

Численное исследование трехмерного поля течения реагентов и теплоносителя в биполярной пластине*

Колбина Т.Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
г. Казань, Российская Федерация
tatianavolf@mail.ru

Аннотация. В работе представлено три типа биполярных пластин с трехмерным полем потока с различной пористостью (М1, М2 и М3) и обычная двумерная (2D) биполярная пластина со змеевидным полем потока (ЗП), проведено численное моделирование распределения плотности тока, кислорода, содержания воды и температуры в различных структурах поля потока и их влияние на производительность ПОМТЭ. Результат показывает, что поле течения М3 демонстрирует наилучшие возможности для теплообмена, а также обеспечивает максимальную плотность мощности 0,547 Вт/см², что на 8,96% выше, чем у поля потока ЗП. Это объясняется более равномерным распределением газа и жидкости в поле потока М3, а также меньшим контактным сопротивлением.

Ключевые слова: топливный элемент, биполярная пластина, теплообмен, реагенты.

ВВЕДЕНИЕ

Водородные топливные элементы являются экологически чистыми и эффективными источниками питания, которые напрямую преобразуют химическую энергию топлива в электрическую энергию. Топливные элементы (ТЭ) обладают следующими преимуществами: высокой эффективностью преобразования энергии, высокой удельной мощностью, а также быстрым динамическим откликом [1-3]. Энергоустановка на водородных топливных элементах находит широкое применение в автомобильной, аэрокосмической, военной областях и других [4, 5]. Биполярная пластина является одним из ключевых компонентов топливного элемента с протонообменной мембраной (ПОМТЭ), на ее долю приходится 60-80% общего веса и 30-45% общей стоимости ПОМТЭ.

В зависимости от используемого материала биполярные пластины можно разделить на графитовые биполярные пластины, композитные биполярные пластины и металлические биполярные пластины [22, 23]. Графитовая биполярная пластина обладает хорошей коррозионной стойкостью и отличной проводимостью. Однако низкая механическая прочность графита затрудняет его обработку. Увеличение толщины графитовых биполярных пластин позволяет повысить их механическую прочность, но приводит к увеличению объема и веса ПОМТЭ, что не способствует созданию легких ПОМТЭ [24, 25].

Композитные биполярные пластины обладают такими преимуществами, как хорошая коррозионная стойкость,

небольшой размер и легкий вес, но их собственные характеристики проводимости плохие [26, 27]. Металлические биполярные пластины обладают уникальными преимуществами, такими как высокая прочность, небольшая общая толщина и простота массового производства, что способствует снижению веса и стоимости ПОМТЭ и повышению его удельной мощности [28, 29].

В настоящее время в качестве материалов для изготовления металлических биполярных пластин доступны нержавеющая сталь [30, 31], алюминий [32, 33], титан [34], никель и медь. Среди них нержавеющая сталь является одним из лучших альтернативных материалов для изготовления биполярных пластин благодаря своей низкой стоимости, высокой механической прочности и хорошей коррозионной стойкости.

Структура поля течения биполярной пластины является одним из основных факторов, влияющих на работоспособность ПОМТЭ. Разработка хорошо спроектированной структуры поля потока может обеспечить равномерное распределение реакционных газов внутри ПОМТЭ и способствовать эффективному дренажу, тем самым облегчая работу ПОМТЭ при высоких плотностях тока. По сравнению с традиционным 2D-полем течения (например, змеевидным, параллельным) 3D-поле течения с улучшенными характеристиками тепло- и массообмена позволяет значительно улучшить равномерность распределения топливной жидкости и снизить потребление энергии при потерях потока [6-8].

Авторы предыдущих исследований разработали трехмерное поле потока с воздушными перегородками. Результаты численного моделирования показывают, что трехмерное поле потока, оснащенное воздушными перегородками, увеличивает способность теплообмена, способствует удалению воды и улучшает производительность ПОМТЭ на 9% по сравнению с традиционным прямоточным каналом.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР ПОЛЯ ПОТОКА.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Топливный элемент с протонообменной мембраной состоит в основном из концевых пластин, биполярных пластин, газодиффузионных слоев (ГДС), микропористых слоев (МПС), каталитических слоев (КС) и протонообменных мембран (ПОМ), которые расположены последовательно, при этом ПОМ действует как симметричный центр. ГДС, МПС, КС и ПОМ вместе называются мембранными электродами (МЭ). H₂ поступает в ГДС, МПС и КС из анодного

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

канала и в КС распадается на H^+ и e^- . H^+ поступает в катод через ПОМ, а e^- поступает в катод через внешний контур. O_2 поступает в ГДС, МПС и КС из катодного канала и генерирует ток, воду и тепло за счет электрохимической реакции с H^+ и e^- в каталитическом слое.

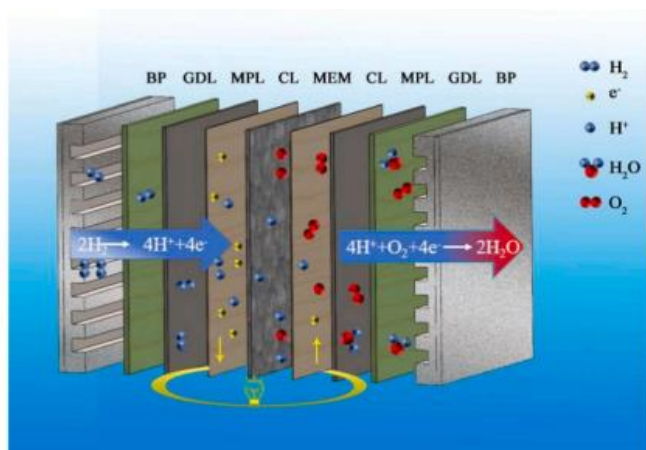
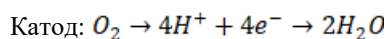
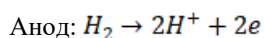


Рис. 1. Структура и принцип работы ПОМТЭ

Электрохимическое уравнение имеет следующий вид:



Полное уравнение электрохимической реакции имеет следующий вид: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{тепло}$
Проектирование 3D поля потока

В ПОМТЭ с площадью активации 25 cm^2 были спроектированы и исследованы четыре различных структуры поля потока, в том числе три типа трехмерных структур поля потока (M1, M2 и M3) и традиционная двумерная змеевидная структура поля потока (ЗП). Трехмерная структура поля течения представлена на рис. 2 (а). Как показано на рис. 2(б), внутренняя структура трехмерного поля замкнутого течения представляет собой единое змеевидное поле течения.

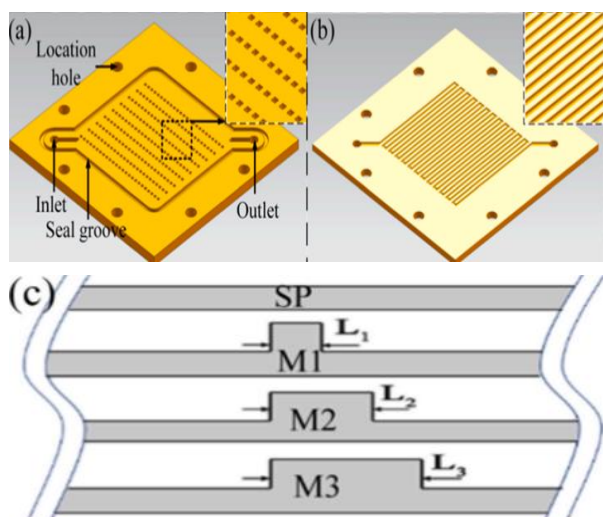


Рис. 2. Принципиальная схема структуры поля течения биполярной пластины:

а – трехмерная структура поля течения; б – поперечное сечение трехмерной структуры поля течения; с – принципиальная схема проточных каналов с различной структурой поля течения [21]

Авторы предыдущих работ разработали трехмерное поле течения с воздушными перегородками. Результаты численного моделирования показали, что по сравнению с традиционным каналом с прямым потоком трехмерное поле потока, оснащенное воздушными перегородками, увеличивает способность массообмена, способствует удалению воды, а также улучшает производительность ПОМТЭ на 9%. Так авторы в работах [35, 36] исследовали трехмерное поле течения, состоящее из основного канала, дополнительного канала и переходной зоны. По сравнению с полем параллельного потока новое поле трехмерного потока может не только улучшить массоперенос, но и обеспечить более равномерное распределение реагента, тем самым значительно улучшая характеристики ПОМТЭ. Zhang и др. [35] и Kim и др. [37] исследовали газожидкостный массоперенос в трехмерном поле течения с мелкой сеткой. Результаты показывают, что поле потока может не только улучшить равномерность распределения газа и жидкости, но и эффективно снизить концентрационную поляризацию.

Допущения модели

Рабочий процесс ПОМТЭ представляет собой процесс взаимного взаимодействия различных фаз материала, в ходе которого сопровождаются электрохимические реакции, тепло- и массоперенос. В разных областях ПОМТЭ происходят разные фазы материальных фаз и электрохимических реакций. Для упрощения численного моделирования сделаны следующие предположения [38-40].

1. Поток газа рассматривается как ламинарный.
2. Газ-реагент представляет собой несжимаемый идеальный газ.
3. Мембранный электрод рассматривается как изотропная пористая середина.
4. Влиянием гравитации пренебрегаем.
5. ПОМТЭ работает в стационарном режиме.
6. Рабочая температура постоянна

Распределение плотности тока

Распределение плотности тока на границе раздела каталитического слоя и микропористого слоя является важным показателем для оценки каталитической эффективности ПОМТЭ. На рис. 3 показано распределение плотности

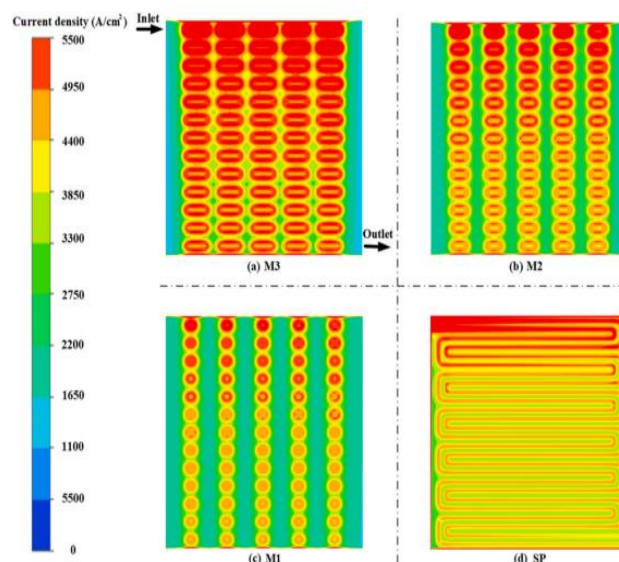


Рис. 3. Распределение плотности тока на границе раздела КС/МПС на катодной стороне при различных полях течения: (а) M3, (б) M2, (с) M1 и (д) ЗП [21]

тока на границе раздела КС/МПС со стороны катода для различных полей потока при напряжении 0,4 В. Видно, что в четырех типах полей потока плотность тока была выше на входе и ниже на выходе. В трехмерных полях течения ток преимущественно распределялся вблизи отверстий. Чем больше пористость трехмерного поля течения, тем больше средняя плотность тока. Это происходит главным образом потому, что по мере увеличения пористости поля трехмерного потока увеличивается подача кислорода и, таким образом, улучшается каталитическая эффективность. Кроме того, средняя плотность тока поля потока М3 также была значительно выше, чем у поля потока ЗП. Основная причина этого заключается в том, что поле потока М3 имело большую площадь контакта с мембранным электродом, что приводило к более низкому контактному сопротивлению [9-18].

Распределение концентрации кислорода

Концентрация кислорода на поверхности катодного каталитического слоя непосредственно влияет на протекание электрохимической реакции, то есть чем выше концентрация кислорода, тем легче протекает электрохимическая реакция. Кроме того, распределение концентрации кислорода может влиять на стабильность работы ПОМТЭ. На рис.4 показано распределение концентрации кислорода на границе раздела КС и МПС со стороны катода в различных полях течения. Видно, что при непрерывном потреблении кислорода в ходе электрохимической реакции концентрация кислорода постепенно снижается от входа к выходу полей течения. Распределение концентрации кислорода в трехмерных полях потока (М1, М2 и М3) является точечным. Средняя концентрация кислорода в М3 значительно выше, чем в М1 и М2, из-за более высокой пористости М3 и, как следствие, большей площади контакта кислорода с каталитическим слоем. Распределение концентрации кислорода в поле течения ЗП имело змеевидный характер [18]. Средняя концентрация кислорода в ЗП была существенно выше, чем в М1 и М2, которые имели относительно низкую пористость, что является важной причиной более высокой удельной мощности ЗП при напряжении 0,4 В, чем М1 и М2.

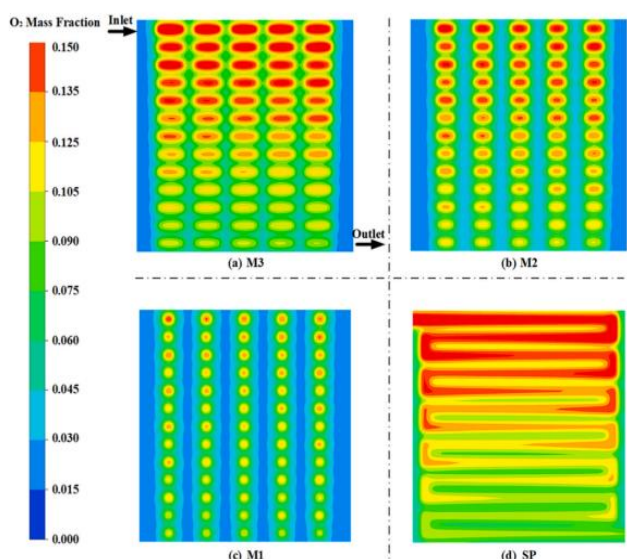


Рис. 4. Распределение концентрации кислорода на границе раздела КС/МПС со стороны катода при различных полях течения: (а) М3, (б) М2, (с) М1 и (д) ЗП [21]

Распределение воды

Распределение воды оказывает большое влияние на производительность ПОМТЭ, особенно затопление водой со стороны катода, что блокирует канал потока и мембранный электрод, усугубляет концентрационную поляризацию и ухудшает характеристики ПОМТЭ [19,20]. На рис. 5 показано распределение воды на границе раздела КС/МПС со стороны катода для различных полей течения. Видно, что распределение воды в М1 и М2 было полосчатым и сетчатым, что обусловлено конденсацией воды, занимающей внутренние поры КС и МПС. В местах, где имеется затопление водой, имеют относительно низкую концентрацию кислорода, пониженную каталитическую эффективность и повышенную концентрационную поляризацию. Среднее содержание воды в трехмерных полях течения уменьшалось с увеличением пористости. По сравнению с М1 и М2, М3 имел меньший дефицит воды, и вода, образующаяся в результате катодной реакции, легко накапливалась вдоль направления проточного канала

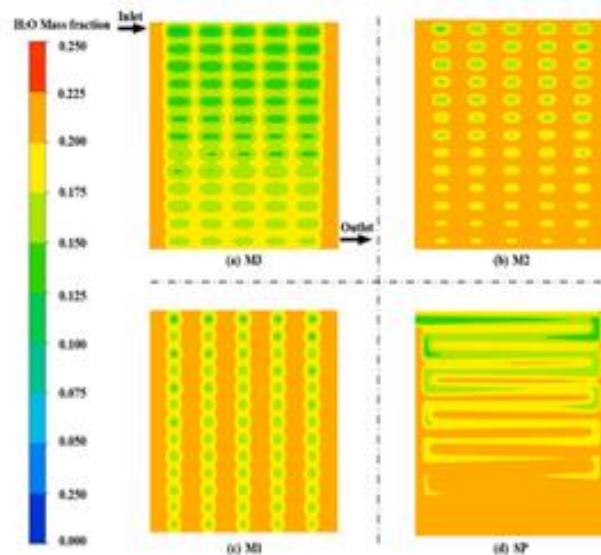


Рис. 5. Распределение воды на границе раздела КС/МПС со стороны катода при различных полях течения: (а) М3, (б) М2, (с) М1 и (д) ЗП [21]

Распределение температуры

Температура влияет на эффективность передачи H^+ и срок службы мембраны. На рис. 6 представлено распределение температуры ПОМ в различных полях течения. Структура поля течения оказывает существенное влияние на распределение температуры ПОМТЭ. Трехмерные поля течения (М1, М2 и М3) представляли собой точечное распределение температуры, а двумерное поле течения ЗП – змеевидное распределение температуры. Средняя температура ПОМ в трехмерных полях течения возрастала с увеличением пористости биполярных пластин. Разница температур ПОМ в четырех различных полях потока находилась в пределах 0,7 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ численного моделирования CFD показал, что трехмерное поле потока М3 имеет наилучшие характеристики, поскольку концентрация кислорода на границе раздела КС/МПС со стороны катода и температура РЕМ бы-

ли относительно выше и распределялись равномерно, что оказывает положительное влияние на эффективность ТЭ. Это хорошо согласуется с общими результатами многих литературных источников.

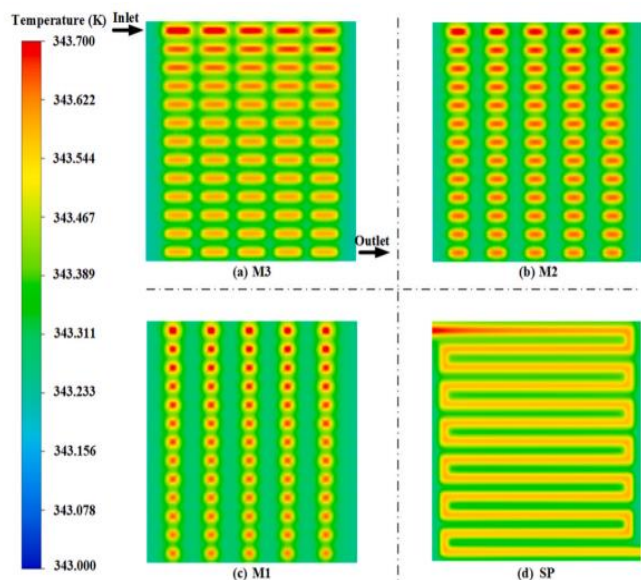


Рис. 6. Распределения температуры ПОМ с различными полями течения: (а) М3, (б) М2, (с) М1 и (д) ЗП [21]

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeon D.H. Effect of channel-rib width on water transport behavior in gas diffusion layer of polymer electrolyte membrane fuel cells // *J. Power Sources*. – 2019. – 423: 280-9.
2. Zhang Z.Q. Three dimensional two-phase and non-isothermal numerical simulation of multi-channels PEMFC / Z.Q. Zhang, W. Liu, Y.L. Wang // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2019. – 44: 379-88.
3. Lim B.H. Three-dimensional study of stack on the performance of the proton exchange membrane fuel cell / B.H. Lim, E.H. Majlan, W.R.W. Daud et al. // *Energy*. – 2019. – 169:338-43.
4. Ahmaditaba A.H. An experimental study on the bubble humidification method of polymer electrolyte membrane fuel cells / A.H. Ahmaditaba, E. Afshari, S. Asghari et al. // *Energy Sources*. – 2018. – 40:1508-19.
5. Wilberforce T. Numerical modelling and CFD simulation of a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell flow channel using an open pore cellular foam material / T. Wilberforce, F.N. Khatib, O.S. Ijaodola, et al. // *Sci Total Environ*. – 2019. – 678:728-40.
6. Chen L. Numerical investigation into the effect of serpentine flow channel with a variable cross-section on the performance of proton exchange / L. Chen, X.M. Xu, H. Hu et al. // *Energy*. – 2023. – 126709.
7. Wang Z. Droplet dynamics in a proton exchange membrane fuel cell flow field design with 3D geometry / Z. Wang, W. Li et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2021. – 46: 16693-707.
8. Atyabi S.A. Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side / S.A. Atyabi, E. Afshari // *J. Clean Prod*. – 2019. – 214:738-48.
9. Xia L. Design and optimization of a novel composite bi-ionic flow field structure using three-dimensional multiphase computational fluid dynamic method for proton exchange membrane fuel cell / L. Xia, Z. Yu, G. Xu et al. // *Energy Convers Manag*. – 2021. – 247:114707.
10. Pasaogullari U. Heat and water transport models for polymer electrolyte fuel cells. – UK: John Wiley, 2009. – P. 616.
11. Shi Z.Y. A numerical study of flow crossover between adjacent flow channels in a proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field / Z.Y. Shi, X. Wang // *J. Power Sources*. – 2008. – 185:985-92.
12. Arvay A. Convergence criteria establishment for 3D simulation of proton exchange membrane fuel cell / A. Arvay, A. Ahmed, X.H. Peng et al. // *Int J Hydrogen Energy*. – 2012. – 37:2482-9.
13. Liu Y. Investigation into the influence of laser energy input on selective laser melted thin-walled parts by response surface method / Y. Liu, J. Zhang, Z.C. Pang et al. // *Opt. Laser Eng*. – 2018. – 103:34-45.
14. Wang H.L. Stainless steel as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells / H.L. Wang, M.A. Sweikart, J.A. Turrent // *J. Power Sources*. – 2003. – 115:243-51.
15. Fiedler F. On the electrical and thermal contact resistance of metal foam / F. Fiedler, N. White, M. Dahari et al. // *Int. J. Heat Mass Tran*. – 2014. – 72:565-71.
16. Kraysberg A. Reduced contact resistance of PEM fuel cell's bipolar plates via surface texturing / A. Kraysberg, M. Auina, E. Eli // *J. Power Sources*. – 2007. – 164:697-703.
17. Limjeearajarus N. Novel hybrid serpentine-interdigitated flow field with multi-inlets and outlets of gas flow channels for PEFC applications / N. Limjeearajarus, T. Santiprasertkul // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2020. – 45:13601-11.
18. Limjeearajarus N. Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC / N. Limjeearajarus, P. Charoen-amornkitt // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2015. – 40:7144-58.
19. Pei P. Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications: a review / P. Pei, H. Chen // *Appl. Energy*. – 2014. – 125:60-75.
20. Lim B.H. Effects of flow field design on water management and reactant distribution in PEMFC: a review / B.H. Lim, E.H. Majlan, W.R.W. Daud et al. // *Ionics*. – 2016.
21. Jian Zhang. Investigation of the three-dimensional flow field for proton exchange membrane fuel cell with additive manufactured stainless steel bipolar plates: Numerical simulation and experiments / Jian Zhang, Pengyi Huang, Honghui Ding, Dongqun Xin, Shufeng Sun // *Energy*. – 2023.
22. Li P., Ding X., Yang Z. et al. Electrochemical synthesis and characterization of polyaniline-coated PEMFC metal bipolar plates with improved corrosion resistance / P. Li, X. Ding, Z. Yang et al. // *Ionics*. – 2018. – 24:1129-37.
23. Xiong K. Modeling, design, materials and fabrication of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell: a review / K. Xiong, W. Wu, S. Wang et al. // *Appl. Energy*. – 2021.
24. Song Y.X. Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell / Y.X. Song, C.Z. Zhang, C.Y. Ling et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2020.
25. Feng K. Ni-Cr Co-implanted 316L stainless steel as bipolar plate in polymer electrolyte membrane fuel cells / Feng K., Y. Shen, D. Liu et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2010. – 35:690-700.

26. Jeong K.I. A review of composite bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells: electrical properties and gas permeability / K.I. Jeong, J.H. Oh, S.A. Song et al. // *Compos Struct.* – 2021.
27. Jeong K.I. A review of composite bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells: electrical properties and gas permeability / K.I. Jeong, J.H. Oh, S.A. Song et al. // *Compos Struct.* – 2021.
28. Kong D. Heat treatment effect on the microstructure and corrosion behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting for proton exchange membrane fuel cells / D. Kong, X. Ni, C. Dong et al. // *Electrochim Acta.* – 2018. – 276:293-303.
29. Wang X.Z. Potential polarization accelerated degradation of interfacial electrical conductivity for Au/TiN coated 316L SS bipolar plates used in polymer electrolyte membrane fuel cells / X.Z. Wang, C.P. Ye, D.D. Shi et al. // *Corrosion Sci.* – 2021. – 54:109624.
30. Wang X.Z. Zr₂N₂O coating-improved corrosion resistance for the anodic dissolution induced by cathodic transient potential / X.Z. Wang, H. Luo, T. Muneshwar et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2018. – 10:40111-2.
31. Lin K. Active screen plasma nitriding of 316 stainless steel for the application of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells / K. Lin, X. Li, Y. Sun et al. // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2014. – 39:21470-9.
32. Lee E. Enhanced corrosion resistance and fuel cell performance of Al1050 bipolar plate coated with TiN/Ti double layer / E. Lee, J. Kim, T. Kim et al. // *Energy Convers Manag.* – 2013. – 75:727-33.
33. Madadi F. Improving performance in PEMFC by applying different coatings to metallic bipolar plates / F. Madadi, A. Rezaeian, H. Edris et al. // *Mater. Chem. Phys.* – 2019. – 238:121911.
34. Zhang D.M. TiN-coated titanium as the bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating / D.M. Zhang, L.T. Duan, L. Guo et al. // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2011. – 36:9155-61.
35. Cai Y.H. Numerical study on a novel 3D cathode flow field and evaluation criteria for the PEM fuel cell design / Y.H. Cai, Z. Fang, B. Chen et al. // *Energy.* – 2018. – 161:28-37.
36. Zhang G. Multiphase simulation of proton exchange membrane fuel cell with 3D fine mesh flow field / G. Zhang, B. Xie, Z. Bao et al. // *Int. J. Energy Res.* – 2018. – 42:4697-709.
37. Kim J. Modeling two-phase flow in three-dimensional complex flow-fields of proton exchange membrane fuel cells / J. Kim, G. Luo, C.Y. Wang // *J. Power Sources.* – 2017. – 365:419-29.
38. Sukkee U. Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells / U. Sukkee, C.Y. Wang // *J. Power Sources.* – 2004. – 15:40-51.
39. Shian L. Three-dimensional modeling and investigation of high temperature proton exchange membrane fuel cells with metal foams as flow distributor / L. Shian, S. Bengt // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2017. – 42:27323-33.
40. Movahedi M. 3D numerical investigation of clamping pressure effect on the performance of Proton Exchange Membrane fuel cell with interdigitated flow field / M. Movahedi, A. Ramiar, A.A. Ranjber // *Energy.* – 2018. – Vol.142. – P. 617-632.

DOI: 10.24892/RIJIE/20240405

Numerical Research of the Three-Dimensional Flow Field of Reagents and Heat Transfer in a Bipolar Plate

Kolbina T.Y.

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
Kazan, Russian Federation
tatianavolf@mail.ru

Abstract. In this paper, three types of 3D flow field bipolar plates with different porosity (M1, M2 and M3) and a conventional two-dimensional (2D) serpentine flow field bipolar plate (SP), and carried out numerical modeling of the distribution of current density, oxygen, water content and temperature in different flow field and their impact on PEMFC performance. The results show that the M3 flow field exhibits the best ability for heat and mass transfer, and also provides a maximum power

density of 0.547 W/cm², which is 8.96% higher than the SP flow field. This is explained by a more uniform distribution of gas and liquid in the M3 flow field, as well as lower contact resistance.

Keywords: fuel cell, bipolar plate, heat and mass transfer, reagents.

Библиографическое описание статьи

Колбина Т.Ю. Численное исследование трехмерного поля течения реагентов и теплоносителя в биполярной пластине // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2024. – Т.11, №4. – С. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20240405

Reference to article

Kolbina T.Y. Numerical research of the three-dimensional flow field of reagents and heat transfer in a bipolar plate, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20240405