

1 Обзор литературы

Одним из основных недостатков водород-воздушных топливных элементов на протон-обменных мембранах, который ограничивает их массовое внедрение является их малое время работы до необходимого обслуживания и ремонта [4]. Именно поэтому ресурс топливных элементов является одной из основных тем исследований [15], причём доля статей, посвящённых этой теме, с каждым годом только растёт, что видно на рисунке 1.

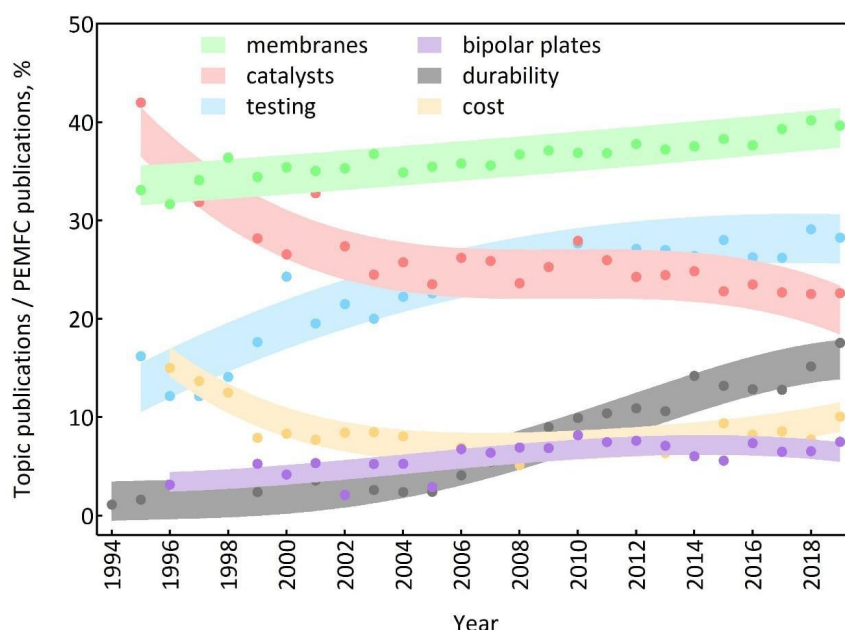


Рис. 1: На графике обозначено распределение по годам доли статей по темам от всех статей по теме ПОМТЭ

Среди основных механизмов деградации можно назвать отравление и вымывание катализатора, оствальдовское созревание и миграцию платины [9], однако помимо них важны и возникновение трещин в каталитическом слое и отверстий в мембране, их истончение, химическое разложение мембраны, а также многие другие процессы [8]. Важно отметить, что, несмотря на то что многие из этих механизмов неплохо изучены [3, 10], причину снижения характеристик топливного элемента в каждом конкретном случае удаётся понять далеко не всегда.

Существует множество экспериментальных методов, позволяющих отслеживать изменения в мембранно-электродных блоках, происходящих вследствие деградации. Основной темой этой работы является использование ди-

фракции рентгеновского синхротронного излучения, так как такой подход обладает целым рядом преимуществ. Данные о широкоугловом рентгеновском рассеянии позволяют с хорошей точностью смоделировать структуру платины в каталитическом слое, описав размер и кристалличность её частиц. Малоугловое рассеяние может использоваться для получения информации об иономере и макроструктуре каталитического слоя, а так же о характеристиках мембраны [12]. Микро- и нано-фокусная дифракция позволяют исследовать распределение, например, размера частиц платины в каталитическом слое от расстояния от мембраны, получая более полную информацию о состоянии мембранно-электродного блока. Благодаря высокой яркости синхротронного источника есть возможность изучения топливного элемента во время работы при использовании специальной ячейки [7], что недоступно для абсолютного большинства других методов изучения.

На данный момент большинство исследований мембранно-электродных блоков в рентгеновском диапазоне посвящены изучению распределения и транспорта воды, причём для исследований используются как лабораторные рентгеновские микроскопы [2, 6], так и синхротроны [1, 11].

Гораздо большую популярность синхротроны снискали с другими топливными элементами — твёрдооксидными. Это легко объяснить гораздо более выраженной кристаллической структурой, изменения которой легко заметить с помощью рентгеновской дифракции. Это позволяет отслеживать напряжения кристаллической решетки [14], определять микроструктуру [13] и даже строить трёхмерные модели этого типа топливных элементов [5].

Список литературы

- [1] Phengxay Deevanhxay и др. «Investigation of water accumulation and discharge behaviors with variation of current density in PEMFC by high-resolution soft X-ray radiography». В: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (17 авг. 2011), с. 10901—10907. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.160. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911014091>.

- [2] Jens Eller и др. «Implications of polymer electrolyte fuel cell exposure to synchrotron radiation on gas diffusion layer water distribution». В: *Journal of Power Sources* 245 (январь 2014), с. 796—800. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.07.025. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775313012056>.
- [3] Amanda C. Garcia, Valdecir A. Paganin и Edson A. Ticianelli. «CO tolerance of PdPt/C and PdPtRu/C anodes for PEMFC». В: *Electrochimica Acta* 53 (12 май 2008), с. 4309—4315. ISSN: 00134686. DOI: 10.1016/j.electacta.2008.01.006. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468608000522>.
- [4] Nancy Garland, Thomas Benjamin и John Kopasz. «DOE Fuel Cell Program: Durability Technical Targets and Testing Protocols». В: *ECS Transactions* 11 (1 сентябрь 2007), с. 923—931. ISSN: 1938-5862. DOI: 10.1149/1.2781004. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2781004>.
- [5] John R. Izzo и др. «Nondestructive Reconstruction and Analysis of SOFC Anodes Using X-ray Computed Tomography at Sub-50 nm Resolution». В: *Journal of The Electrochemical Society* 155 (5 март 2008), B504. ISSN: 00134651. DOI: 10.1149/1.2895067. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2895067>.
- [6] J. Lee, J. Hinebaugh и A. Bazylak. «Synchrotron X-ray radiographic investigations of liquid water transport behavior in a PEMFC with MPL-coated GDLs». В: *Journal of Power Sources* 227 (апрель 2013), с. 123—130. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.006. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775312016795>.
- [7] Isaac Martens и др. «X-ray transparent proton-exchange membrane fuel cell design for in situ wide and small angle scattering tomography». В: *Journal of Power Sources* 437 (октябрь 2019), с. 226906. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226906. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775319308997>.
- [8] Huu Linh Nguyen и др. «Review of the Durability of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell in Long-Term Operation: Main Influencing Parameters and Testing Protocols». В: *Energies* 14 (13 июль 2021), с. 4048. ISSN:

- 1996-1073. DOI: 10.3390/en14134048. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/4048>.
- [9] Paul C. Okonkwo и др. «Platinum degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review». В: *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (29 апр. 2021), с. 15850—15865. ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.078. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921005814>.
- [10] Martin Prokop, Monika Drakselova и Karel Bouzek. «Review of the experimental study and prediction of Pt-based catalyst degradation during PEM fuel cell operation». В: *Current Opinion in Electrochemistry* 20 (апр. 2020), с. 20—27. ISSN: 24519103. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.01.016. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2451910320300235>.
- [11] Takashi Sasabe и др. «Soft X-ray visualization of the liquid water transport within the cracks of micro porous layer in PEMFC». В: *Electrochemistry Communications* 13 (6 ИЮНЬ 2011), с. 638—641. ISSN: 13882481. DOI: 10.1016/j.elecom.2011.03.033. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1388248111001342>.
- [12] Klaus Schmidt-Rohr и Qiang Chen. «Parallel cylindrical water nanochannels in Nafion fuel-cell membranes». В: *Nature Materials* 7 (1 ЯНВ. 2008), с. 75—83. ISSN: 1476-1122. DOI: 10.1038/nmat2074. URL: <http://www.nature.com/articles/nmat2074>.
- [13] P. R. Shearing и др. «Using Synchrotron X-Ray Nano-CT to Characterize SOFC Electrode Microstructures in Three-Dimensions at Operating Temperature». В: *Electrochemical and Solid-State Letters* 14 (10 АВГ. 2011), B117. ISSN: 10990062. DOI: 10.1149/1.3615824. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3615824>.
- [14] Julie Villanova и др. «Determination of global and local residual stresses in SOFC by X-ray diffraction». В: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268 (3-4 ФЕВР. 2010), с. 282—286. ISSN: 0168583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2009.09.017. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X09009847>.

- [15] Rony Escobar Yonoff и др. «Research trends in proton exchange membrane fuel cells during 2008–2018: A bibliometric analysis». В: *Heliyon* 5 (5 май 2019), e01724. ISSN: 24058440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01724. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844018345407>.