

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Х. Цзян Протонообменные мембранные топливные элементы. 4-й ежегодный доклад Ассоциации "Глобальная энергия". С. 94–102. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

Х. Цзян

Институт биоэнергетики и технологии биопроцессов Циндао,  
Китайская академия наук, Шаньдун, Китай

## ПРОТОНООБМЕННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Введение.** Рост уровня глобального потребления энергии и загрязнение окружающей среды послужили толчком к поиску экологически чистых и возобновляемых альтернатив энергии, которые позволили бы удовлетворять потребности в энергии не за счет углеродного цикла. Благодаря своей экологичности и высокой удельной энергоемкости водород считается экологически чистым топливом и накопителем энергии, который найдет свое применение в энергетике будущего [1]. В водородном цикле решающее значение для преобразования энергии водорода в электрическую энергию имеют транспортные средства на топливных элементах. По сравнению с обычными двигателями внутреннего сгорания, используемыми сегодня во многих транспортных средствах, водородные топливные элементы обладают рядом несомненных преимуществ. Их эксплуатация обходится дешевле, они обладают более высокой эффективностью и надежностью, а вместо парниковых газов они выделяют чистую воду и тепло [2]. Эти достоинства указывают на то, что топливные элементы представляют собой перспективную технологию преобразования энергии для «зеленого» будущего [3].

Топливные элементы с протонообменной мембраной (ТЭПМ) представляют собой наиболее распространенный тип топливных элементов. Они могут преобразовывать химическую энергию топлива в электричество с КПД не менее 60%. Являясь универсальной технологией производства электроэнергии нового поколения, ТЭПМ способны работать при низких температурах (~80–120°C), питая электроэнергией транспортные средства и портативные устройства, а также крупные стационарные энергосистемы. Электрохимическая конверсия водорода в топливных элементах не производит вредных выбросов. Единственными отходами водородных топливных элементов являются чистая вода и потенциально полезное тепло; таким образом, в месте эксплуатации в воздух не выбрасываются загрязнения, вызывающие проблемы со здоровьем или парниковый эффект. Кроме того, топливные элементы работают бесшумно, что позволяет избежать возможного шумового загрязнения.

Топливные элементы зачастую сравнивают с батареями, поскольку электродвигатели, работающие от батарей, также являются перспективным низкоуглеродным решением [4]. На рис. 1 приводится схема сравнения их технических характеристик (Цзян и др.) [5]. Топливные элементы обычно обладают более высокой плотностью энергии, чем батареи, благодаря свойствам, присущим используемому в них топливу. Топливным элементам требуется меньше времени для перезарядки по сравнению с батареями благодаря более быстрой заправке водородом. Топливные элементы способны функционировать в условиях низких температур, но в батареях обычно наблюдается значительно сниженная разрядная емкость. Что касается затрат, то здесь ситуация



|                               | АЭМ                     | ТСТЭ                           |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| <b>Накопитель</b>             | Литий-ионные батареи    | Водород                        |
| <b>Удельная энергоёмкость</b> | <200 Ватт-час/кг        | ~300 Ватт-час/кг               |
| <b>Время заправки</b>         | Часы                    | Минуты                         |
| <b>Низкая температура</b>     | Серьезная деградация    | Показано для температуры -30°C |
| <b>Эффективность</b>          | ~90%                    | ~60%                           |
| <b>Инфраструктура</b>         | Сеть и зарядные станции | Водородные заправочные станции |

Рис. 1. Сравнение технических характеристик и применения транспортных средств на топливных элементах (ТСТЭ) и аккумуляторных электромобилей (АЭМ) в автомобильном транспорте будущего

несколько усложняется. При нынешнем уровне стоимости электроэнергии и водорода использование батарей в транспортных средствах малой дальности (< 200 миль, 322 км) обходится немного дешевле, чем использование топливных элементов; однако же, затраты становятся сопоставимыми для транспортных средств, используемых для перевозок на большие расстояния (> 300 миль, 483 км) [6]. Таким образом, по своим техническим характеристикам топливные элементы в настоящее время больше подходят для дальних и большегрузных перевозок, тогда как батареи имеют конкурентные преимущества для ближних и малотоннажных перевозок [5].

Топливные элементы обладают высокой энергетической эффективностью, высокой удельной мощностью, быстрым запуском, и не оставляют углеродный след. Эти свойства привлекают к ним все больше и больше внимания. За последние несколько десятилетий, благодаря использованию ТЭПМ, был достигнут значительный прогресс в разработке транспортных средств на топливных элементах. Учитывая производительность, стоимость и долговечность существующих моделей, крупномасштабная коммерциализация ТЭПМ вполне вероятна.

### Функционирование ТЭПМ

ТЭПМ используют твердый полимер в качестве электролита и пористый углерод, наполненный катализатором, в качестве электродов (рис. 2а). Вместе они составляют основной компонент — мембранный блок электродов (МБЭ). Типичный МБЭ включает в себя протонообменную мембрану (ПМ), каталитические слои (КС) и газодиффузионные слои (ГДС) с микропорами. В составе ТЭПМ мембрана ПМ или полимерный электролит, в настоящее время на основе перфторсульфоновой кислоты (ПФСК), действует как электрический изолятор, проводник протонов

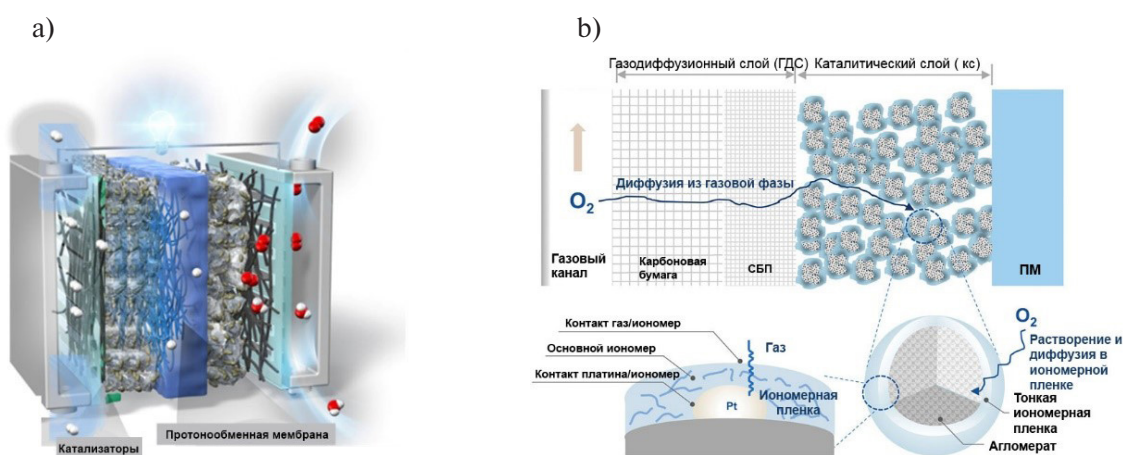


Рис. 2. Схематическое изображение (а) структуры ТЭПМ и (б) принципа работы ТЭПМ

и газоотделитель. С обеих сторон протонообменной мембраны (рис. 2а), где происходят реакции восстановления кислорода и окисления водорода, добавляется КС, куда обычно входит насыщенный платиной углерод, тонко диспергированный в иономерах. За пределами КС расположены ГДС и слои карбоновой бумаги, которые облегчают распределение газа и удаление фильтрата, а также способствуют механической поддержке и электрической связи. Для эффективной работы МБЭ типичного одиночного ТЭПМ необходимы биполярные пластины (БП). БП, выполненные в основном из углерода, металла или композитов, обеспечивают электропроводность между ячейками и жесткими опорами для стека, на котором формируются поля течения реагентов и теплоносителей. Эти компоненты критически важны, их уникальные свойства и характеристики влияют на общую производительность, стоимость и долговечность ТЭПМ.

ТЭПМ работают как батареи; однако же, в отличие от батарей, они могут производить тепло и электроэнергию до тех пор, пока подается топливо, и не требуют подзарядки. МБЭ является частью топливного элемента, производящего электроэнергию (рис. 2б). В частности, когда водород подается на анод в водородном топливном элементе, катализаторы, расположенные на анодном КС, разлагают молекулы водорода на электроны и протоны. После этого электроны и протоны перемещаются к катоду разными путями. Электроны переносятся по внешней цепи, индуцируя электрический ток, а протоны мигрируют через ПМ к катализаторам на катодной КС, и в конечном итоге объединяются с подаваемым кислородом и электронами, производя тепло и воду. ГДС обеспечивает баланс между высвобождением воды, которое поддерживает поры открытыми для диффузии топливного газа в КС, и удержанием воды, которое поддерживает проводимость мембраны. Поскольку в типичных рабочих условиях один топливный элемент вырабатывает менее 1 В, что вряд ли удовлетворяет требованиям большинства областей применения, БП последовательно соединяют несколько топливных элементов и, таким образом, позволяют обеспечить эффективное напряжение на выходе.

За последние десятилетия был достигнут впечатляющий прогресс в преодолении технических сложностей ТЭПМ. В применении к легковым автомобилям усовершенствованные одиночные топливные элементы (общая загрузка Pt  $0,175 \text{ мг см}^{-2}$ , загрузка катода Pt  $0,15 \text{ мг см}^{-2}$ ) могут поддерживать удельную мощность до  $911 \text{ мВт см}^{-2}$  при напряжении на ячейке  $0,65 \text{ В}$  в течение 8000 часов [9]. Соответствующая общая стоимость стека по сравнению с 2000 г., когда основная часть расходов на катализаторы и БП составляла 40% и 22% соответственно [9], снизилась на 8 долл. США/кВт, к 2022 г. составив примерно 31 долл. США/кВт. Эталонном для развития и инноваций в области ТЭПМ может стать пассажирский автомобиль Toyota Mirai на топливных элементах Mirai. В 2014 году Toyota запустила первую коммерческую серийную модель Mirai. Теперь Mirai

второго поколения, запущенный в конце 2020 года, обеспечивает удельную мощность стека с торцевыми пластинами и без них, 4,4 кВт л<sup>-1</sup> и 5,4 кВт л<sup>-1</sup> соответственно, и добился увеличения на 42% и 54% по сравнению с аналогичными показателями в первого поколения [10]. Однако же, розничная цена Mirai достигает 57 000 долларов США, и в Соединенных Штатах сдаются в аренду или продаются лишь около 7 000 устройств [11]. Напротив, рынок аккумуляторных электромобилей за последние два десятилетия значительно расширился благодаря быстрому техническому развитию литий-ионных аккумуляторов в сочетании с подзарядкой от домашней сети. Соответственно, электромобили, работающие на ТЭПМ, очевидно, находятся на ранних стадиях коммерческого внедрения. Их себестоимость еще не выдерживает конкуренции, а современные методы снижения стоимости могут значительно сократить срок службы стека. Основными решающими ограничениями для широкой коммерциализации пакета ТЭПМ являются ограниченная удельная мощность, стоимость, сравнимая со стоимостью бензина, и неудовлетворительная износостойкость. Поэтому для разработки ТЭПМ жизненно важны повышение удельной мощности, снижение эксплуатационных расходов и продление срока службы.

### Разработка ТЭПМ

Для разработки ТЭПМ следующего поколения были приложены огромные научные усилия. На рис. 3 авторства Цзяо и др. хорошо представлены текущие возможности и проблемы на уровне компонентов [5]. Направление развития этих компонентов, включая их взаимосвязь и разработку, определяет потенциальные ожидания и крупномасштабную коммерциализацию ТЭПМ.

**ГДС:** Основным выбором для промышленных ТЭПМ является карбоновая бумага. Однако же, газопроницаемость и управление водобалансом, связанные с ее массообменом, относительно медленны, а межфазное сопротивление, особенно между ГДС и БП, очень велико. Была сертифицирована структурная модификация, в частности, регулирование размера пор ГДС [12] и лазерная перфорация [13]. Например, ГДС с достаточным градиентом размера пор, в сочетании с углеродным волокном, могут снизить контактное сопротивление и облегчить удаление воды и подачу реагентов за счет создания более эффективного моста между МБЭ и БП. Совсем недавно для снижения контактного сопротивления были предложены также ГДС из металлического листа [14], но их эксплуатация сопровождается коррозией, поэтому необходимо изучение новых материалов. Таким образом, до сих пор ожидается, что в будущих ТЭПМ будет использоваться регулируемая карбоновая бумага.

**КС:** Как основные затраты, так и максимальная удельная мощность четко ассоциируются с катализаторами на КЛ. В настоящее время в основном используется платиносодержащий углерод, диспергированный на иономерах, благодаря своей долговечности и превосходным характеристикам в электрохимической среде. Были рассмотрены три аспекта повышения производительности и снижения затрат: снижение содержания металлов платиновой группы (МПП), изменение конструкции иономера и упорядочение структуры МБЭ.

При работе с катализаторами обычно используют три метода, нацеленные на то, чтобы снизить количество используемой платины и повысить их производительность и долговечность. Один из методов заключается в том, что наночастицы платины сплавляют с элементами переходных металлов или лантаноидами, такими как Ni, Co, Cu, Pt [15, 16]. Эти введенные атомы изменяют электронные свойства поверхности катализатора и ослабляют сильное взаимодействие поверхности с промежуточным звеном за счет сочетания эффектов деформации и лиганда, что позволяет оптимизировать перенос электронов [17]. Типичным примером является Pt<sub>3</sub>Ni(111) с внешним слоем, обогащенным Pt, и вторым атомным слоем, обогащенным Ni, который в 90 раз более активен, чем коммерческие катализаторы Pt/C [18]. Другим перспективным подходом является проектирование архитектур катализаторов, таких как оболочка ядра, наноклетки, нанопроволоки, нанокорпусы, нанокристаллы [19]. Согласно количественному определению, вы-

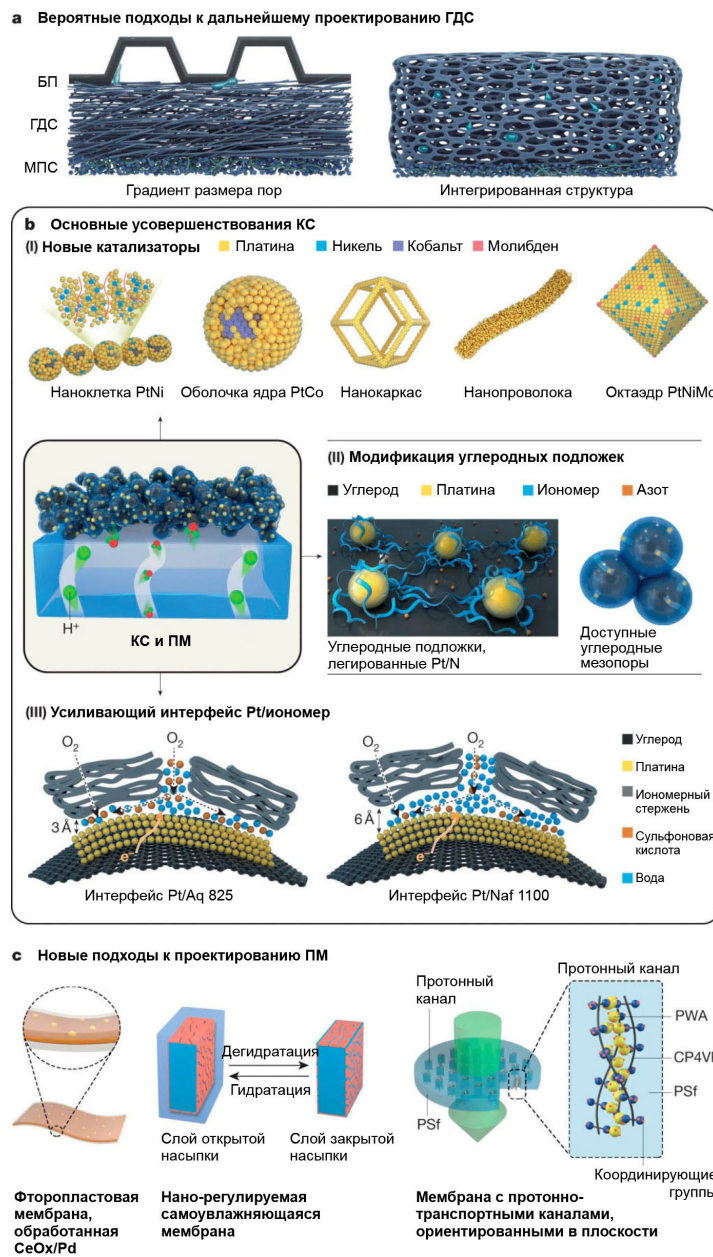


Рис. 3. Современные конструкции МБЭ: (а) два перспективных подхода к проектированию будущих ГДС, (b) важные достижения в КС, (c) современная методология разработки ПМ

полненному с помощью обобщенного метода координационных чисел, полые или слипающиеся наночастицы Pt с большим количеством вогнутых участков позволяют значительно улучшить кинетику электрокатализа [20]. Разработка катализаторов, не содержащих металлов платиновой группы, так же может способствовать снижению затрат [8, 21, 22]. Например, переходные металлы в сочетании с углеродом, легированным азотом, демонстрируют эффективность восстановления кислорода, сравнимую с современными катализаторами Pt/C как в полуэлементных, так и в рабочих условиях ТЭПМ [23]. Однако же, вследствие непостоянных характеристик, демонстрируемых катализаторами в ходе испытаний полуэлементов и ТЭПМ, непостоянства наночастиц и нестабильной геометрии необходима стабилизация активных центров катализаторов, которая позволит повысить их устойчивость при сохранении сверхвысоких характеристик в рабочей среде ТЭПМ [24].

Иономеры помогают доставлять протоны от частиц и к частицам катализатора на КС. Их распределение оказывает существенное воздействие на использование платинового катализатора и ионную проводимость. По сравнению с обычной сажей углеродные носители, легированные азотом, и углеродные носители с внутренними порами нужного размера вполне можно использовать для обеспечения более равномерного покрытия иономера. Например, при применении чистого платинового катализатора углеродные подложки, легированные азотом, увеличивают удельную мощность ТЭПМ до  $1390 \text{ мВт/см}^{-2}$  [25]. Сокращение длины боковой цепи иономеров также может повысить объемы использования Pt и активизировать доставку протонов [26]. Тем не менее, для набухания/сжатия в воде по-прежнему будут требоваться высокостабильные иономеры с надежной водоудерживающей способностью.

Упорядоченные в структуру МБЭ обеспечивают эффективные пути массопереноса, что в свою очередь обеспечивает интенсивное воздействие на место реакции и утилизацию Pt. Эффективными способами создания МБЭ с упорядоченной структурой являются наноструктурированные тонкопленочные катализаторы 3М и массивы углерода в иономерах. Тонкопленочные наноструктурированные КС 3М обеспечивают плотность мощности до  $1000 \text{ мВт/см}^{-2}$  при сверхнизком содержании платины  $0,094 \text{ мг/см}^{-2}$  [27]. Упорядоченный в структуру МБЭ на основе вертикально ориентированных массивов углеродных нанотрубок также способен обеспечивать высокую плотность мощности,  $1560 \text{ мВт/см}^{-2}$ , с низкой загрузкой катода Pt ( $0,1 \text{ мг/см}^{-2}$ ) [28]. Как ожидается, применяя данные стратегии к катализаторам и архитектуре КС, можно будет добиться повышения мощности, снижения стоимости и увеличения срока службы ТЭПМ.

**ПМ:** Чтобы облегчить применение ТЭПМ, для будущих ТЭПМ желательно изобрести новую мембрану, обладающую высокой протонной проводимостью, хорошей электрохимической и механической стабильностью и низкой стоимостью. Один из основных способов – усовершенствование коммерческих мембран из перфторсульфоновой кислоты. Уменьшение толщины мембраны может снизить поверхностное сопротивление, облегчая перенос протонов и водоподачу. Однако же, при этом снизится электрохимическая и механическая стабильность. Кроме того, в устройствах Mirai первого поколения поле течения в пористой среде может быть использовано для расширения механической поддержки тонкого ПМ [29]. Также в коммерческой практике в мембрану включают соли церия для повышения стабильности тонких мембран. Например, в устройствах Mirai второго поколения были достигнуты улучшенные показатели электрохимической и механической устойчивости за счет введения солей церия в мембраны, несмотря на то, что толщина мембраны была примерно на 30% меньше [30]. Другой перспективный метод это поиск новых альтернатив мембранам из перфторсульфоновой кислоты. Среди них широко исследуются сульфированные углеводородные полимеры благодаря своей хорошей термической стабильности и протонной проводимости [31]. Кроме того, ожидается, что свойства мембран улучшит ориентация структур переноса протонов и включение в мембраны ферроцианидных групп. Соответственно, представляется, что мембраны из перфторсульфоновой кислоты все еще будут применяться в течение следующего десятилетия, но большее распространение, по-видимому, получат не столь дорогие неперфторированные ПМ.

**БП:** Массообменные свойства пакета ТЭПМ зависят от структуры поля потока БП. Более 30% стоимости и 70% объема всего стека ТЭПМ приходится на БП5. Для повышения массообменных свойств БП в основном использовали модификацию канально-реберной структуры и создание полей течения без ребер, но с пористой структурой или микро-перегородками. Например, перегородки, штампованные в виде рыбьей чешуи, используемые в трехмерном БП, облегчили массоперенос в Mirai первого поколения [32]. С точки зрения стоимости и объема интеграция компонентов обеспечивает более компактную ячеистую структуру.

Полное устранение ГДС, а именно интегрированной структуры БП-МБЭ, значительно уменьшает объем ТЭПМ и с успехом устраняет межфазный перенос массы, тепла и электронов [33].

Кроме того, долговечность БП, на которую оказывают влияние электрохимическая коррозия и механическая деградация, также представляет собой серьезный практический фактор. Обработка БП слоем пассивного покрытия, в том числе с формированием низкоомных оксидных пленок и антикоррозионных покрытий, позволяет повысить его долговременную стабильность [32]. Ожидается, что коммерциализации ТЭПМ будет способствовать точность и единообразие используемых в настоящее время металлических/углеродных БП и покрытий.

Иными словами, сегодня решающим направлением является создание усовершенствованной, управляемой и простой в производстве структурной конструкции для текущих ключевых компонентов ТЭПМ, в то время как разработка новых материалов обещает дать значительный импульс к окончательной крупномасштабной коммерциализации ТЭПМ.

### **ТЭПМ: сложности и возможности**

Всё больше стран начинают заботиться о развитии водородной энергетики, обращая особое внимание на инновации в области ТЭПМ. Такое развитие может ускорить модернизацию энергетики, обеспечить углеродную нейтральность и способствовать экономическому росту. Местные администрации и органы государственной власти прилагают значительные усилия, стремясь воспользоваться открывающимися возможностями. Китай, крупнейший производитель водорода с годовым объемом производства 33 миллиона тонн, в марте обнародовал свою первую в истории национальную водородную стратегию, в соответствии с которой к 2025 году на дорогах Китая будет эксплуатироваться более 50 000 электромобилей на водородных топливных элементах. Во многих европейских странах принят закон о запрете двигателей внутреннего сгорания и замене их двигателями на ТЭПМ. Европейский союз планирует запретить продажу новых автомобилей с двигателем внутреннего сгорания с 2035 года. Министерство энергетики США поддерживает исследования и разработки, связанные с топливными элементами, уже с конца 1970-х годов. При поддержке от правительства и промышленности, индустрия ТЭПМ будет быстро развиваться, аналогично индустрии литий-ионных аккумуляторов.

Однако же, для повышения производительности, снижения затрат и повышения долговечности ТЭПМ, а следовательно, их крупномасштабной коммерциализации, по-прежнему необходимы передовые технологии. Правительства многих стран установили соответствующие приоритеты исследований и разработок, способных обеспечить широкое коммерческое применение ТЭПМ. По данным Организации по развитию новой энергетики и промышленных технологий Японии, целевыми значениями удельной мощности автомобильного блока топливных элементов, установленными для 2030 и 2040 гг., являются 6,0 кВт л<sup>-1</sup> и 9,0 кВт л<sup>-1</sup> соответственно [34]. По заявлению Совместного предприятия Европейского Союза по топливным элементам и водороду 2 (EU-FCH2JU), целевая плотность мощности пакета ТЭПМ к 2024 г. должна составлять 9,3 кВт л<sup>-1</sup> (с торцевыми пластинами) при напряжении одного элемента 0,6 В и плотности тока 2,67 А см<sup>-2</sup> [35]. Министерство энергетики США установило значение целевой стоимости блока ТЭПМ для легковых автомобилей на уровне 40 долларов за киловатт к 2025 году и 60 долларов за киловатт для большегрузных автомобилей к 2030 году [9]. Тем не менее, эти целевые показатели затрат труднодостижимы в рамках текущей модели усовершенствованного стека, поскольку по прогнозам стоимость составит 50 и 145 долларов США за киловатт соответственно [9]. Таким образом, технологические инновации по-прежнему необходимы для того, чтобы добиться повышения удельной мощности этих критических компонентов, снижения затрат и повышения долговечности ТЭПМ.

### **Заключение**

Подводя итог, мы приходим к выводу, что ТЭПМ достигли ранней стадии индустриализации и коммерциализации, но их неосновным компонентам все еще необходимо преодолеть некоторые

технические барьеры. Тремя критериями для оценки свойств и характеристик этих важнейших компонентов являются производительность, стоимость и долговечность ТЭПМ. При наличии поддержки на государственном уровне, в рамках эффективной и действенной нормативно-правовой базы, в будущем возможно добиться успешной коммерциализации ТЭПМ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bockris J.O.M.** A hydrogen economy. *Science* 176, 1323–1323 (1972).
- [2] **Fichtner J. et al.** Tailoring the oxygen reduction activity of Pt nanoparticles through surface defects: a simple top-down approach. *ACS catalysis* 10, 3131–3142 (2020).
- [3] **Mekhilef S., Saidur R., Safari A.** Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 981–989 (2012).
- [4] **Cano Z.P. et al.** Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy* 3, 279–289 (2018).
- [5] **Jiao K. et al.** Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature* 595, 361–369 (2021).
- [6] **Gröger O., Gasteiger H.A., Suchsland J.-P.** Electromobility: Batteries or fuel cells? *Journal of The Electrochemical Society* 162, A2605 (2015).
- [7] **Miyake J. et al.** Rechargeable proton exchange membrane fuel cell containing an intrinsic hydrogen storage polymer. *Communications Chemistry* 3, 1–7 (2020).
- [8] **Tang M., Zhang S., Chen, S.** Pt utilization in proton exchange membrane fuel cells: structure impacting factors and mechanistic insights. *Chemical Society Reviews* (2022).
- [9] **James B.D.** Fuel Cell Cost and Performance Analysis (2022 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit, 2022); [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353\\_james\\_2022\\_o.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353_james_2022_o.pdf)
- [10] Full specs of Toyota MIRAI 2021. Toyota USA [https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage\\_estimates/3002/3003](https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage_estimates/3002/3003) (2020).
- [11] **Shao M., Chang Q., Dodelet J.-P., Chenitz R.** Recent advances in electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Chemical reviews* 116, 3594–3657 (2016).
- [12] **Li M. et al.** Ultrafine jagged platinum nanowires enable ultrahigh mass activity for the oxygen reduction reaction. *Science* 354, 1414–1419 (2016).
- [13] **Gerteisen D., Sadeler C.** Stability and performance improvement of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack by laser perforation of gas diffusion layers. *Journal of Power Sources* 195, 5252–5257 (2010).
- [14] **Tanaka S., Bradfield W.W., Legrand C., Malan A.G.** Numerical and experimental study of the effects of the electrical resistance and diffusivity under clamping pressure on the performance of a metallic gas-diffusion layer in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 330, 273–284 (2016).
- [15] **Oezaslan M., Hasché F., Strasser P.** PtCu<sub>3</sub>, PtCu and Pt<sub>3</sub>Cu alloy nanoparticle electrocatalysts for oxygen reduction reaction in alkaline and acidic media. *Journal of The Electrochemical Society* 159, B444 (2012).
- [16] **Stephens I.E., Bondarenko A.S., Grønbjerg U., Rossmeisl J., Chorkendorff I.** Understanding the electrocatalysis of oxygen reduction on platinum and its alloys. *Energy & Environmental Science* 5, 6744–6762 (2012).
- [17] **Kitchin J.R., Nørskov J.K., Barteau M.A., Chen J.** Role of strain and ligand effects in the modification of the electronic and chemical properties of bimetallic surfaces. *Physical Review Letters* 93, 156801 (2004).
- [18] **Stamenkovic V.R. et al.** Improved oxygen reduction activity on Pt<sub>3</sub>Ni (111) via increased surface site availability. *Science* 315, 493–497 (2007).
- [19] **Garlyyev B. et al.** Optimizing the size of platinum nanoparticles for enhanced mass activity in the electrochemical oxygen reduction reaction. *Angewandte Chemie International Edition* 58, 9596–9600 (2019).



- [20] **Calle-Vallejo F. et al.** Finding optimal surface sites on heterogeneous catalysts by counting nearest neighbors. *Science* 350, 185–189 (2015).
- [21] **Gai H. et al.** Sandwich-like hierarchical porous dual-carbon catalyst with more accessible sites for boosting oxygen reduction reaction. *Materials Today Energy* 21, 100809 (2021).
- [22] **Xue S., Liang Y., Hou S., Zhang Y., Jiang H.** Alpha-nickel hydroxide coating of metallic nickel for enhanced alkaline hydrogen evolution. *ChemSusChem* 15, e202201072 (2022).
- [23] **Wan X. et al.** Fe–N–C electrocatalyst with dense active sites and efficient mass transport for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *Nature Catalysis* 2, 259–268 (2019).
- [24] **Lazaridis T., Stühmeier B.M., Gasteiger H.A., El-Sayed H.A.** Capabilities and limitations of rotating disk electrodes versus membrane electrode assemblies in the investigation of electrocatalysts. *Nature Catalysis* 5, 363–373 (2022).
- [25] **Ott S. et al.** Ionomer distribution control in porous carbon-supported catalyst layers for high-power and low Pt-loaded proton exchange membrane fuel cells. *Nature materials* 19, 77–85 (2020).
- [26] **Poojary S., Islam M.N., Shrivastava U.N., Roberts E.P., Karan K.** Transport and electrochemical interface properties of ionomers in Low-Pt loading catalyst layers: effect of ionomer equivalent weight and relative humidity. *Molecules* 25, 3387 (2020).
- [27] **Crowtz T., Dahn J.R.** Screening bifunctional Pt based NSTF catalysts for durability with the rotating disk electrode: The effect of Ir and Ru. *Journal of The Electrochemical Society* 165, F854 (2018).
- [28] **Murata S., Imanishi M., Hasegawa S., Namba R.** Vertically aligned carbon nanotube electrodes for high current density operating proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 253, 104–113 (2014).
- [29] **Wang Y., Diaz D.F.R., Chen K.S., Wang Z., Adroher X.C.** Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review. *Materials today* 32, 178–203 (2020).
- [30] **Pearman B.P. et al.** The chemical behavior and degradation mitigation effect of cerium oxide nanoparticles in perfluorosulfonic acid polymer electrolyte membranes. *Polymer degradation and stability* 98, 1766–1772 (2013).
- [31] **Miyatake K., Chikashige Y., Higuchi E., Watanabe M.** Tuned polymer electrolyte membranes based on aromatic polyethers for fuel cell applications. *Journal of the American Chemical Society* 129, 3879–3887 (2007).
- [32] **James B.D., Huya-Kouadio J.M., Houchins C., DeSantis D.A.** Mass production cost estimation of direct H<sub>2</sub> PEM fuel cell systems for transportation applications: 2012 update. report by Strategic Analysis, Inc., under Award Number DEEE0005236 for the US Department of Energy 18 (2012).
- [33] **Tanaka S., Shudo T.** Corrugated mesh flow channel and novel microporous layers for reducing flooding and resistance in gas diffusion layer-less polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 268, 183–193 (2014).
- [34] **Amamiya I., Tanaka S.** Current topics proposed by PEFC manufacturers, etc. – current status and topics of fuel cells for FCV. In *Hydrogen, Fuel Cell Project Evaluation, and Issue Sharing Week* (Japan New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019); available at <https://www.nedo.go.jp/content/100895101.pdf> (in Japanese).
- [35] **Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU).** 2019 annual work plan and budget (FCH 2 JU, 2018); [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch_en.pdf).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ЦЗЯН Хецин** – руководитель группы мембранного разделения и катализа, Институт биоэнергетики и технологии биопроцессов Циндао, Китайская академия наук.