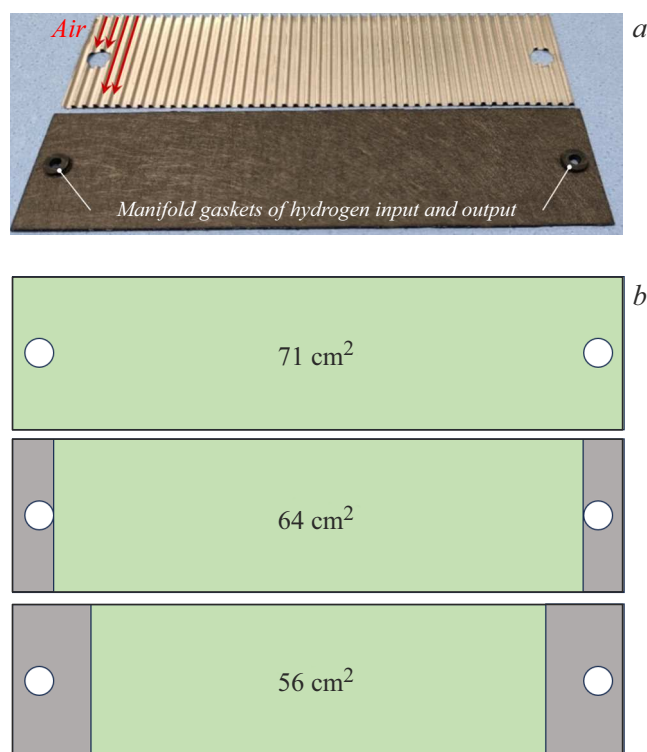


Рис. 1. Фотография ЕТЭ и БП (а) и схема активной области разной площади исследуемых ЕТЭ, обозначенной зеленым цветом (b). Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

в режиме „закрытого анода“ (dead-end mode) с периодическими продувками каждые 30 с.

Уменьшение площади активной области осуществляли путем пропитки соответствующих зон катодного ГДС силиконовым герметиком. Изначально открытая площадь катодного ГДС составляла 71 cm^2 . В ходе эксперимента активную площадь последовательно снижали: из работы исключили области, обозначенные на рис. 1, b серым, в результате чего площадь уменьшилась до 64 и 56 cm^2 . Тепловые картины работы БТЭ регистрировали с помощью тепловизора Fluke Ti300.

В ходе эксперимента были зарегистрированы вольт-амперные характеристики (ВАХ) и мощностные характеристики БТЭ с различным дизайном активной области МЭБ (рис. 2, a). Удельные характеристики БТЭ на единицу площади активной области составляют около 410 mW/cm^2 при 0.6 V , что выше значений, опубликованных нами ранее [5,9] (рис. 2, b). Улучшить характеристики удалось благодаря нанесению каталитического слоя непосредственно на мембрану, а не ГДС, оптимизации состава каталитического слоя и использованию более тонкой мембраны ($15.5 \mu\text{m}$ по сравнению с ранее используемой $25 \mu\text{m}$). Исходя из результатов ресурсных испытаний, проведенных ранее [9], для увеличения стабильности работы БТЭ содержание иономера в каталитическом слое было увеличено. Сравнение с

результатами работ других коллективов в области БТЭ с открытым катодом показало, что удельные мощностные характеристики полученных БТЭ находятся на уровне лучших опубликованных [4,11,12].

При инактивации каталитических слоев в области коллекторов подачи и отвода водорода в рабочем диапазоне напряжения БТЭ (от напряжения разомкнутой цепи до 4.8 V) не наблюдается значимых различий ВАХ (рис. 2, a) при уменьшении площади активной области от 71 до 64 cm^2 (233 и 227 W соответственно). Воздушные каналы в БП в этой области имеют препятствие в виде герметизирующих прокладок коллекторов подачи и отвода водорода (рис. 1, a), поэтому протекание реакции электровосстановления кислорода в данной зоне вносит вклад в токоотдачу БТЭ только при низких напряжениях. Это связано с тем, что с понижением напряжения на БТЭ возрастает тепловыделение, и интенсивность воздушного потока увеличивается за счет увеличения частоты вращения вентилятора и становится достаточной для детектируемого вклада этой области ЕТЭ в ВАХ и мощностные характеристики БТЭ. Однако это происходит при значениях напряжений, которые лежат за пределами практически используемого диапазона. Удельные же характеристики на единицу площади активной области возрастают от 410 до 444 mW/cm^2 , так как из расчета была исключена фактически неактивная площадь (рис. 2, b).

При дальнейшем сокращении площади активной области до 56 cm^2 наблюдается пропорциональное снижение мощности БТЭ до 193 W при сохранении (в пределах погрешности 2 %) удельной мощности (432 mW/cm^2). Это косвенным образом свидетельствует о том, что вся активная область ЕТЭ, за исключением области вокруг коллекторов подачи и отвода водорода, вносит значительный вклад в работу БТЭ.

На термографических изображениях БТЭ, полученных со стороны забора воздуха, слева расположен коллектор подачи водорода, а справа — коллектор сброса водорода (рис. 3). Температура в области подачи водорода ниже, чем в области его выхода. Это объясняется тем, что в БТЭ поступает сухой водород при комнатной температуре, который оказывает локальное охлаждающее действие, тогда как на выходе водород уже нагрет. Такой градиент температуры характерен для БТЭ с открытым катодом и воздушным охлаждением как для устройств с углеродными [11], так и с металлическими БП [5]. В конфигурации, при которой вся площадь катода является открытой, области коллекторов подачи и отвода водорода демонстрируют повышенную температуру, что указывает на протекание электрохимических реакций в данных областях. Однако, принимая во внимание отсутствие заметного вклада этих областей в ВАХ БТЭ, можно заключить, что в указанных зонах происходит значительная поляризация электродов [7]. Следствием этого является то, что энергия водорода расходуется исключительно на тепловыделение, что не только приводит к ускоренной деградации, но и снижает

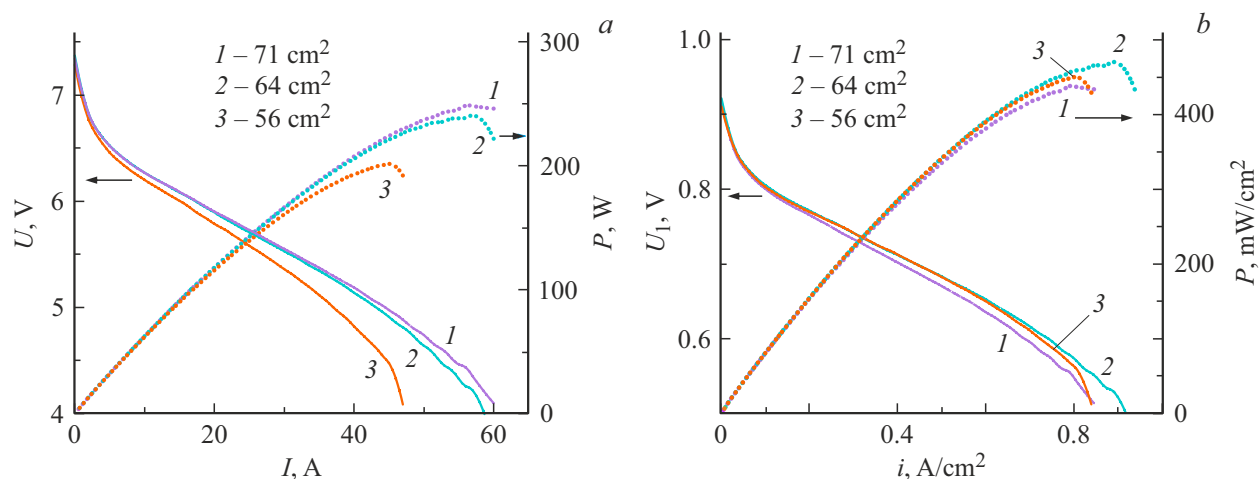


Рис. 2. Вольт-амперные и мощностные характеристики всей БТЭ (а) и удельные характеристики на единицу площади активной области ЕТЭ (b).

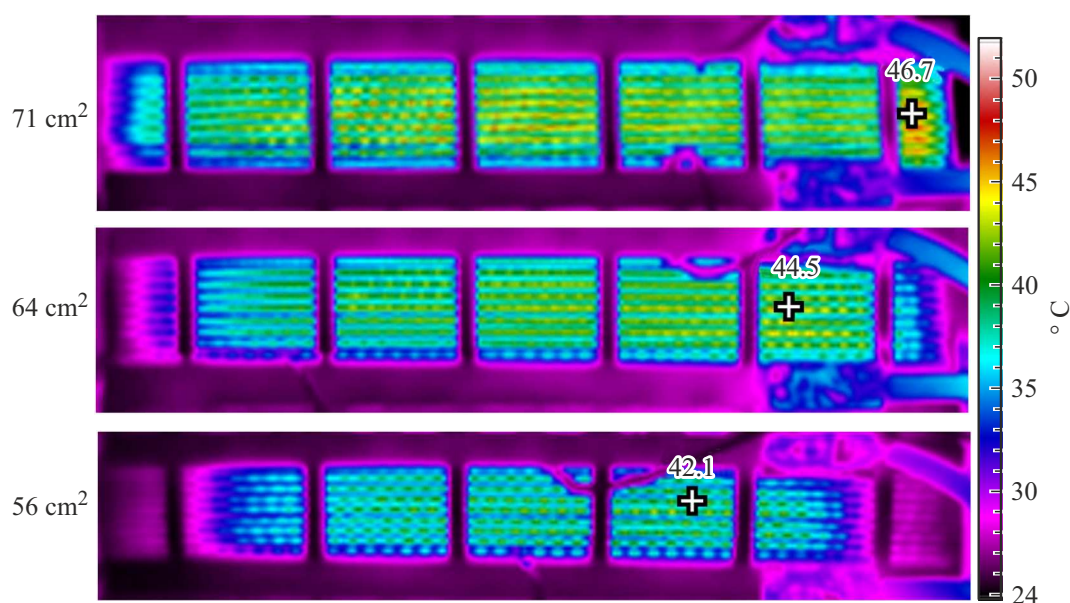


Рис. 3. Термофотографии БТЭ с различной площадью активной области ЕТЭ при нагрузке 4.8 В с указанием точки максимальной температуры (в °С).

эффективность использования водорода по КПД. При исключении областей в районе коллекторов подачи и отвода водорода из активной зоны происходит их закономерное охлаждение, и зона выхода водорода из БТЭ перестает относиться к числу наиболее нагретых зон. Выключение дополнительной зоны, прилегающей к области коллекторов подачи и отвода водорода, вызывает значительное охлаждение краев БТЭ, чем и может быть объяснено последующее незначительное снижение удельной мощности.

Суммируя изложенное выше, можно заключить, что нанесение каталитических слоев на область, где подача воздуха затруднена из-за перекрытия коллекторами подачи и отвода водорода, является нецелесообразным. Исключение указанных зон из активной области позво-

лит снизить стоимость топливного элемента с открытым катодом за счет уменьшения расхода каталитических чернил, ГДС и мембраны. Кроме того, удаление участка активной области, на котором происходит ускоренная деградация компонентов, способствует повышению надежности системы в целом.

Финансирование работы

Работа выполнена по теме государственного задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (номер государственной регистрации 125033104607-0).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, А.А. Баранов, А.В. Левченко, *Успехи химии*, **93** (6), RCR5121 (2024). DOI: 10.59761/RCR5121
- [2] 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
- [3] T. Donato, A.G. Bonatesta, A. Ficarella, *Sustainability*, **18** (1), 163 (2026). DOI: 10.3390/su18010163
- [4] C. Yin, S. Hua, W. Nie, H. Yang, H. Tang, *eTransportation*, **21**, 100344 (2024). DOI: 10.1016/j.etrans.2024.100344
- [5] М.З. Галин, А.А. Бельмесов, Л.В. Шмыглева, Е.В. Герасимова, А.В. Левченко, *Письма в ЖТФ*, **52** (6), 35 (2026). DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62462.20550 [M.Z. Galin, A.A. Belmesov, L.V. Shmygleva, E.V. Gerasimova, A.V. Levchenko, *Tech. Phys. Lett.*, **52** (3), 82 (2026). DOI: 10.61011/TPL.2026.03.63071.20550].
- [6] E. Wallnöfer-Ogris, F. Poimer, R. Köll, M.G. Macherhammer, A. Trattner, *Int. J. Hydrogen Energy*, **50**, 1159 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.215
- [7] S. Abbou, J. Dillet, G. Maranzana, S. Didierjean, O. Lottin, *J. Power Sources*, **340**, 337 (2017). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.079
- [8] M.Z. Galin, E.R. Bernatskii, A.V. Levchenko, S.M. Morozova, *Fuel Cells*, **26** (1), e70046 (2026). DOI: 10.1002/fuce.70046
- [9] A.A. Belmesov, M.Z. Galin, E.V. Gerasimova, L.V. Shmygleva, A.V. Chub, A.V. Levchenko, *J. Solid State Electrochem.*, **30** (4), 1499 (2026). DOI: 10.1007/s10008-025-06499-4
- [10] 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
- [11] P. Bujlo, C. Cornelius, O. Barron, N. Dyantyi, V. Linkov, S. Pasupathi, *Int. J. Hydrogen Energy*, **46** (57), 29478 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.235
- [12] Z. Guo, C. Tian, K. Gong, W. Xu, L. Chen, W.Q. Tao, *Int. J. Hydrogen Energy*, **57**, 601 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.045