

МРНТИ 29.19.22

<https://doi.org/10.26577/RCPH20259435>

С. Опахай^{1*}, К.А. Кутербеков¹, К.Ж. Бекмырза¹, А.М. Кабышев¹,
М.М. Кубенова¹, Н.К. Айдарбеков¹, Ж.С. Зейнулла¹, Е.М. Пангалиев²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Каспийский университет технологии и инжиниринга им. Ш. Есенова, Актау, Казахстан

*e-mail: serikjan_0707@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПЛАТИНЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕМБРАНО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ТВЕРДО-ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

В данной работе представлен анализ влияния ключевых параметров, таких как содержание платины, температура и концентрация кислорода, на характеристики мембранно-электродных блоков (МЭБ), используемых в топливных элементах. Основной целью исследования является разработка рекомендаций по оптимизации состава катализаторов для достижения баланса между производительностью и экономичностью. Моделирование выполнено для трёх типов катализаторов: чистой платины (Pt), платины с добавлением никеля (Pt-Ni) и платины с добавлением кобальта (Pt-Co). Исследованы зависимости напряжения, мощности и эффективности от плотности тока с учётом активационных, омических и массовых потерь. Для оценки стабильности работы катализаторов использовался параметр изменения напряжения (ΔV) в диапазоне рабочих нагрузок. Результаты исследования демонстрируют, что содержание платины оказывает наиболее значительное влияние на производительность МЭБ. Оптимальное содержание платины составляет 1.0 усл. ед., при котором достигаются максимальные значения мощности и эффективности. Однако легированные катализаторы (Pt-Ni и Pt-Co) проявляют стабильность при меньших затратах, что делает их перспективными для применения. Также выявлена зависимость характеристик от температуры и концентрации кислорода, что подчёркивает важность контроля условий эксплуатации.

Ключевые слова: топливные элементы, катализатор, мембрано-электродный блок (МЭБ), напряжения, платина.

С. Опахай^{1*}, Қ.А. Күтербеков¹, К.Ж. Бекмырза¹, Ә.М. Қабышев¹,
М.М. Күбенова¹, Н.К. Айдарбеков¹, Ж.С. Зейнулла¹, Е.М. Панғалиев²

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, Ақтау, Қазақстан

*e-mail: serikjan_0707@mail.ru

Платина мөлшерінің қатты полимерлі электролиті бар отын элементінің мембрана-электродтық блоктарының сипаттамаларына әсерін зерттеу

Бұл жұмыста отын элементтерінде қолданылатын мембрана-электрод блогының (МЭБ) сипаттамаларына платинаның мөлшері, температура және оттегінің концентрациясы сияқты негізгі параметрлердің әсері талданады. Зерттеудің негізгі мақсаты – өнімділік пен үнемділіктің арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ету үшін катализаторлардың құрамын оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірлеу. Модельдеу үш түрлі катализаторлар үшін орындалды: таза платина (Pt), никель қоспасы бар платина (Pt-Ni) және кобальт қоспасы бар платина (Pt-Co). Белсенділік, омикалық және масса жоғалтуларын ескере отырып, ток тығыздығына байланысты кернеу, қуат және тиімділік тәуелділіктері зерттелді. Катализаторлардың тұрақтылығын бағалау үшін жүктеме ауқымында кернеудің өзгеру параметрі (ΔV) пайдаланылды. Зерттеу нәтижелері платинаның мөлшері МЭБ өнімділігіне ең үлкен әсер ететінін көрсетеді. Платинаның оңтайлы мөлшері – 1.0 шартты бірлік, бұл

кезде қуат пен тиімділіктің ең жоғары мәндері қол жеткізіледі. Дегенмен, қоспаланған катализаторлар (Pt-Ni және Pt-Co) аз шығындармен тұрақтылықты көрсетеді, бұл оларды қолдануға перспективалы етеді. Сондай-ақ сипаттамалардың температура мен оттегінің концентрациясына тәуелділігі анықталды, бұл пайдалану шарттарын бақылаудың маңыздылығын айқындайды.

Түйін сөздер: отын элементтері, катализатор, мембрана-электрод блогы (МЭБ), кернеу, платина.

S. Opakhai^{1*}, K.A. Kuterbekov¹, K.Zh. Bekmyrza¹, A.M. Kabyshev¹,
M.M. Kubenova¹, N.K. Aidarbekov¹, Zh.S. Zeinulla¹, Ye.M. Pangaliev²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenov, Aktau, Kazakhstan

*e-mail: serikjan_0707@mail.ru

Investigation of the influence of platinum content on the characteristics of membrane-electrode assemblies of a polymer electrolyte fuel cell

This work presents an analysis of the impact of key parameters, such as platinum content, temperature, and oxygen concentration, on the performance of membrane-electrode assemblies (MEAs) used in fuel cells. The primary objective of the study is to develop recommendations for optimizing catalyst compositions to achieve a balance between performance and cost-effectiveness. Modeling was conducted for three types of catalysts: pure platinum (Pt), platinum with nickel (Pt-Ni), and platinum with cobalt (Pt-Co). The dependencies of voltage, power, and efficiency on current density were investigated, taking into account activation, ohmic, and mass transport losses. To assess the stability of the catalysts, the parameter of voltage variation (ΔV) was used within the range of operating loads. The results of the study demonstrate that platinum content has the most significant impact on the performance of MEAs. The optimal platinum content is 1.0 relative units, at which the maximum values of power and efficiency are achieved. However, alloyed catalysts (Pt-Ni and Pt-Co) exhibit stability at lower costs, making them promising for application. Additionally, the characteristics were found to depend on temperature and oxygen concentration, emphasizing the importance of controlling operating conditions.

Keywords: fuel cells, catalyst, membrane-electrode assembly (MEA), voltage, platinum.

Введение

Топливные элементы с твердополимерным электролитом (ТПЭ), также известные как PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells), в последние десятилетия привлекают значительное внимание научного сообщества и промышленного сектора [1]. Их уникальные характеристики, включающие высокую удельную мощность, низкий уровень вредных выбросов, способность к быстрому запуску и регулированию под нагрузкой, а также совместимость с различными видами топлива (в первую очередь с водородом высокой чистоты), делают ТПЭ-технологию одним из ключевых направлений развития современной энергетики [2]. В условиях растущего внимания к сокращению выбросов парниковых газов и уменьшению зависимости от ископаемых энергоносителей топливные элементы рассматриваются как одна из основ будущей водородной экономики. Они способны обеспе-

чить не только экологически чистое энергоснабжение для транспорта (легковых и грузовых автомобилей, автобусов, поездов, морских судов), но и эффективную генерацию электроэнергии для стационарных установок, включая распределённую энергетику и автономные системы жизнеобеспечения [3, 4].

В основе работы ТПЭ-топливного элемента лежит мембранно-электродный блок (МЭБ), состоящий из твёрдополимерной протонопроводящей мембраны, а также анодного и катодного электродов, на которых протекают электрохимические реакции. Для анода наиболее распространённым топливом является водород, который подаётся под давлением и окисляется, высвобождая электроны. На катоде происходит электрохимическое восстановление кислорода (Oxygen Reduction Reaction, ORR), обеспечивающее замыкание цепи и формирование тока.

Таким образом, эффективность и выходная мощность топливного элемента в решающей степени зависят от каталитических свойств электродов, особенно катода, поскольку ORR является кинетически более «трудной» реакцией по сравнению с окислением водорода [5-7].

Наиболее эффективным катализатором для ORR на сегодняшний день считается платина (Pt) благодаря её уникальным свойствам – высокой активности, устойчивости к коррозии в кислородсодержащей среде, а также совместимости с протонопроводящей мембраной. Применение платиновых катализаторов даёт возможность достичь значительных показателей плотности тока и КПД топливного элемента, что уже подтверждено в лабораторных и демонстрационных образцах. Однако существенным ограничивающим фактором массового внедрения ТПЭ-технологий является высокая стоимость платины, а также её ограниченные мировые запасы. Это приводит к удорожанию конечных систем и снижению их конкурентоспособности по сравнению с традиционными источниками энергии [8, 9].

Стремление снизить себестоимость топливных элементов стимулирует поиск альтернативных каталитических материалов, путей минимизации содержания драгоценных металлов и оптимизации структуры катализаторных слоёв. Исследователи активно изучают разнообразные стратегии снижения платиносодержания: от разработки биметаллических и многокомпонентных наноструктур, в которых Pt сочетается с более доступными и недорогими металлами (например, Fe, Co, Ni, Cu), до применения неметаллических каталитических систем на основе углеродных и других функциональных материалов. Немаловажную роль играют улучшение распределения частиц катализатора в пористой структуре газодиффузионного слоя, формирование оптимальной морфологии наночастиц, а также применение новых методов синтеза и нанесения катали-

заторов, позволяющих достичь максимального использования платиновых центров [10-13].

Таким образом, актуальной задачей сегодняшнего дня является разработка экономически и ресурсно эффективных катализаторов для ТПЭ-топливных элементов, сохраняющих или повышающих показатели активности и стабильности при существенном снижении содержания платины. Решение этой задачи способствует ускорению коммерциализации и широкому внедрению топливных элементов, а также будет способствовать формированию основ новой энергетической парадигмы, основанной на чистой, устойчивой и доступной энергии. В данной работе рассматриваются подходы к снижению платиносодержания и повышению каталитической эффективности МЭБ, что позволит приблизить перспективу масштабного промышленного применения экологически безопасных топливных элементов.

Настоящее исследование направлено на анализ влияния содержания платины, температуры и концентрации кислорода на характеристики МЭБ. Целью работы является разработка рекомендаций по оптимизации катализаторов для достижения баланса между эффективностью и экономичностью. Дополнительно, в данном исследовании рассматривается влияние ключевых параметров, таких как температура, содержание платины и концентрация кислорода, на характеристики МЭБ. Важность этих параметров обусловлена их прямым влиянием на основные процессы, включая электрохимическую кинетику, транспортировку реагентов и стабильность работы катализаторов.

Понимание этих взаимосвязей позволит разработать более эффективные и экономически выгодные решения для использования топливных элементов в различных приложениях. Основной акцент в работе сделан на анализ характеристик катализаторов Pt, Pt-Ni и Pt-Co, а также их потенциальной замене для снижения стоимости без значительной потери эффективности.

Материалы и методы

Для анализа характеристик МЭБ использовались аналитические модели, описывающие ключевые процессы: активационные потери, омическое сопротивление и потери массовой транспортировки. Основное уравнение, описывающее напряжение топливного элемента, имеет вид:

$$V = V_0 - k_T \cdot T - \frac{k_c}{C_0}$$

где V_0 – теоретическое равновесное напряжение

(1.23 В), T – температура (°C), C_0 – концентрация кислорода (молекулы/см³), k_T и k_c – эмпирические коэффициенты, описывающие потери напряжения.

Мощность рассчитывалась как $P = V \cdot I$, где I – токовая плотность. Для анализа эффективности использовался метод численного интегрирования по всей области плотности тока. Изучались три типа катализаторов: чистая платина (Pt), платина с добавками никеля (Pt-Ni) и кобальта (Pt-Co).

Содержание платины варьировалось от 0.1 до 1.0 усл. ед., температура изменялась в диапазоне 30–90 °С, а концентрация кислорода от 0.1 до 1.0 молекул/см³.

Для моделирования характеристик катализаторов учитывались активационные потери, связанные с преодолением энергии активации реакции восстановления кислорода (ORR), а также омические потери, вызванные сопротивлением мембраны и электродов. Потери массовой транспортировки были включены в модель для описания ограничений в подаче кислорода к активным зонам катализатора.

Результаты и обсуждение

На основе моделирования были получены зависимости напряжения, мощности и стабильности от содержания платины, температуры и концентрации кислорода. Основные результаты представлены на графиках с детальным описанием.

На графике представлена зависимость напряжения (V) мембранно-электродных блоков (МЭБ) от температуры (T) и концентрации кислорода (C_O) для катализаторов Pt, Pt-Ni и Pt-Co. Для чистой платины (Pt) наблюдается значительное снижение напряжения при увеличении температуры и уменьшении концентрации кислорода, что объясняется ростом активационных и массовых потерь. Легированный катализатор Pt-Ni демонстрирует схожую динамику, но напряжение остаётся несколько ниже по сравнению с Pt из-за изменения электронной структуры, снижая каталитическую активность. Катализатор Pt-Co показывает наибольшую устойчивость к изменениям

значения эмпирических коэффициентов k_T и k_c подбирались на основе экспериментальных данных, чтобы обеспечить максимальную точность расчётов. Катализаторы оценивались по стабильности напряжения ΔV и устойчивости к изменениям условий эксплуатации. Особое внимание уделялось изучению зависимости напряжения и мощности от содержания платины, что позволило выявить оптимальные параметры для каждого типа катализатора. Полученные результаты использовались для формирования рекомендаций по повышению эффективности и снижению затрат в топливных элементах.

температуры и концентрации кислорода, что связано с улучшенной стабильностью реакции восстановления кислорода (ORR) благодаря добавлению кобальта.

Научное объяснение состоит в том, что Pt-Co более эффективно снижает массовые потери и сохраняет высокую активность даже при неблагоприятных условиях. Практическая значимость графика заключается в возможности выбора оптимального катализатора: Pt подходит для стандартных условий, Pt-Ni обеспечивает баланс между стоимостью и производительностью, а Pt-Co подходит для тяжёлых эксплуатационных режимов. Эти данные подчеркивают необходимость учитывать условия эксплуатации при проектировании топливных элементов. График также подтверждает перспективность использования легированных катализаторов для повышения стабильности и экономической эффективности систем.

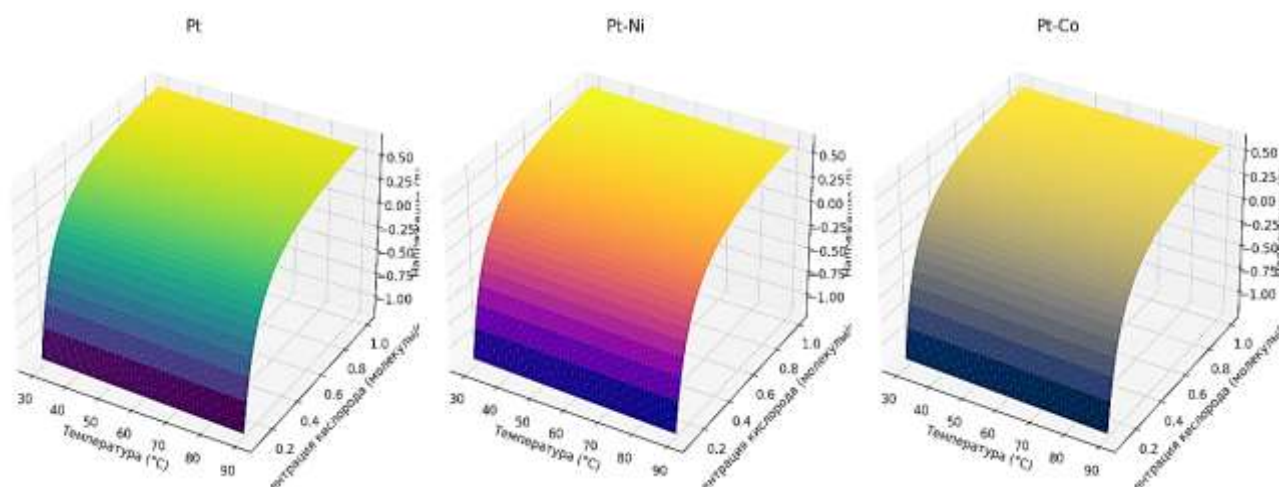


Рисунок 1 - Зависимости напряжения для катализаторов (Pt, Pt-Ni, Pt-Co) от температуры и концентрации кислорода

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) демонстрируют зависимость напряжения от плотности тока для катализаторов Pt, Pt-Ni и Pt-Co (рисунок 2). Чистая платина показывает наиболее высокое напряжение при всех плотностях тока, что объясняется её высокой каталитической активностью в реакции восстановления кислорода. Легированные катализаторы Pt-Ni и Pt-Co демонстрируют несколько меньшие значения напряжения, особенно при высоких плотностях тока. Однако их производительность остаётся стабильной, что делает их подходящими для промышленных приложений, где стоимость катализаторов имеет решающее значение. График подчеркивает необходимость баланса между эффективностью и экономичностью при выборе катализаторов для мембранно-электродных блоков.

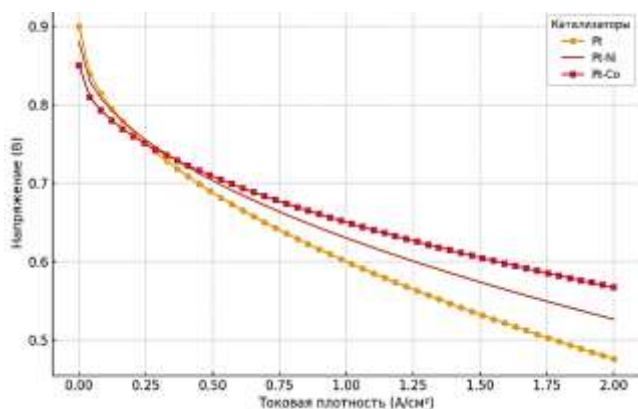


Рисунок 2 - Вольт-амперные характеристики (ВАХ) мембранно-электродных блоков с различными катодными катализаторами

На рисунке 3 показано, как теряются напряжение и мощность в зависимости от плотности тока для катализаторов Pt, Pt-Ni и Pt-Co. Чистая платина демонстрирует минимальные потери, что объясняется её высокой электронной проводимостью и каталитической активностью. Легированные катализаторы Pt-Ni и Pt-Co показывают более значительные потери при высоких токовых плотностях, что связано с их меньшим числом активных центров и увеличением омического сопротивления. Однако на низких токовых плотностях разница между катализаторами минимальна, что указывает на их схожую эффективность в условиях малой нагрузки. Таким образом, график подчеркивает важность выбора катализатора в зависимости от условий работы топливного элемента.

На рисунке 4 график демонстрирует стабильность работы катализаторов Pt, Pt-Ni и Pt-

Co при различных плотностях тока. Все три катализатора показывают схожую стабильность напряжения (ΔV), что подтверждает их пригодность для использования в промышленных приложениях. Стабильность катализаторов особенно важна для обеспечения долговечности и надёжности работы топливного элемента. Данный результат указывает на то, что даже менее дорогие катализаторы, такие как Pt-Ni и Pt-Co, могут использоваться без значительного ущерба для стабильности работы топливного элемента, что делает их экономически привлекательным решением.

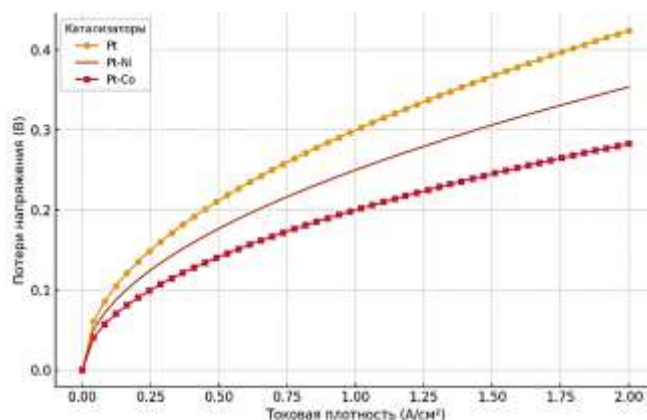


Рисунок 3 - Потери напряжения для различных катализаторов

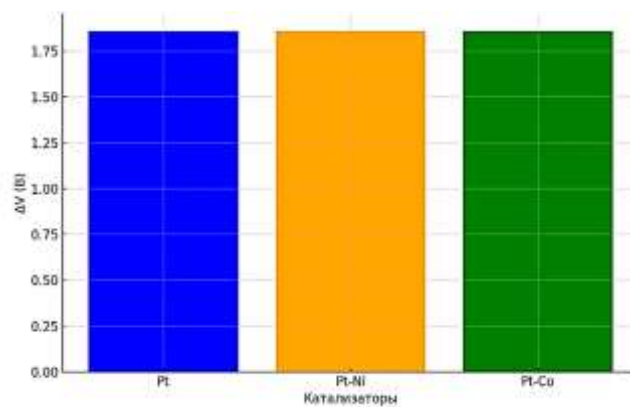


Рисунок 4 - Сравнение изменений напряжения (ΔV) для катализаторов

На графике видно (рисунок 5), что мощность увеличивается с ростом плотности тока, достигая пика, после чего начинает снижаться из-за падения напряжения. Катализатор Pt демонстрирует наивысшую мощность, однако Pt-Ni и Pt-Co также показывают конкурентоспособные результаты, особенно при высоких нагрузках. Это связано с их стабильностью в условиях интенсивной эксплуатации. График

подчёркивает необходимость оптимизации плотности тока для достижения максимальной производительности топливного элемента.

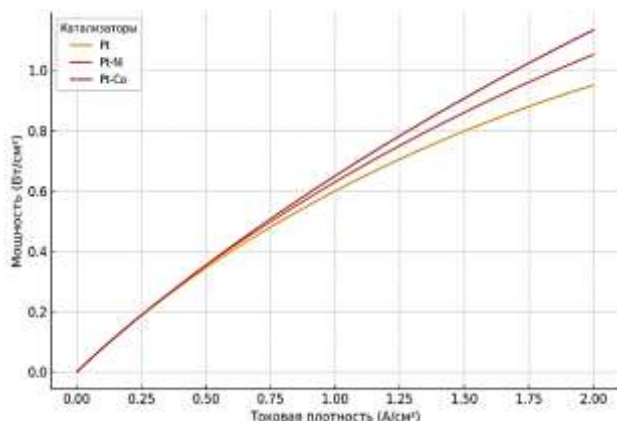


Рисунок 5 - Зависимость мощности от токовой плотности

Рисунок 6 демонстрирует влияние содержания платины на напряжение. С увеличением содержания платины напряжение повышается, что связано с увеличением числа активных центров, участвующих в реакции восстановления кислорода (ORR). При содержании платины 1.0 усл. ед. достигаются максимальные показатели напряжения, особенно при высокой плотности тока. Данный результат подчёркивает значимость содержания платины для обеспечения высокой производительности топливного элемента.

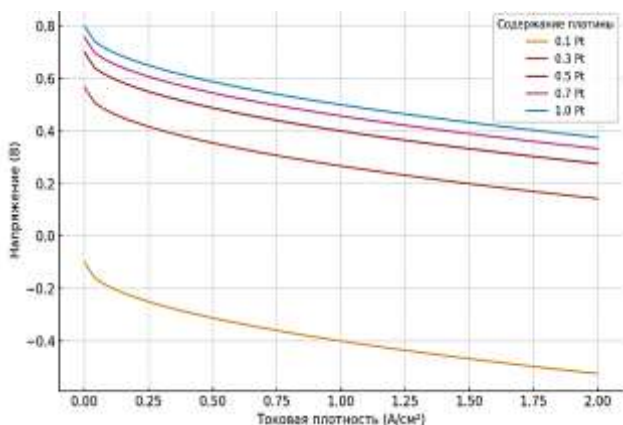


Рисунок 6 - Вольт-амперные характеристики (ВАХ) для различного содержания платины

На рисунке 7 график показывает, как мощность зависит от содержания платины. Увеличение содержания платины приводит к росту мощности, достигая максимума при содержании 1.0 усл. ед. Однако дальнейшее увеличение содержания платины может быть экономически нецелесообразным из-за высокой

стоимости материала. График подчеркивает необходимость поиска баланса между производительностью и затратами.

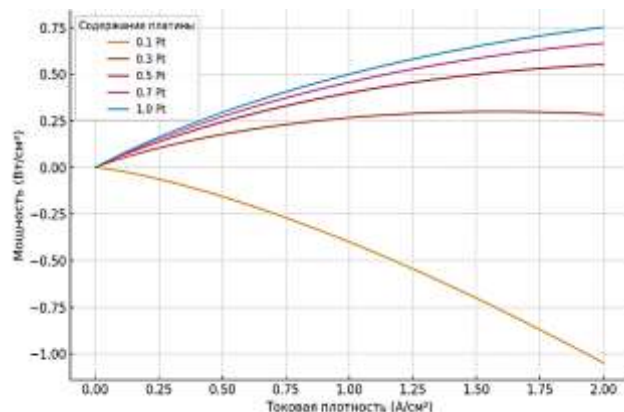


Рисунок 7 - Мощность для различного содержания платины

Эффективность топливного элемента увеличивается с ростом содержания платины. Это связано с улучшением кинетики реакции восстановления кислорода и снижением потерь напряжения. Максимальная эффективность достигается при содержании платины 1.0 усл. ед. Данный результат указывает на важность оптимизации содержания платины для достижения высокой эффективности без значительного увеличения затрат (рисунок 8).

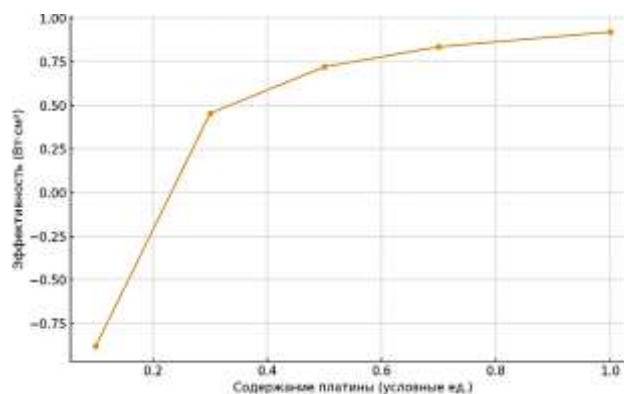


Рисунок 8 - Зависимость эффективности от содержания платины

Стабильность напряжения (ΔV) остаётся высокой при всех уровнях содержания платины. Это свидетельствует о том, что даже при низком содержании платины топливные элементы сохраняют устойчивость к изменениям нагрузки. Данный результат подчёркивает возможность использования низкоплатиновых катализаторов для снижения стоимости без существенного ухудшения стабильности. Кроме того,

увеличение потерь для Pt-Ni и Pt-Co связано с изменением электронной структуры поверхности, которая влияет на скорость реакции восстановления кислорода (ORR). Однако важно отметить, что на низких токовых плотностях, где активационные потери преобладают, разница между катализаторами минимальна. Это указывает на их схожую эффективность при условиях малых нагрузок, например, в стационарных системах. Таким образом, график подчёркивает необходимость оптимизации состава катализаторов для достижения равновесия между затратами и производительностью (рисунок 9).

Заключение

Проведённое исследование показало значительное влияние содержания платины, температуры и концентрации кислорода на характеристики мембранно-электродных блоков (МЭБ). Было выявлено, что оптимальное содержание платины составляет 1.0 усл. ед., при котором достигаются максимальные значения мощности, напряжения и эффективности. Однако результаты также продемонстрировали, что использование легированных катализаторов (Pt-Ni и Pt-Co) обеспечивает конкурентоспособные характеристики при меньших затратах. Это делает их привлекательными для коммерческого применения в промышленных масштабах.

Кроме того, анализ зависимости характеристик от температуры и концентрации кислорода подтвердил необходимость строгого контроля эксплуатационных параметров. Например, высокая концентрация кислорода и температура в диапазоне 60–80°C являются ключевыми факторами для минимизации потерь напряжения и максимизации эффективности. Легированные катализаторы проявили устойчивость в условиях высокой нагрузки, что расширяет их сферу применения.

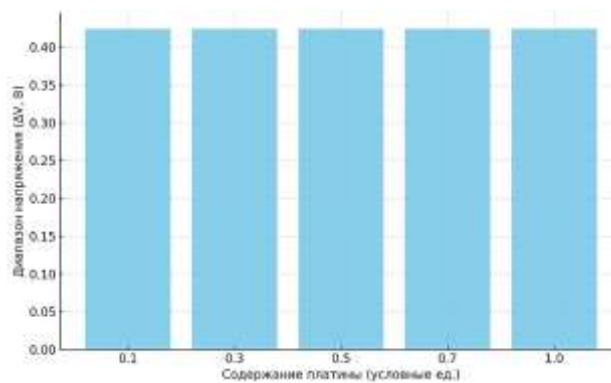


Рисунок 9 - Стабильность напряжения при разных содержаниях платины

Практическая значимость работы заключается в возможности снижения стоимости топливных элементов без значительного ущерба для их производительности. Данные результаты подтверждают перспективность дальнейшей разработки катализаторов с низким содержанием платины и внедрения оптимальных эксплуатационных режимов.

Научная ценность исследования заключается в расширении знаний о взаимодействии ключевых параметров в работе МЭБ и их влиянии на характеристики топливных элементов. Результаты могут быть использованы для создания более доступных, стабильных и эффективных решений для перехода на экологически чистые источники энергии.

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке МНВО РК (BR24992964 «Разработка интегрированных энергосберегающих технологий для развития экологической устойчивости и эффективности морских операций в казахстанском секторе Каспийского моря»).

Литература References

- 1 M.M. Tellez-Cruz, J. Escorihuela, O. Solorza-Feria and V. Compañ, Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): Advances and challenges, *Polymers* **13**, 3064 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13183064>
- 2 M. Pan, C. Pan, C. Li and J. Zhao, A review of membranes in proton exchange membrane fuel cells: Transport phenomena, performance and durability, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **141**, 110771 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110771>
- 3 Z. Hua, Z. Zheng, E. Pahon, M.C Péra and F. Gao, A review on lifetime prediction of proton exchange membrane fuel cells system, *Journal of Power Sources* **529**, 231-256 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231256>
- 4 X.R. Wang, Y. Ma, J. Gao, T. Li, G.Z Jiang and Z.Y Sun, Review on water management methods for proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* **46**(22), 12206-12229 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.211>

- 5 N.H. Jawad, A.A. Yahya, A.R. Al-Shathir, H.G. Salih, K.T. Rashid, S. Al-Saadi and Q.F. Alsahy, Fuel cell types, properties of membrane, and operating conditions: A review, *Sustainability* **14**(21), 14653 (2022). <https://doi.org/10.3390/su142114653>
- 6 K. Jiao, J. Xuan, Q. Du, Z. Bao, B. Xie, B. Wang and M.D. Guiver, Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells, *Nature* **595**(7867), 361-369 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03482-7>
- 7 R. Haider, Y. Wen, Z.F. Ma, D.P. Wilkinson, L. Zhang, X. Yuan and J. Zhang, High temperature proton exchange membrane fuel cells: progress in advanced materials and key technologies, *Chemical Society Reviews* **50**(2), 1138-1187 (2021). <https://doi.org/10.1039/D0CS00296H>
- 8 P.C. Okonkwo, O.O. Ige, P.C. Uzoma, W. Emori, A. Benamor and A.M. Abdullah, Platinum degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review, *International journal of hydrogen energy* **46**(29), 15850-15865 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.078>
- 9 L. Osmieri and Q. Meyer, Recent advances in integrating platinum group metal-free catalysts in proton exchange membrane fuel cells, *Current Opinion in Electrochemistry* **31**, 100847 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100847>
- 10 H.R. Litkhi, A. Bahari and M.P. Gatabi, Improved oxygen reduction reaction in PEMFCs by functionalized CNTs supported Pt–M (M= Fe, Ni, Fe–Ni) bi-and tri-metallic nanoparticles as efficient electrocatalyst, *International Journal of Hydrogen Energy* **45**(43), 23543-23556 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.179>
- 11 S. Belenov, A. Alekseenko, A. Pavlets, A. Nevelskaya and M. Danilenko, Architecture evolution of different nanoparticles types: relationship between the structure and functional properties of catalysts for PEMFC, *Catalysts* **12**(6), 638 (2022). <https://doi.org/10.3390/catal12060638>
- 12 A.S. Pavlets, A.A. Alekseenko, N.Y. Tabachkova, O.I. Safronenko, A.Y. Nikulin, D.V. Alekseenko and V.E. Guterman, A novel strategy for the synthesis of Pt–Cu uneven nanoparticles as an efficient electrocatalyst toward oxygen reduction, *International Journal of Hydrogen Energy* **46**(7), 5355-5368 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.094>
- 13 F. Xiao, Q. Wang, G.L. Xu, X. Qin, I. Hwang, C.J. Sun and M. Shao, Atomically dispersed Pt and Fe sites and Pt–Fe nanoparticles for durable proton exchange membrane fuel cells, *Nature Catalysis* **1**(5), 503-512 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41929-022-00796-1>

Мақала тарихы:

Түсті – 23.12.2024

Түзетілген түрде түсті – 25.05.2025

Қабылданды – 22.09.2025

Article history:

Received 23 December 2024

Received in revised form 25 May 2025

Accepted 22 September 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Серікжан Опахай** (автор-корреспондент) – «Еуразиялық физикалық-энергетикалық зерттеулер және ғылыми-интенсивті технологиялар институты» ҒЗ институтының директоры, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: serikjan_0707@mail.ru

2. **Қайрат Күтербеков** – Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының ғылыми профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: kkuterbekov@gmail.com

3. **Кенжебатыр Бекмырза** – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің техникалық физика кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Астана, Қазақстан; e-mail: kbekmyrza@yandex.kz

4. **Әсет Қабышев** – Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: assetenu@gmail.com

Information about authors:

1. **Serikzhan Opakhai** – corresponding author, Director of the Research Institute “Eurasian Institute for Physical-Energy Research and Science-Intensive Technologies”, PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: serikjan_0707@mail.ru

2. **Kairat Kuterbekov** – Research Professor, Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kkuterbekov@gmail.com

3. **Kenzhebatyr Bekmyrza** – Research Lecturer, Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kkuterbekov@gmail.com, Astana, Kazakhstan, e-mail: kbekmyrza@yandex.kz

4. **Asset Kabyshev** – Lecturer-researcher, Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: assetenu@gmail.com

5. **Маржан Күбенова** – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің стандарттау және сертификаттау кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Астана, Қазақстан; e-mail: kubenova.m@yandex.kz

6. **Нұрсұлтан Айдарбеков** – Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: nursultan02_22.10.92@mail.ru

7. **Жасұлан Зейнулла** - Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің 3-курс докторанты, Астана, Қазақстан; e-mail: zeizhaser@mail.ru

8. **Ербол Пангалиев** - Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инженерия университетінің экология және қоршаған орта кафедрасының оқытушысы, Ақтау, Қазақстан; e-mail: erbolpm@mail.ru

5. **Marzhan Kubenova** – Lecturer-researcher, Department of Standardization and Certification, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kubenova.m@yandex.kz

6. **Nursultan Aidarbekov** – Lecturer, Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nursultan02_22.10.92@mail.ru

7. **Zhasulan Zeynulla** – 3rd year PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: zeizhaser@mail.ru

8. **Yerbol Pangaliyev** – Lecturer, Department of Ecology and Environment, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, Kazakhstan, e-mail: erbolpm@mail.ru