

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 629.7.064.52

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЦИКЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАПУСКА И ОСТАНОВА БАТАРЕИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РЕСУРС

Симонов И.В.¹, Кудинов Д.В.^{1,2}, Шевченко Д.И.¹, Корнилов С.В.^{1,3}, Фардеев Л.И.¹

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Simonov.IV@kamaz.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ работы является описание алгоритмов циклирования батареи топливных элементов с протонообменной мембраной, которые целесообразно применять при регулярной эксплуатации в составе транспортного средства и при проведении ресурсных испытаний в лабораторных условиях. Провести комплексную оценку рассмотренных алгоритмов циклирования и количественно оценить влияние внутренних процессов на продолжительность эксплуатации. МЕТОДЫ. Для оценки предлагаемых алгоритмов циклирования использовалось специализированное программное обеспечение AVL Cruise M, в котором была создана цифровая 1D-модель батареи топливных элементов, которая описывает ключевые процессы, протекающие в топливных элементах. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приведен механизм деградиционных процессов которые происходят в топливных элементах при их циклической работе. Проведено количественное сравнение результатов применения двух алгоритмов циклирования по концентрациям платины в мембране, перекиси водорода, удельной электрохимической поверхности каталитического слоя, снижения напряжения с каждым циклом и другим ключевым показателям. Практическая значимость работы заключается в подробно описанных рекомендованных двух алгоритмах циклирования батареи топливных элементов: первый алгоритм применим для эксплуатации батарей топливных элементов в составе транспортного средства, второй подходит для определения долговечности батареи. Последний алгоритм позволит сократить время, затрачиваемое на ресурсные испытания, с 25 000 до 123 часов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования показали, что основными причинами повышенной деградации при циклической работе являются сильное изменение потенциалов на каталитических слоях топливных элементов, входящих в состав батареи, а также диффузия реагентов, которая может приводить к возникновению обратного тока на определенных участках топливных элементов. При рассмотрении стационарной работы как базового процесса, было выявлено, что в первые 50 часов эксплуатации наблюдается резкое уменьшение напряжения, которое стабилизируется только к 300 часам.

Ключевые слова: топливные элементы; деградация топливных элементов; эксплуатация батареи топливных элементов.

Для цитирования: Симонов И.В., Кудинов Д.В., Шевченко Д.И., Корнилов С.В., Фардеев Л.И. Оценка влияния условий циклирования процессов запуска и останова батареи топливных элементов с протонообменной мембраной на эксплуатационный ресурс // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 89-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CYCLING CONDITIONS OF START-UP AND STOP-UP PROCESSES OF A PROTON-EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL STACK ON ITS OPERATIONAL LIFE

Simonov I.V.¹, Kudinov D.V.^{1,2}, Shevchenko D.I.¹, Kornilov S.V.^{1,3}, Fardeyev L.I.¹

¹PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

³Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Simonov.IV@kamaz.ru

Abstract: THE PURPOSE of this work is to describe the cycling algorithms for fuel cell batteries with proton exchange membranes, which are suitable for use in regular operation in vehicles and during resource testing in laboratory conditions. To conduct a comprehensive assessment of the considered cycling algorithms and quantitatively evaluate the impact of internal processes on the duration of operation. METHODS. To evaluate the proposed cycling algorithms, specialized software AVL Cruise M was used to create a digital 1D model of a fuel cell battery that describes the key processes occurring in fuel cells. RESULTS. The article describes the mechanism of degradation processes that occur in fuel cells during their cyclic operation. A quantitative comparison was made of the results of applying two cycling algorithms based on the concentrations of platinum in the membrane, hydrogen peroxide, the specific electrochemical surface area of the catalytic layer, voltage reduction with each cycle, and other key indicators. The practical significance of the work lies in the detailed description of the two recommended fuel cell battery cycling algorithms: the first algorithm is applicable for the operation of fuel cell batteries in a vehicle, while the second is suitable for determining battery life. The latter algorithm will reduce the time spent on resource testing from 25,000 to 123 hours. CONCLUSION. The results of the study showed that the main causes of increased degradation during cyclic operation are significant changes in the potentials on the catalytic layers of the fuel cells that make up the battery, as well as the diffusion of reagents, which can lead to the emergence of reverse current in certain areas of the fuel cells. When considering steady-state operation as the base process, it was found that in the first 50 hours of operation, there is a sharp decrease in voltage, which stabilizes only after 300 hours.

Keywords: fuel cells; fuel cell degradation; fuel cell stack operation.

For citation: Simonov I.V., Kudinov D.V., Shevchenko D.I., Kornilov S.V., Fardeyev L.I. Assessment of the influence of cycling conditions of start-up and stop-up processes of a proton-exchange membrane fuel cell stack on its operational life. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (1): 89-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102.

Введение (Introduction)

Транспортные средства с энергетическими установками на основе низкотемпературных полимерных топливных элементов широко востребованы в различных отраслях [1]. Экспертная оценка показывает к 2030 г. в Европе будет более 500 тыс. легких коммерческих автомобилей, к 2050 году их количество увеличиться до 6,5 млн. транспортных средств [2, 3]. Однако, при анализе водородного транспорта чаще всего учитывают КПД цепочки преобразования от производства водорода до колеса транспортного средства, в текущей ситуации полный КПД находится в пределах 25-35% [4]. Для коммерциализации водородного транспорта необходимо повышать КПД на всех этапах передачи энергии, а также повышать эксплуатационные качества энергетических установок при сохранении или уменьшении стоимости. Для этого необходимо увеличение ресурса электрохимического генератора входящего в состав энергетической установки применяемой в транспортных средствах [5].

Цель исследования заключается в выборе и оценке алгоритмов циклирования батарей топливных элементов для дальнейшего их применения при разработке батарей топливных элементов для транспортных средств.

Научная значимость заключается в составлении двух алгоритмов циклирования батареи топливных элементов и оценки их влияния на ресурс батареи.

Практическая значимость исследования заключается в потенциальном применении алгоритмов при дальнейшей разработке отечественных батарей топливных элементов.

Электрохимический генератор состоит из батареи топливных элементов, систем подготовки, подачи реагентов и отвода уходящих газов, средств мониторинга и управления. В данной работе рассматривается проблема долговечности батареи топливных элементов, поскольку она является ключевым компонентом электрохимического генератора, влияющим на его ресурс, и в наибольшей степени подвержена негативному влиянию циклических процессов запуска и останова. Как было описано в работах [6, 7], процесс деградации батареи топливных элементов на 33% зависит от циклов «старт-стоп» и на 56,5% – от работы под изменяемой нагрузкой. Для уменьшения пагубного влияния циклической работы в исследованиях [8] была применена вспомогательная нагрузка, что не является оптимальным решением по причине усложнения конструкции, в рассмотренных методах нагрузочный резистор не применяется. В целях корректного анализа циклирования батареи топливных элементов следует проводить испытания циклов «старт-стоп» всей энергетической установки, которая включает электрохимический генератор, вспомогательное оборудование, систему хранения компримированного водорода и систему управления.

Для упрощения оценки в данной работе рассматривается работа энергетической установки без учета запаса водорода в баллонах.

В данной работе анализ деградации производится на основе проведенных виртуальных испытаний цифровой модели батареи топливных элементов. Далее по тексту под «испытаниями» подразумеваются виртуальные испытания.

Как уже отмечено выше, долговечность является одним из ключевых параметров батареи топливных элементов. Ресурс батареи варьируется от 3 000 до 25 000 часов [9, 10], определение ресурса требует значительных временных и денежных затрат для проверки на физических образцах. Для ускорения и удешевления ресурсных испытаний возможно подвергание батареи топливных элементов неблагоприятным, длительным циклическим процессам запуска и останова.

Вследствие того, что методы запуска и останова всей энергетической установки оказывают существенное влияние на процессы деградации батареи топливных элементов, необходимо выявление оптимальных алгоритмов циклирования процессов запуска и останова как для эксплуатации в составе транспортных средств, так и для ускоренных ресурсных испытаний, т.е. определение нужных алгоритмов системы «старт-стоп».

В данной работе объектом исследований выступает батарея топливных элементов, метод исследования – циклирование батареи. Под циклированием подразумевается последовательное повторение запуска, выхода на номинальную мощность и останова исследуемого объекта. Изменение условий процессов циклирования позволяет сравнить параметры, характеризующие деградацию батареи, тем самым оценить эксплуатационный ресурс.

Литературный обзор (Literature Review)

Авторами работы [7] было описано, что при применении батареи топливных элементов в составе энергетической установки необходима оптимизация эксплуатации в соответствии с частыми циклическими процессами системы «старт-стоп». При работе системы в режиме «старт-стоп» потенциал катода сильно возрастает, что вызывает окисление каталитического слоя. Этого можно избежать путем плавного запуска и останова батареи топливных элементов. В идеальных условиях на протяжении всего срока эксплуатации батареи необходимо предотвращение попадания кислорода в анодную камеру, так как это является основной причиной деградации [6]. При циклическом запуске и останове батареи топливных элементов из-за разницы давлений молекулы газов, содержащиеся в воздухе, диффундируют в анодное пространство, поэтому при определении стратегий запуска и останова батареи необходимо предусмотреть возможность удаления воздуха из анодного пространства. Наличие кислорода в анодном пространстве может вызвать явление, называемое обратным током. Обратный ток возникает в случае, когда окислительно-восстановительные реакции в определенном месте топливного элемента меняются на противоположные процессы, при этом происходит образование протонов водорода на катодной стороне и образование воды на анодной стороне топливного элемента.

Обратный ток, возникающий в топливном элементе, воздействует на батарею топливных элементов, снижая ее ресурс. Появление обратного тока связано с тем, что на аноде могут одновременно присутствовать водород и кислород, что запускает процесс восстановления кислорода со стороны как анода, так и катода. В этом случае разница потенциалов возрастает до 1,44 В (для неразрушительной работы разница потенциалов

должна быть менее 0,8 В), что вызывает сильное окисление углеродной подложки каталитического слоя.

При первом запуске батареи после долгого простоя потенциалы катализаторов катода и анода равны потенциалу равновесия кислорода ($V_{O_2}^p = 1,23$ В, по отношению к потенциалу электролита Φ (мембраны)). Разность потенциалов равна в этом случае 0 В ($V_{O_2}^{кат} - V_{H_2}^{ан}$). При подаче водорода потенциал анода становится равным равновесному потенциалу водорода ($V_{H_2}^{ан} = 0$ В, по отношению к потенциалу электролита (мембраны)). При этом из-за электрического сопротивления компонентов топливного элемента напряжение повышается примерно до 0,85 В. Авторы публикации [11] описали, что повышение до теоретического максимального напряжения невозможно из-за наличия активационных потерь, омических перенапряжений и потерь напряжения Нернста (учитывающего парциальное давление реагентов).

В работе [12] было выявлено, что кислород находящийся на анодной стороне, снижает потенциал электролита (в местах присутствия). Вследствие снижения в данном месте потенциала электролита создается следующая разность потенциалов (рис. 1):

$$V_{ТЭ} = V_{O_2}^{кат} - V_{H_2}^{ан} - \Phi \quad (1)$$

Результирующее значение напряжения топливного элемента ($V_{ТЭ} = 1,443$ В) вызывает коррозию углерода, разрушая катодный каталитический слой [13].

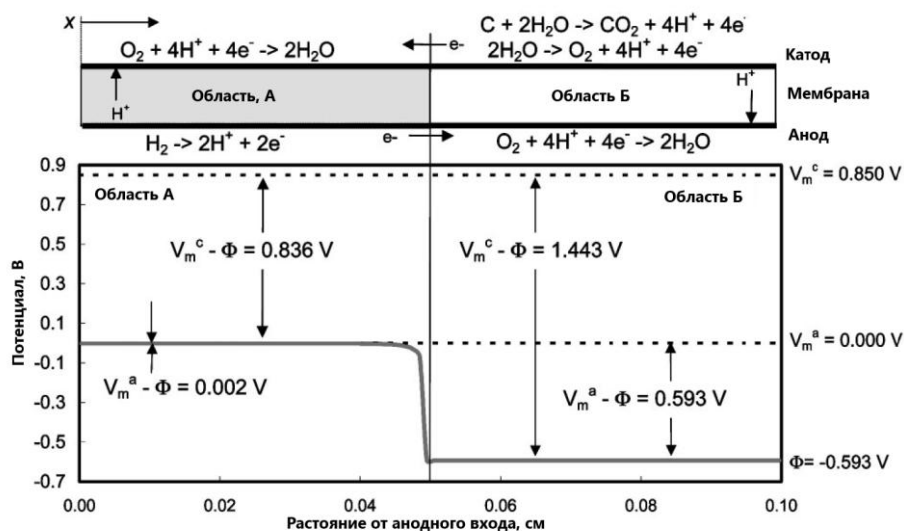
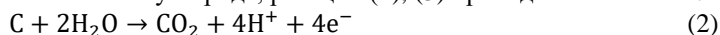


Рис. 1. Распределение потенциала по длине газовой канала Fig. 1. Potential distribution along the length of the gas channel

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Также в топливном элементе может возникнуть топливное голодание, вызванное не только плохим распределением реагентов и затоплением активной зоны топливного элемента, но и процессами запуска и останова. Так, если при запуске батареи с анодной стороны существует нехватка водорода, газы, содержащиеся в воздухе (в частности кислород), с катодной стороны будут активно диффундировать через мембрану. В работе [14] была продемонстрирована сильная зависимость процесса окисления углерода со стороны катода от диффузии кислорода через полимерную мембрану.

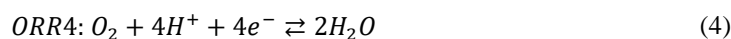
Окисление углерода происходит и при нормальной работе топливного элемента согласно формулам (2) и (3). Однако ввиду малой кинетики реакции протекают медленно. При циклических процессах «старт-стоп», когда потенциал катода превышает термодинамический потенциал окисления углерода, реакции (2), (3) проходят интенсивно.



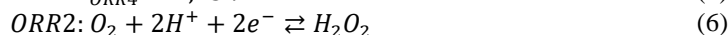
Дополнительно стоит учитывать возможность образования и разложения перекиси водорода (H_2O_2) в топливном элементе. В большинстве случаев перекись водорода образуется в слоях катодного и анодного катализатора и на частицах платины, находящихся в мембране. Рассмотрим влияние перекиси водорода на напряжение топливного элемента на примере реакций, происходящих со стороны катода. Для слоев катодного катализатора концентрация H_2O_2 определяется 3 электрохимическими реакциями:

- 4-электронной (ORR4) реакцией, формула (4);
- 2-электронной (ORR2) реакцией восстановления кислорода, формула (6);

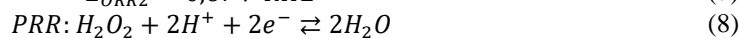
• реакцией восстановления пероксида водорода (PRR) формула (8), где в качестве условно нулевого потенциала принимается потенциал обратимого водородного электрода (RHE).



$$E_{ORR4} = 1,23 \text{ V RHE} \quad (5)$$



$$E_{ORR2} = 0,67 \text{ V RHE} \quad (7)$$



$$E_{PRR} = 1,67 \text{ V RHE} \quad (9)$$

Повышение напряжения вызывает коррозию углеродного носителя, тем самым разрушая катодный каталитический слой. В целях упрощения анализа данных в этой работе не рассматривается изменение пористости и толщины слоев мембранно-электродного блока, как было описано в работе [15].

В научных работах описываются различные методы циклирования батареи топливных элементов [6, 16, 17]. Из результатов работы [18] выявлено, что скорость запуска батареи ограничивается падением давления реагентов (при резком увеличении снимаемой мощности), начальной долей воды в компонентах мембранно-электродного блока, изначальной температурой батареи и входных газов. Следовательно, изменение этих параметров влияет на динамику изменения мощности батареи топливных элементов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим два варианта виртуального циклирования: в первом каждый цикл происходит без продувки анодного объема, второй вариант предусматривает цикл «старт-стоп» с последующей продувкой анодного объема батареи воздухом. Заполнение воздухом анодного и катодного объема симулирует длительный простой энергетической установки. Это вызывает незащищенный процесс запуска, при котором в заполненный воздухом анодный объем подается чистый H_2 , что приводит к неравномерному распределению напряжения и возможности возникновения обратного тока. Данный процесс целесообразно использовать, если необходимо сократить время длительных испытаний батареи топливных элементов. Следует отметить, что в результате каждого цикла активная каталитическая поверхность уменьшается из-за растворения, агломерации и отрыва платины, так как малые частицы платины стремятся уменьшить поверхностную энергию.

Для определения влияния данных стратегии на батарею топливных элементов необходимо проведение циклирования батареи топливных элементов с целью выявления шага уменьшения напряжения и концентрации катализатора в мембране и таким образом определение влияния циклической работы на долговечность батареи.

Для корректной оценки двух вариантов необходимо иметь данные для идеализированного случая, когда батарея топливных элементов в наименьшей степени подвержена процессам деградации из-за частого изменения мощности. Поэтому необходимо сравнение двух методов циклирования батареи с вариантом работы под постоянной нагрузкой, когда вырабатываемая мощность остается постоянной на протяжении всего времени моделирования.

Исследование алгоритмов работы системы «старт-стоп» проводилось на основе математической 1D-модели энергетической установки, созданной в специализированном программном обеспечении AVL Cruise M. Данное программное обеспечение позволяет детально моделировать отдельные водородные топливные элементы, водородные электрохимические генераторы, а также транспортные средства на их основе.

В данной работе предлагается определить оптимальную стратегию циклирования процессов «старт-стоп» при номинальной температуре окружающей среды (25°C).

1D-модель энергетической установки (рис. 2) состоит из следующих основных блоков: анодного контура, катодного контура, батареи топливных элементов, контура охлаждения, блока системы управления и системы хранения (с неограниченным запасом водорода для проведения длительных виртуальных испытаний).

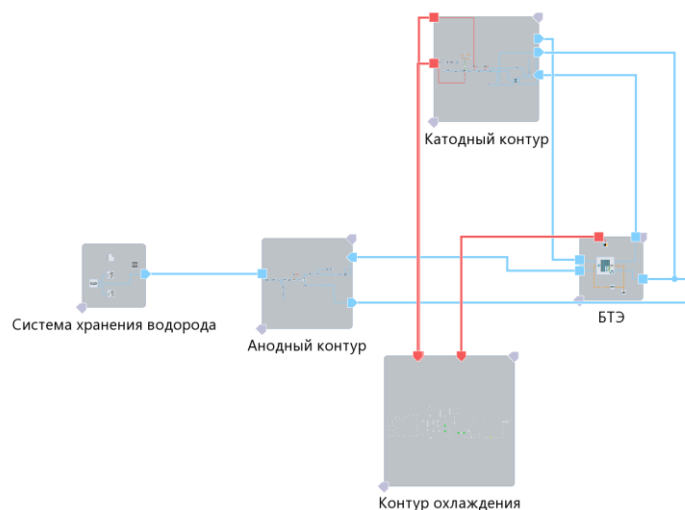


Рис. 2. Схема 1D-модели энергетической установки *Fig. 2. Scheme of the 1D-model of the power system*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Основные параметры данной энергетической установки представлены ниже:

- номинальная мощность батареи топливных элементов – 68 кВт;
- количество топливных элементов – 270 шт.

Данные параметры непосредственно влияют на работу батарею топливных элементов и накладывают определенные ограничения на ее эксплуатацию.

Эксплуатация энергетической установки

Как было указано выше, при стационарной работе батареи топливных элементов активная каталитическая поверхность уменьшается из-за растворения, агломерации и отрыва платины, также деградация полимера мембраны снижает производительность топливных элементов. Эти явления можно наблюдать при длительной симуляции (рис. 3-5). Была разработана модель рабочего процесса батареи топливных элементов с постоянной выработкой 68 кВт на протяжении 300 ч. В целях оптимизации ресурсов вычислительных машин в представленных рисунках приведены значения, полученные в последние часы работы батареи топливных элементов.

Расчет снижения удельной электрохимической поверхности производится путем вычитания из изначальной удельной электрохимической поверхности, средней доли загрязненной поверхности молекулами: C, COH, CO, Pt, PtOH, PtO. Вычисление средней доли загрязнения поверхности вычисляется с помощью формулы:

$$\langle \theta_j \rangle = \frac{(\sum_{i=1}^M \theta_{ji} * N_i)}{(\sum_{i=1}^M N_i)} \quad (10)$$

где $\langle \theta_j \rangle$ – средняя доля поверхностного покрытия;

θ_j – доля поверхностного покрытия;

j – наименование молекул C, COH, CO, Pt, PtOH, PtO;

N_i – количество частиц i-го класса, где i – количество размерных классов частиц платины;

M – молярная масса.

Концентрация платины в мембране моделируется путем дискретизации полимерной мембраны и вычисляется согласно формуле:

$$K = D_s * \frac{d^2 C_{Pt}}{dx_{mem}^2} \quad (11)$$

где C_{Pt} – концентрация диффундирующих частиц;

D_s – коэффициент диффузии частиц в мембране;

Δx_{mem}^2 – толщина мембраны, деленная на количество разбиваемых ячеек мембраны (при дискретизации).

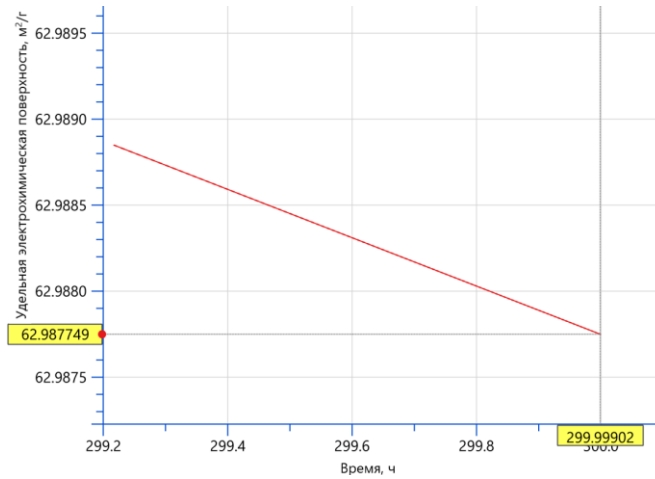


Рис. 3. Удельная электрохимическая поверхность при стационарной работе батареи топливных элементов *Fig. 3. Specific electrochemical surface in stationary fuel cell stack operation*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

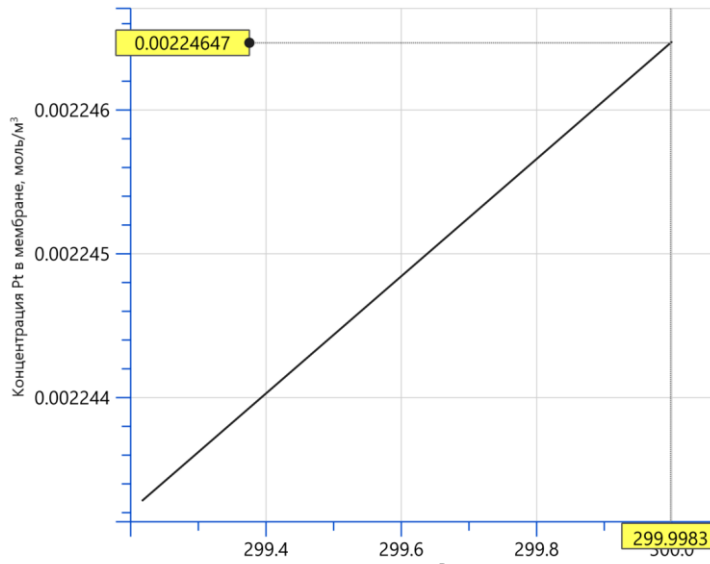


Рис. 4. Концентрация Pt в мембране *Fig. 4. Pt concentration in the membrane*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

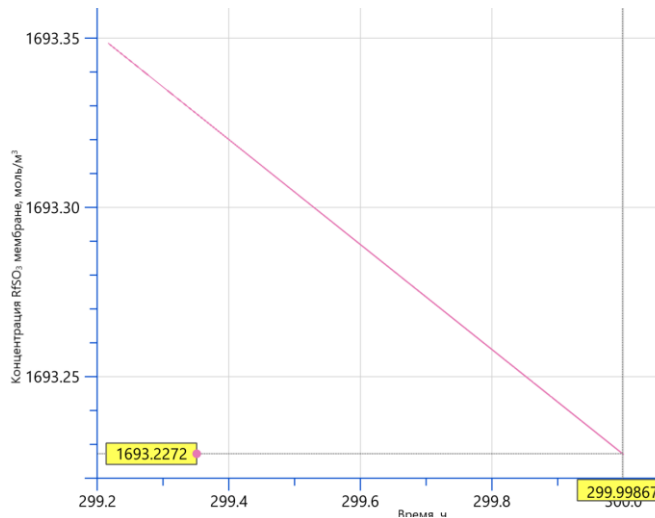


Рис. 5. Концентрация RfSO₃ групп в мембране *Fig. 5. Concentration of RfSO₃ groups in the membrane*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из представленных графиков следует, что со временем концентрация платины в мембране постепенно увеличивается из-за диффузии ионов платины и последующей кристаллизации в мембране в присутствии водорода, а средняя концентрация боковых цепей сульфокислоты в мембране уменьшается. Это свидетельствует о постепенном разрушении протонообменной мембраны, также происходит деградация иономера из-за образования радикалов ОН из пероксида водорода (H_2O_2) при протекании реакции с ионами железа (реакция Фентона), атакующих полимерную мембрану и основные цепи иономера. Средняя концентрация αO , βO , $[CF_2]_nCOOH$, CF_2 в мембране равна $90,61 \text{ моль/м}^3$, 17 моль/м^3 , $21,3 \text{ моль/м}^3$, $138,346 \text{ моль/м}^3$ соответственно.

Более наглядно изменение в работе батареи топливных элементов отображают графики изменения напряжения топливного элемента и плотности тока (рис. 6-7). Видно, что в самом начале работы батареи топливных элементов происходит «внутренняя настройка» батареи, и только по истечении 300 часов эксплуатации мы наблюдаем стабилизацию значений напряжений и плотности тока. Падение напряжения топливного элемента по истечении 300 часов равняется 2 мВ, при этом плотность тока увеличилась на $2,25 \text{ мА/см}^2$, так как было установлено целевое значение вырабатываемой мощности батареи топливных элементов, равное 68 кВт.

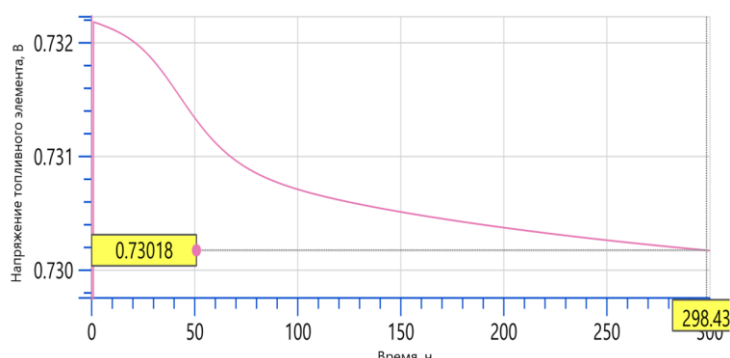


Рис. 6. Напряжение топливного элемента, Fig. 6. Voltage of the fuel cell included in the stack входящего в состав батареи топливных элементов

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

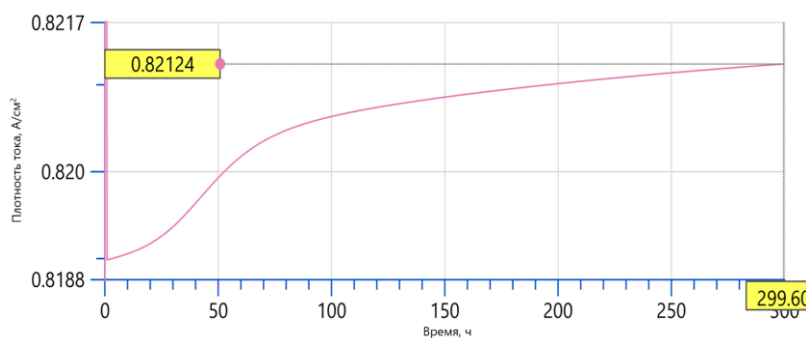


Рис. 7. Плотность тока топливного элемента, Fig. 7. Current density of the fuel cell included in the stack входящего в состав батареи топливных элементов

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вследствие того, что длительные симуляции требуют значительных вычислительных ресурсов, для одновременного анализа двух вариантов целесообразно сократить время симуляции. Характер изменений напряжения и плотности тока топливного элемента следует учитывать при дальнейших симуляциях.

Алгоритмы циклирования батареи топливных элементов

Рассмотрим первый алгоритм циклической работы батареи топливных элементов с режимом управления потреблением кислорода. В начале электрическая нагрузка не подключена к батарее топливных элементов. Осуществляется подача реагентов с постепенным увеличением давления. Когда давление подаваемых реагентов становится равным номинальному значению (1,4 бар абс.), подключается электрическая нагрузка, мощность которой линейно увеличивается до достижения номинальной мощности батареи топливных элементов (68 кВт). После непродолжительной работы на номинальной мощности батареи топливных элементов, электрическая нагрузка линейно уменьшается до 0 кВт, одновременно с этим происходит постепенное закрытие входных и выходных

катодных патрубков. Далее батарея топливных элементов остается с разомкнутой электрической цепью в течение фиксированного времени. На этом этапе завершается один цикл и по мере необходимости осуществляется повтор данных этапов.

Второй алгоритм циклической работы батареи топливных элементов с режимом анодной продувки воздухом отличается тем, что в начале каждого цикла анодная камера батареи топливных элементов заполняется воздухом (что имитирует длительный простой батареи). Далее анод кратковременно продувается водородом, часть кислорода может оставаться в анодном объеме. После данной операции алгоритм аналогичен варианту с режимом управления потреблением кислорода.

Результаты (Results)

Согласно описанным алгоритмам циклической работы батареи топливных элементов были проведены виртуальные испытания. Основные параметры представлены ниже (табл. 1). Из полученных данных следует, что при постоянной нагрузке уменьшение напряжения составило 2 мВ (за первые 300 ч), тогда как при применении первого циклического алгоритма (с режимом потребления кислорода) среднее уменьшение напряжения с каждым циклом составило 6,8 мВ/цикл. При втором циклическом алгоритме (с анодной продувкой воздухом) снижение напряжения составило 7,3 мВ/цикл.

Однако стоит учесть, что в данном случае рассматривались первые 20 циклов. Как показали длительные испытания при стационарной работе батареи топливных элементов (рис. 7), напряжение сильно изменяется в первые 50 часов эксплуатации и стабилизируется ближе к 300 часам работы. Следовательно, для определения корректного значения уменьшения напряжения при циклировании необходимо проведение циклических испытаний в течение не менее, чем 300 часов.

Полученные данные согласуются с результатами, приведенными в работе [7], где авторы зафиксировали наименьшее уменьшение напряжения – 23 мВ/цикл. Из-за различия в методике циклирования и применяемых материалах, наблюдается разница в значениях падений напряжения при циклировании. Однако близкий диапазон значений подтверждает корректность проведенных расчетов.

Таблица 1

Table 1

Параметры батареи топливных элементов при эксплуатации

Parameters of the fuel cell stack during operation

Параметр	Размерность	Эксперимент		
		Стационарная работа батареи	1-й алгоритм работы батареи	2-й алгоритм работы батареи
Время работы	ч	300	1	1
Удельная электрохимическая поверхность	м ² /г	63,4187	63,4158	63,4093
Концентрация Pt в мембране	моль/м ³	0,001014	0,001278	0,001513
Концентрация RfSO ₃ -групп в мембране	моль/м ³	1811,31	1809,257	1808,487
Массовая доля анодных газов при P = 68 кВт	-	H ₂ = 0,39 H ₂ O = 0,607 N ₂ = 0,003 O ₂ = 0	H ₂ = 0,393 H ₂ O = 0,494 N ₂ = 0,113 O ₂ = 0	H ₂ = 0,459 H ₂ O = 0,417 N ₂ = 0,112 O ₂ = 0,012
Максимальное напряжение топливного элемента	В	0,943	0,945	1,15
Суммарная молярная плотность H ₂ O ₂ в батарее топливных элементов	моль/м ³	0,01223	0,1204	0,1292
Снижение напряжения топливного элемента	мВ/цикл	2	6,8	7,3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из приведенной таблицы следует, что 1-й алгоритм циклирования является наиболее подходящим для применения в энергетических установках, вследствие наименьшего

снижения напряжения (6,8 мВ/цикл), за исключением работы батареи топливных элементов в стационарном режиме.

Результаты исследования демонстрируют, что при циклической работе батареи топливных элементов суммарная молярная плотность перекиси водорода возрастает более чем в 10 раз, что впоследствии вызывает повышение напряжения топливных элементов при разложении перекиси водорода. Однако в ходе данных виртуальных испытаний подобное явление не зафиксировано. Более высокое максимальное напряжение топливных элементов во втором алгоритме циклирования батареи вызвано наличием реакций восстановления молекул кислорода в анодном объеме.

Во втором алгоритме циклирования батареи топливных элементов наличие кислорода в анодной камере вызывает повышение напряжения в отдельных частях батареи.

Концентрация платины в мембране говорит о том, что существует диффузия водорода с анода на катод, при этом молекулы водорода взаимодействуют с ионами платины и восстанавливают ее, образуя платиновые дорожки, которые в свою очередь вызывают повышенную деградацию полимера, так как на платиновой дорожке протекают реакции окисления и восстановления реагентов [19].

Более заметное уменьшение боковых сульфоновых групп ($RfSO_3$) свидетельствует об усиленной деградации полимера вследствие того, что деградация всей мембраны первоначально инициируется разрушением боковых цепей полимера [20].

Суммарная молярная плотность перекиси водорода в батарее топливных элементов при циклировании на порядок превосходит значение при стационарной работе батареи. Следовательно, необходимо предъявление повышенных требований к защитным покрытиям биполярных пластин (составной компонент топливных элементов) в связи с возникновением опасных ОН-радикалов при взаимодействии перекиси водорода с ионами металлов [20].

Выводы (Conclusions)

В данной работе были рассмотрены два алгоритма циклирования батареи топливных элементов, которые сравнивались с работой батареи на постоянной мощности (рис. 8). Первый алгоритм циклирования (рис. 9) с управлением потребления кислорода заключается в циклическом изменении мощности батареи топливных элементов от 0 кВт к номинальному значению мощности (68 кВт) и обратно до 0 кВт. При снижении мощности происходит постепенное уменьшение подачи воздуха (стехиометрия снижается) и когда снимаемая мощность равно 0 кВт входные и выходные катодные патрубки полностью закрываются. Данный алгоритм подходит для эксплуатации батареи топливных элементов в транспортном средстве.

Второй алгоритм циклирования (рис. 10) предполагает продувку анодного объема потоком воздуха перед каждым циклом, что моделирует длительный простой батареи топливных элементов. После заполнения воздухом анодного объема, осуществляется кратковременная продувка водородом и реализуется цикл согласно первому алгоритму.

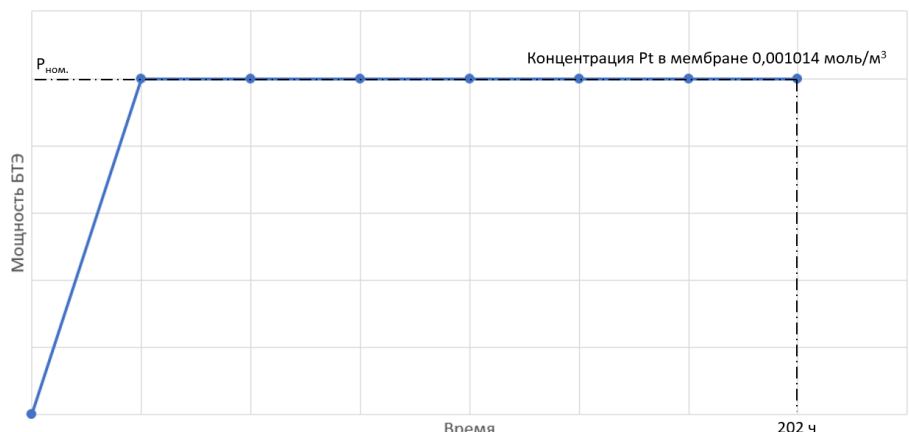


Рис. 8. Графическое изображение стационарной работы батареи топливных элементов

Fig. 8. Graphical representation of stationary work of FC stack

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

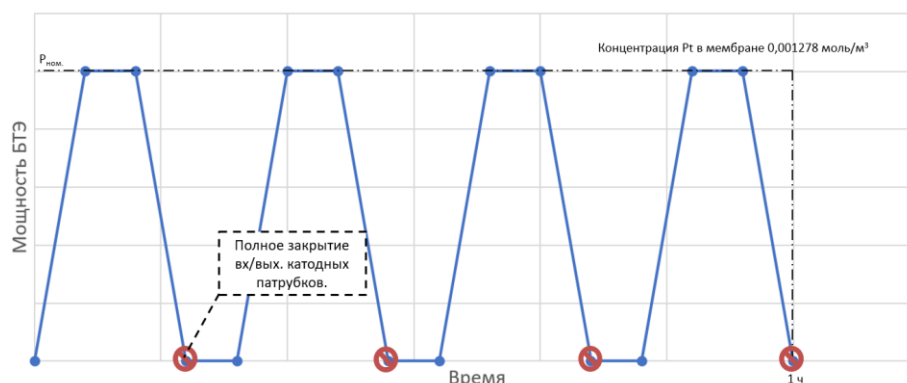


Рис. 9. Графическое изображение стационарной работы батареи топливных элементов с режимом управления потреблением кислорода

Fig. 9. Graphical representation of stationary work of FC stack

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

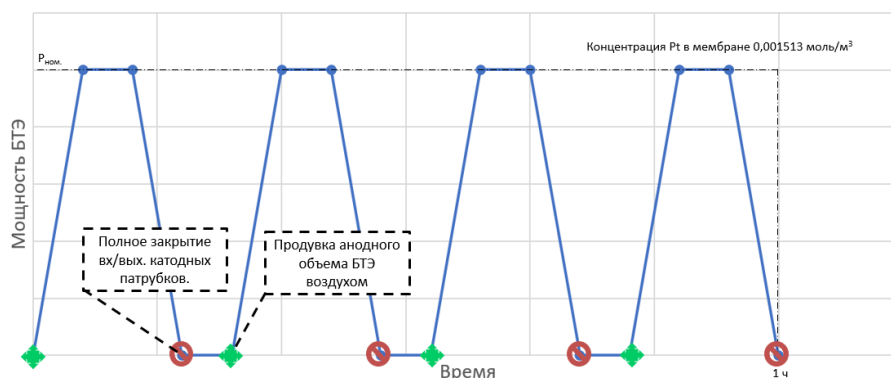


Рис. 10. Графическое изображение циклической работы батареи топливных элементов с режимом анодной продувки воздухом

Fig. 10. Graphical representation of FC stack cycle operation with anodic air purging mode

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основе исследования циклирования батареи при использовании данных алгоритмов в 1D-модели энергетической установки были определены ключевые показатели, по которым возможно выявить оптимальный метод запуска и останова батареи топливных элементов.

В результате расчетных исследований выявлено постепенное увеличение концентрации платины в протонообменной мембране при циклической работе, это приводит к снижению активной площади катализатора и сокращению срока эксплуатации топливных элементов. При использовании первого алгоритма напряжение топливных элементов уменьшилось на 6,85 мВ/цикл, концентрация платины в мембране составила 1,276 ммоль/м³ за первый час. При этом в батарее топливных элементов с предварительно заполненным воздухом анодом концентрация платины в мембране составила 1,513 ммоль/м³ (за 1 ч. работы), тогда как при работе с постоянной нагрузкой данная концентрация была достигнута после 202 часов работы батареи. Сравнение результатов моделирования позволяет сделать вывод, что применение 1-го алгоритма продлевает срок эксплуатации и его возможно использовать при реальной эксплуатации. Тогда как для ускоренных лабораторных испытаний топливных элементов на ресурс целесообразно применение 2-го алгоритма.

Тем не менее для получения более точных данных необходимо проведение длительного моделирования и экспериментов для верификации, так как в течение первых 300 часов эксплуатации наблюдается нелинейное изменение напряжения и плотности тока топливных элементов, входящих в состав батареи.

Полученные результаты после верификации будут использоваться ПАО «КАМАЗ» в процессе разработки отечественных батарей топливных элементов для транспортного применения.

Литература

1. Bravo D., Boillot L. Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects // JRC Publications Repository. 2024. doi:10.2760/892745.

2. Корнилов С.В., Зверева Э.Р., Федорова А.А., и др. Перспективы развития водородной энергетики и рынка транспортных средств на водородном топливе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 3-18.
3. Корнилов С.В., Симонов И.В., Зверева Э.Р. Исследование энергетических систем на водородных топливных элементах для транспортных средств // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей “Энергетика и автоматизация в современном обществе”; Санкт-Петербург. 2023. С 189 – 198.
4. Killingland M, Taylor C, Eriksen R. Hydrogen forecast to 2050 // DNV. 2022. 114 с.
5. Pei P., Meng Y., Chen D., et al. Lifetime prediction method of proton exchange membrane fuel cells based on current degradation law // Energy. 2023. V. 265, 126341. doi: 10.1016/j.energy.2022.126341.
6. Zhang T., Wang P., Chen H., et al. A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition // Appl Energy. 2018. Vol. 4, pp. 249 - 262. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.049.
7. Oyarse A., Zakrisson E., Ivity M., at al. Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 254, pp. 232–240. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.058.
8. Drugeot T., Micoud F., Pinton E., at al. Experimental assessment of proton exchange membrane fuel cell performance degradations during emulated start-up/shut-down phases // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, pp. 5630 - 5642. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.020.
9. Arrigoni A., Arosio V., Basso A., at al. Greenhouse Gas Implications of Extending the Service Life of PEM Fuel Cells for Automotive Applications: A Life Cycle Assessment // Clean Technologies. 2022. Vol. 4, pp. 132–148. doi: 10.3390/cleantechnol4010009.
10. Dirkes S., Leidig J., Fisch P., at al. Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part II: On-board operando feature extraction, condition assessment and lifetime prediction // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 283, 116943. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116943.
11. Zhou Z., Ye L., Qiu D., at al. Experimental investigation and decoupling of voltage losses distribution in proton exchange membrane fuel cells with a large active area // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 452, 139497. doi: 10.1016/j.cej.2022.139497.
12. Bisello A., Colombo E., Baricci A., at al. Mitigated Start-Up of PEMFC in Real Automotive Conditions: Local Experimental Investigation and Development of a New Accelerated Stress Test Protocol // Journal of The Electrochemical Society. 2021. Vol. 168, 054501. doi: 10.1149/1945-7111/abf77b.
13. Reiser C., Bregoli L., Patterson T., at al. A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells // Electrochemical and Solid-State Letters. 2005. Vol. 8, pp 273 - 276. doi: 10.1149/1.1896466.
14. Clemens F., Edjokola J., Telenta M., at al. Modeling of Catalyst Degradation in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Applied to Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation // Fuel Cells From Fundamentals to Systems. 2024. Vol. 24. doi: 10.1002/fuce.202300237.
15. Soleymani A., Bonville L., Wang C., at al. Quantifying key parameters to provide better understating of microstructural changes in polymer electrolyte membrane fuel cells during degradation: A startup/shutdown case study // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 563. 232807. doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232807.
16. He L., Zhan Z., Hong C., at al. A quick evaluation method for the lifetime of the fuel cell MEA with the particle filter algorithm // International Journal of Green Energy. 2021. Vol. 18, pp 1536 – 1549. doi: 10.1080/15435075.2021.1911809.
17. Fan J., Yang Y., Ma T., at al. Investigation on a Shutdown Control Strategy with Residual Oxygen Rapid Elimination for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System // Energies. 2023. Vol. 16. 1285. doi: 10.3390/en16031285.
18. Liu J., Chen H., Zhang T. Analysis of cold start characteristics in a PEMFC stack with different current loading modes // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 51, pp. 1456 – 1476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.303.
19. Burlatsky S., Gummalla M., Atrazhev V., at al. The Dynamics of Platinum Precipitation in an Ion Exchange Membrane // Journal of The Electrochemical Society. 2011. Vol. 158, pp. 322- 330. doi: 10.1149/1.3532956.
20. Wong K., Kjeang E. Macroscopic In-Situ Modeling of Chemical Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells // Journal of The Electrochem Society. 2014. Vol. 161, pp. 823–832. doi: 10.1149/2.0031409jes.

Авторы публикации

Симонов Иван Владимирович – ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Simonov.IV@kamaz.ru*

Кудинов Даниил Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский федеральный университет», г. Казань, Россия; ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *KudinovDV@kamaz.ru*

Шевченко Денис Иванович – начальник отдела, ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *ShevchenkoDI@kamaz.ru*

Корнилов Семён Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия; главный конструктор энергетических систем, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Фардеев Ленар Ильдарович – директор центра электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

References

1. Bravo D., Boillot L. Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects // JRC Publications Repository. 2024. doi:10.2760/892745.
2. Kornilov S.V., Zvereva E.R., Fedorova A.A., et al. Prospects for the development of hydrogen energy and the market for hydrogen-powered vehicles // Kazan state power engineering university bulletin. 2022. Vol. 14. No. 4 (56). pp. 3–18.
3. Kornilov S.V., Simonov I.V., Zvereva E.R. Research on hydrogen fuel cell energy systems for vehicles // Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Teachers “Energy and Automation in Modern Society”; St. Petersburg. 2023. pp. 189–198.
4. Killingland M, Taylor C, Eriksen R. Hydrogen forecast to 2050 // DNV. 2022. 114 c.
5. Pei P., Meng Y., Chen D., et al. Lifetime prediction method of proton exchange membrane fuel cells based on current degradation law // Energy. 2023. V. 265, 126341. doi: 10.1016/j.energy.2022.126341.
6. Zhang T., Wang P., Chen H., et al. A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition // Appl Energy. 2018. Vol. 4, pp. 249 - 262. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.049.
7. Oyarce A., Zakrisson E., Ivity M., at al. Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 254, pp. 232–240. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.058.
8. Drugeot T., Micoud F., Pinton E., at al. Experimental assessment of proton exchange membrane fuel cell performance degradations during emulated start-up/shut-down phases // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, pp. 5630 - 5642. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.020.
9. Arrigoni A., Arosio V., Basso A., at al. Greenhouse Gas Implications of Extending the Service Life of PEM Fuel Cells for Automotive Applications: A Life Cycle Assessment // Clean Technologies. 2022. Vol. 4, pp. 132–148. doi: 10.3390/cleantechnol4010009.
10. Dirkes S., Leidig J., Fisch P., at al. Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part II: On-board operando feature extraction, condition assessment and lifetime prediction // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 283, 116943. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116943.
11. Zhou Z., Ye L., Qiu D., at al. Experimental investigation and decoupling of voltage losses distribution in proton exchange membrane fuel cells with a large active area // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 452, 139497. doi: 10.1016/j.cej.2022.139497.
12. Bisello A., Colombo E., Baricci A., at al. Mitigated Start-Up of PEMFC in Real Automotive Conditions: Local Experimental Investigation and Development of a New Accelerated Stress Test Protocol // Journal of The Electrochemical Society. 2021. Vol. 168, 054501. doi: 10.1149/1945-7111/abf77b.
13. Reiser C., Bregoli L., Patterson T., at al. A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells // Electrochemical and Solid-State Letters. 2005. Vol. 8, pp 273 - 276. doi: 10.1149/1.1896466.
14. Clemens F., Edjokola J., Telenta M., at al. Modeling of Catalyst Degradation in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Applied to Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation // Fuel Cells From Fundamentals to Systems. 2024. Vol. 24. doi: 10.1002/fuce.202300237.
15. Soleymani A., Bonville L., Wang C., at al. Quantifying key parameters to provide better understating of microstructural changes in polymer electrolyte membrane fuel cells during degradation: A startup/shutdown case study // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 563. 232807. doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232807.
16. He L., Zhan Z., Hong C., at al. A quick evaluation method for the lifetime of the fuel cell MEA with the particle filter algorithm // International Journal of Green Energy. 2021. Vol. 18, pp 1536 – 1549. doi: 10.1080/15435075.2021.1911809.

17. Fan J., Yang Y., Ma T., et al. Investigation on a Shutdown Control Strategy with Residual Oxygen Rapid Elimination for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System // *Energies*. 2023. Vol. 16. 1285. doi: 10.3390/en16031285.

18. Liu J., Chen H., Zhang T. Analysis of cold start characteristics in a PEMFC stack with different current loading modes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 51, pp. 1456 – 1476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.303.

19. Burlatsky S., Gummalla M., Atrazhev V., et al. The Dynamics of Platinum Precipitation in an Ion Exchange Membrane // *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158, pp. 322- 330. doi: 10.1149/1.3532956.

20. Wong K., Kjeang E. Macroscopic In-Situ Modeling of Chemical Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells // *Journal of The Electrochem Society*. 2014. Vol. 161, pp. 823–832. doi: 10.1149/2.0031409jes.

Authors of the publication

Ivan V. Simonov – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Simonov.IV@kamaz.ru*

Daniil V. Kudinov – Kazan Federal University, Kazan, Russia; PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *KudinovDV@kamaz.ru*

Denis I. Shevchenko – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *ShevchenkoDI@kamaz.ru*

Semyon V. Kornilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Lenar I. Fardeev – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **04.08.2025 г.**

Отредактировано **23.12.2025 г.**

Принято **17.01.2026 г.**