

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 [14], причём доля статей, посвящённых этой теме, с каждым годом только растёт, что видно на рисунке 1.

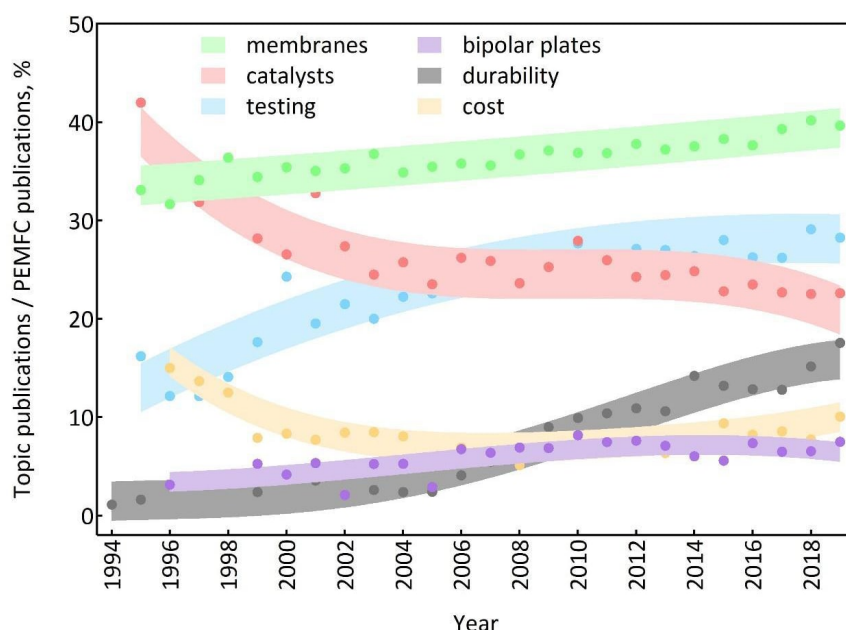


Рис. 1: На графике обозначено распределение по годам доли статей по темам от всех статей по теме ПОМТЭ

Среди основных процессов деградации можно назвать отравление и вымывание катализатора, оствальдовское созревание и миграция 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 [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 широкоуголовом рентгеновском рассеянии позволяют с хорошей точностью смоделировать структуру платины в каталитическом слое, описав размер и кристалличность её частиц. Малоуголовое рассеяние может использоваться для получения информации об иономере и макроструктуре каталитического слоя, а так же о характеристиках мембраны. 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 [13], определять микроструктуру [12] 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: 0360-3199. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2011.05.160.

- [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 (янв. 2014), с. 796—800. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2013.07.025.
- [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: 0013-4686. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2008.01.006.
- [4] Nancy Garland, Thomas Benjamin и John Kopasz. «DOE Fuel Cell Program: Durability Technical Targets and Testing Protocols». В: *ECS Transactions* 11 (1 сент. 2007), с. 923—931. ISSN: 1938-5862. DOI: 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/XML. URL: [https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2895067/XML](https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2895067%20https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2895067/meta). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2895067/meta>.
- [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 (апр. 2013), с. 123—130. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2012.11.006.
- [7] I. 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 (окт. 2019), с. 226906. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2019.226906.
- [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: (2021). DOI: 10.3390/en14134048. URL: <https://doi.org/10.3390/en14134048>.
- [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: 0360-3199. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.02.078.
- [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: 2451-9103. DOI: 10.1016/J.COELEC.2020.01.016.
- [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: 1388-2481. DOI: 10.1016/J.ELECOM.2011.03.033.
- [12] 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/XML. URL: [https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3615824/XML](https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3615824%20https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3615824/meta). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3615824/meta>.
- [13] 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: 0168-583X. DOI: 10.1016/J.NIMB.2009.09.017.
- [14] 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: 2405-8440. DOI: 10.1016/J.HELİYON.2019.E01724.