

УДК 621.352.6

DOI: 10.37890/jwt.vi76.401

## **Проблемы производства судовых энергетических установок на базе топливных элементов в Российской Федерации**

**И.В. Розов**

**С.В. Титов**

**Е.В. Черных**

*Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск,  
Россия*

**Аннотация.** Водородная энергетика в настоящее время рассматривается многими странами как перспективное решение для уменьшения углеродного следа и включает в себя такие технологии, как: производство, использование, хранение, транспортировка водорода, производство топливных элементов и т.д. В статье показана актуальность внедрения водородной энергетике как одного из самых перспективных направлений по переходу к декарбонизированной экономике во всём мире. Обоснована перспективность применения низкотемпературных водородных топливных элементов с протонообменной мембраной как наиболее эффективных и экологически чистых источников энергии для водного и других видов транспорта, не требующих первоначального прогрева до рабочей температуры, отличающихся быстрым запуском и надёжностью. Описаны устройство и принцип работы топливного элемента, его основные компоненты и выполняемые ими функции. Представлен опыт некоторых российских организаций, выполняющих исследования в части улучшения характеристик протонообменных мембран, газодиффузионных слоёв. Приведен перечень отечественных мембранных технологий для топливных элементов и электролизных установок, которые в настоящее время разрабатываются российскими производственными и научными организациями. Авторами сформулированы основные проблемы производства и широкого распространения топливных элементов и водородных технологий в России, в том числе для нужд судовой энергетике.

**Ключевые слова:** водород, водородная энергетика, топливные элементы, протонообменные мембраны, мембранно-электродный блок, производство, водный транспорт, СЭУ

## **Problems of production of marine power plants based on fuel cells in the Russian Federation**

**Ilya V. Rozov**

**Sergey V. Titov**

**Elena V. Chernykh**

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Hydrogen energy is currently considered by many countries as a promising solution to reduce the carbon footprint and includes technologies such as: the production, use, storage, transportation of hydrogen, the production of fuel cells, etc. The article shows the relevance of introducing hydrogen energy as one of the most promising areas for the transition to a decarbonized economy throughout the world. The prospects of using low-temperature hydrogen fuel cells with a proton-exchange membrane as the most efficient and environmentally friendly energy sources for water and other types of transport, which do not require initial heating to operating temperature, are distinguished by fast start-up and reliability, are substantiated. The arrangement and principle of operation of the fuel cell, its main components and their functions are described. The experience of some Russian organizations performing research in terms of improving the characteristics of proton-exchange membranes and gas diffusion layers is presented. A list of domestic membrane

technologies for fuel cells and electrolysis plants, which are currently being developed by Russian industrial and scientific organizations, is given. The authors formulated the main problems of production and wide distribution of fuel cells and hydrogen technologies in Russia, including those for the needs of ship power engineering.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen energy, fuel cells, proton-exchange membranes, membrane electrode assembly, production, water transport, ship power plants

### **Введение**

Многие страны в настоящее время рассматривают водородную энергетику в качестве ключевого направления на пути к углеродной нейтральности. Водородная энергетика включает в себя следующие технологии: использование, хранение и транспортировка водородного топлива; производство топливных элементов (ТЭ) и энергетических установок на их основе; масштабное производство водорода из ископаемых и возобновляемых источников энергии.

Согласно данным Международной морской организации, 90 % мирового товарооборота проходит по морским путям. Загрязнение атмосферного воздуха происходит преимущественно отработавшими газами судовых энергетических установок. По некоторым данным, большинство судов используют тяжёлые фракции топлива, которые содержат в 3500 раз больше серы, чем обычное дизельное топливо. Водный транспорт является источником примерно 3 % глобальных выбросов парниковых газов. В 2018 году на морское судоходство отвелось около 23 % выбросов углекислого газа, а уже к 2030 году этот показатель может возрасти до 57 %. Кроме того, мелкодисперсная пыль, образованная во время выбросов с судов, оказывает самое большое негативное влияние на окружающую среду по сравнению с другими составляющими судовых выбросов. Предполагается, что более 570 тыс. преждевременных смертей с 2020 по 2025 годы в мире может быть связано с загрязнением воздуха судами. Таким образом, роль водного транспорта в обезуглероживании транспортной отрасли крайне высока [1, 2].

Разработкой и производством топливных элементов с твёрдым полимерным электролитом в мире занимается множество компаний, например: Plug Power (США), UTC Power (США), Ballard Power Systems (Канада), Siemens (Германия). Среди российских компаний, занимающихся исследованиями и разработками ТПТЭ, можно выделить ЦНИИ СЭТ, ООО «ИнЭнерджи», ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ряд других организаций.

Низкотемпературные водородные топливные элементы с твёрдым полимерным электролитом (ТПТЭ) считаются одними из наиболее перспективных и экологически чистых источников энергии для водного и других видов транспорта. Информация об использовании топливных элементов на водном транспорте представлена в работе [2], где приведены известные проекты водородных судов. ТПТЭ способны работать при температурах до 80 °С, обладают быстрым запуском, динамичностью отклика и востребованы в таких областях, как транспорт, стационарные энергетические установки и резервные системы, портативные приложения. В России их широкое распространение сдерживается множеством факторов: высокая стоимость вырабатываемой электроэнергии, отсутствие эффективных материалов, недостаточный ресурс ТЭ и т.д. Одной из главных проблем внедрения и развития водородной энергетики и ТЭ в России является отсутствие производства протонообменных мембран. Этому предшествует и отсутствие сырья для их изготовления. Наиболее важными компонентами для рынка ТЭ также являются биполярные пластины и мембранно-электродные блоки.

### Устройство и принцип работы топливного элемента

Топливный элемент – это химический источник тока, в котором в результате прямой химической реакции между окислителем (кислородом) и восстановителем (например, водородом, метанолом, природным газом) образуется электрический ток. В отличие от ДВС топливные элементы не сжигают топливо. При использовании водорода в качестве топлива единственными продуктами реакции являются чистая вода и тепло. КПД выпускаемых топливных элементов составляет более 60 %, а в некоторых случаях достигает 85 %.

Топливный элемент состоит из электролита, расположенного между двумя электродами (анодом и катодом). На анод непрерывно поступает углеводородное или водородное топливо, а на катод – кислород. В ТЭ с протонообменной мембраной электролитом является твёрдая полимерная мембрана, которая, при увлажнении водой, приобретает протонообменные свойства. Протоны диффундируют через мембрану, а электроны проходят через внешнюю цепь, генерируя электрический ток. Принцип работы топливного элемента показан на рисунке 1.

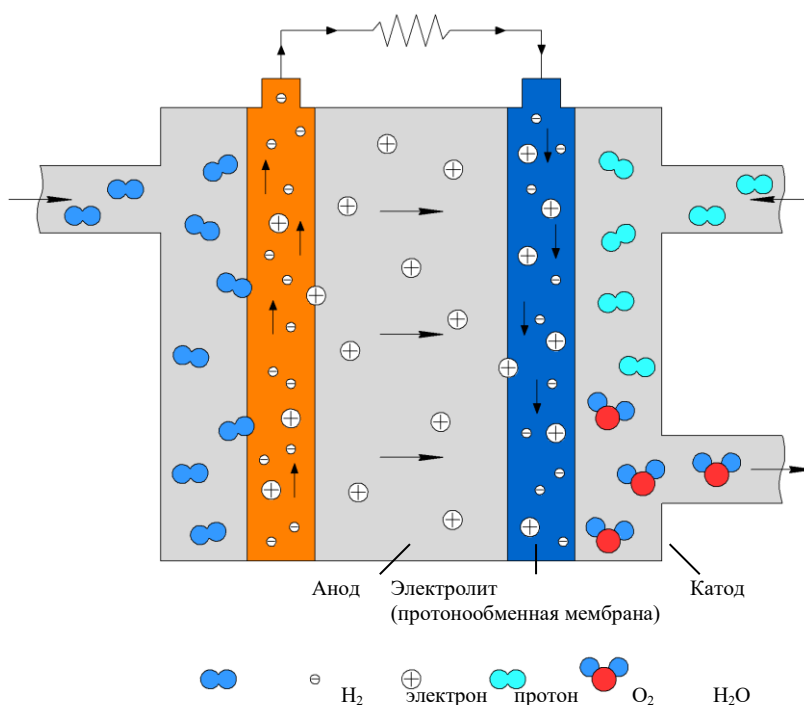


Рис. 1. Принцип работы топливного элемента

### Мембранно-электродный блок топливного элемента

Мембранно-электродный блок (МЭБ) является основным компонентом топливного элемента, который, как правило, состоит из протонообменной мембраны, катализатора, двух электродов и газодиффузионных слоёв (ГДС).

Старение (деградация) МЭБ связано с общими электрохимическими процессами: электрохимическое и химическое окисление углеродных и металлических компонентов электрода, рекристаллизация металлов, вращание металлических дендритов в протонпроводящую мембрану, нарушение целостности мембраны вследствие химических и электрохимических окислительно-восстановительных процессов. Срок службы современных МЭБ составляет порядка 5 тыс. часов при потерях напряжения около 10 % от первоначального [3].

**Протонообменная мембрана (ПОМ)** – это ключевой элемент МЭБ, который представляет собой полупроницаемую пленку, изготовленную из полимерного материала. Наиболее распространенным и коммерчески доступным материалом ПОМ является полимер перфторсульфоновой кислоты Nafion. Мембрана разделяет электроды во избежание их прямого электрического контакта, а также препятствует смешиванию реагентов (водорода и кислорода), приводящему к образованию взрывоопасной смеси. Основная функция ПОМ заключается в переносе протонов (ионов водорода) от анода к катоду. При контакте с водой мембрана набухает, происходит диссоциация ионогенных групп, что позволяет протонам двигаться в объеме полимера от одного электрода к другому.

В водородных ТЭ часто используются перфторированные сульфокатионитовые мембраны Nafion (DuPont, США), мембраны Flemion (Asahi Glass, Япония), Arkema M43 (Arkema, Франция), Aquivion (Solway, Бельгия) и др. В России существует их аналог – МФ-4СК производства ОАО «Пластполимер».

Мембраны такого типа обладают высокой протонной проводимостью, хорошими прочностными характеристиками, механической и термической стабильностью. Среди недостатков можно отметить снижение протонной проводимости в условиях пониженной влажности, высокую проницаемость по топливу (водород и метанол) и высокую стоимость мембран [4].

К основным требованиям, предъявляемым к мембране для обеспечения удовлетворительных вольтамперных и ресурсных характеристик МЭБ, относятся: высокая протонная проводимость; отсутствие электронной проводимости; долговременная механическая и химическая стабильность; низкая проницаемость для газовых реагентов.

Как правило, увеличение протонной проводимости при допировании мембраны связывают с увеличением количества подвижных протонов, лучшим удержанием воды и связыванием её частицами гидрофильных кластеров при низком влагосодержании. Многократные исследования «самоувлажняемых» мембран показывают, что введение платины в матрицу мембраны способствует поддержанию их влагосодержания, повышению протонной проводимости и уменьшению сквозного переноса водорода, метанола и кислорода [4].

В настоящее время исследования в области низкотемпературных водородных ТЭ в большей степени направлены на усовершенствование компонентов МЭБ – протонообменных мембран и каталитических слоёв [5].

ОАО «Пластполимер» было проведено исследование структурных и электротранспортных свойств модифицированных мембран на перфторированной матрице. В качестве объектов исследования были использованы перфторированные сульфокатионитовые мембраны МФ-4СК, изготовленные методом полива. Мембрана МФ-4СК представляет собой однородную плёнку шириной до 300 мм, толщиной 0,05-0,30 мм, эквивалентной массой 900-1300, которая используется в ТПТЭ, электролизёрах, а также используется для очистки агрессивных водных растворов электрохимическим способом. В мембраны были включены специальные модификаторы органической природы, составляющие 5 % от веса мембранного полимера: поливинилбутираль (гидрогель, способный удерживать воду в структуре мембраны) и сульфированный полисульфон (ионообменник). В качестве минерального допанта использовался кислый фосфат циркония. Исследовались также мембраны МФ-4СК с содержанием инертного фторполимера Ф-26 от 10 % до 40 %. Выявлено, что введение органических модификаторов приводит к уменьшению удельной электропроводности мембран во всей области исследуемых концентраций, в то время как введение кислого фосфата циркония повышает электропроводность и понижает диффузионную проницаемость [6, 7].

Улучшением свойств мембран для топливных элементов также занимается Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН. В работе [8]

описано модифицирование катионообменных гомогенных мембран Nafion-117, гетерогенных мембран МФК оксидом церия, образцы которых были испытаны в составе водород-воздушного топливного элемента. Максимальные показатели эффективности ТЭ для МЭБ с мембраной Nafion-117 и МЭБ с модифицированной мембраной составили 233 и 276 мВт/см<sup>2</sup> при 25 °С и 287 и 433 мВт/см<sup>2</sup> при 60 °С соответственно. Установлено, что введение функционализированного оксида церия в мембрану Nafion-117 увеличивает проводимость при 30 % относительной влажности ряда образцов и снижает газопроницаемость на 10-20 %. В модифицированных мембранах МФК наблюдалось увеличение селективности и, при обработке их серной кислотой, – увеличение проводимости.

В России на сегодняшний день находится более 100 научных и производственных организаций, обладающих компетенциями в сфере водородной промышленности. Для развития этой перспективной отрасли в России ведётся активное импортозамещение, осуществляется научное взаимодействие между научными организациями, машиностроителями и потребителями высокотехнологичной продукции [9].

В 2023 году Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ) приступил к выполнению НИОКР по теме «Водородная энергетика на водном транспорте, разработка систем хранения и использования новых экологичных видов топлива». В рамках реализации данной работы между СГУВТ и Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН было заключено соглашение, направленное на совместную работу по разработке компонентов энергоустановок на основе протонообменных мембранных топливных элементов, твердооксидных топливных элементов и инфраструктуры для хранения и использования водорода в качестве топлива (водородных заправок), разработке технологий хранения водорода на основе жидких органических носителей, а также проведение других совместных мероприятий для осуществления внедрения полученных результатов в области водородных технологий для использования на водном транспорте.

В Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 5 мая 2023 года состоялась рабочая встреча с представителями СГУВТ, в ходе которой были обсуждены следующие формы научного сотрудничества в сфере водородной энергетики и защиты окружающей среды на транспорте: использование низкоуглеродных видов топлива на транспорте; разработка систем хранения и использования водородного топлива; защита от водородной коррозии элементов электрохимических генераторов; технология производства протонообменных мембран; применение мембран при разработке технологии защиты окружающей среды. Итогом встречи стало подписание соглашения о научном сотрудничестве.

Учёные Московского физико-технического института (МФТИ) в настоящее время занимаются разработкой перфторированных полимерных мембран. По словам руководителя лаборатории технологии ионообменных мембран МФТИ, за первый год реализации проекта уже разработаны решения о получении суспензий перфторированных полимеров и мембран на их основе методом полива. Разработчики предполагают, что технология позволит производить экономичные отечественные мембраны для топливных элементов. В будущем учёные планируют добиться увеличения прочности мембран за счёт включения наноразмерных добавок, что позволит избежать потери ионной проводимости [10].

Перечень отечественных мембранных технологий для топливных элементов и электролизных установок, которые в настоящее время разрабатываются российскими производственными и научными организациями, представлен в таблице 1 [9].

Таблица 1

**Отечественные мембранные технологии для топливных элементов и электролизных установок**

Организация	Технология	Дополнительная информация
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва	Протонпроводящая мембрана с использованием трековых технологий для низкотемпературных полимерных топливных элементов и электролизных установок.  Протонная проводимость – 0,01 См/см; Влагопоглощение – менее 10%; Рабочая температура – 110 °С.	Ведется разработка мембраны.
ФГБУН ИХТТМ СО РАН, Новосибирская область	Среднетемпературные протонообменные мембраны для топливных элементов и электролизеров.	Ведется разработка мембраны.
АО «РНЦ «Прикладная Химия (ГИПХ)», г. Санкт-Петербург	Протонопроводящие мембраны для электролизеров и топливных элементов.	Ведется разработка мембран толщиной от 100 до 250 мкм.
ФГБУН ИНЭОС РАН, г. Москва	Высокотемпературная протонообменная мембрана.	Ведется разработка мембраны.
ФГАОУ ВО Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, Томская область	Радиационная технология формирования протонопроводящих мембран для водородных топливных элементов.	Ведется разработка технологии.
ООО «Краснодарский Компрессорный Завод», Краснодарский край	Протонообменная мембрана для электролизеров и топливных элементов.	Ведется разработка мембраны.
ФГБУН ИНЭОС РАН, г. Москва	Методика синтеза высокофторированных мономеров для протонпроводящих мембран топливных элементов и электролизных установок.	Ведется разработка мембраны.
ФГБУН Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва	Технология прививания катионообменных мембран на основе полиметилпентена для топливных элементов.  Повышение проводимости и селективности. Протонная проводимость до 21 мСм/см при 25 °С, 95% влажность, числа переноса по катионам до 99%.	Создана технология прививания. Ведется работа по оптимизации процессов.
ФГБУН Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва	Технология прививания анионообменных мембран на основе полиметилпентена для топливных элементов.  Повышение проводимости и селективности. Гидроксильная проводимость до 16 мСм/см при 25 °С, 95% влажность, числа переноса	Создана технология прививания. Ведется работа по оптимизации процессов.

Организация	Технология	Дополнительная информация
	по анионам до 96%.	
ФГБУН Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва	Технология улучшения перфторированной мембраны Nafion для топливных элементов.  Повышенная проводимость при низкой влажности (67 мСм/см при 9% влажности при 25 °С), собственная каталитическая активность в ТЭ.	Создана технология улучшения. Ведется работа по оптимизации процессов.
ООО «Краснодарский Компрессорный Завод», Краснодарский край	Анионообменная мембрана для электролизеров и топливных элементов.	Ведется разработка мембраны.
ФГБУН ИПХФ РАН, Московская область	Технология модификации ионообменных мембран с использованием мономеров различного типа.	Создана технология увеличения влагосодержания мембран типа Nafion(R), что обеспечивает увеличение протонной проводимости в 2 раза при 15% отн. влажности. Ведется работа по дальнейшему повышению проводимости.

Для соединения между собой отдельных ячеек батарей топливных элементов используются **биполярные пластины**, которые имеют каналы для подвода газообразных реагентов к электродам и отвода продуктов реакции. Биполярные пластины должны обладать высокой удельной электро- и теплопроводностью, коррозионной стойкостью и термостойкостью при рабочих температурах топливного элемента, устойчивостью при большой влажности, химическим равновесием в присутствии реагентов, а также газонепроницаемостью.

На обеих поверхностях МЭБ располагается газодиффузионный слой – пористый слой, используемый для подвода газообразных реагентов по поверхности электрода. Подача реагентов осуществляется к каждому топливному элементу через каналы биполярной пластины с тыльной стороны пористых газодиффузионных электродов. Через биполярную пластину также происходит удаление образованной воды.

Отвод воды при работе ТЭ является необходимой задачей, поэтому ГДС подвергают гидрофобной обработке специальными добавками (например, фторопластом). Кроме того, многие ГДС имеют микропористый слой, который обычно состоит из композиции сажи и тефлона, позволяющий увеличить мощностные характеристики и стабильность ТЭ.

ГДС обычно используются на трёх возможных типах подложки: углеродная ткань, нетканый материал и углеродная бумага. Структура материала ГДС во многом определяет характеристики ТЭ. Известно, что тканые и нетканые углеродные ГДС обладают лучшими, по сравнению с другими структурами, удельными характеристиками и более эффективны при высокой влажности. Тем не менее, углеродная бумага является более дешёвым и жёстким материалом, что облегчает проектирование полей течения в биполярных пластинах. Несмотря на это, многие производители ТЭ (например, Freudenberg, Sigracet) используют ГДС на основе

нетканых материалов, которые являются достаточно дорогими, так как изготавливаются по более сложной технологии [11].

Конструкция МЭБ топливного элемента представлена на рисунке 2.

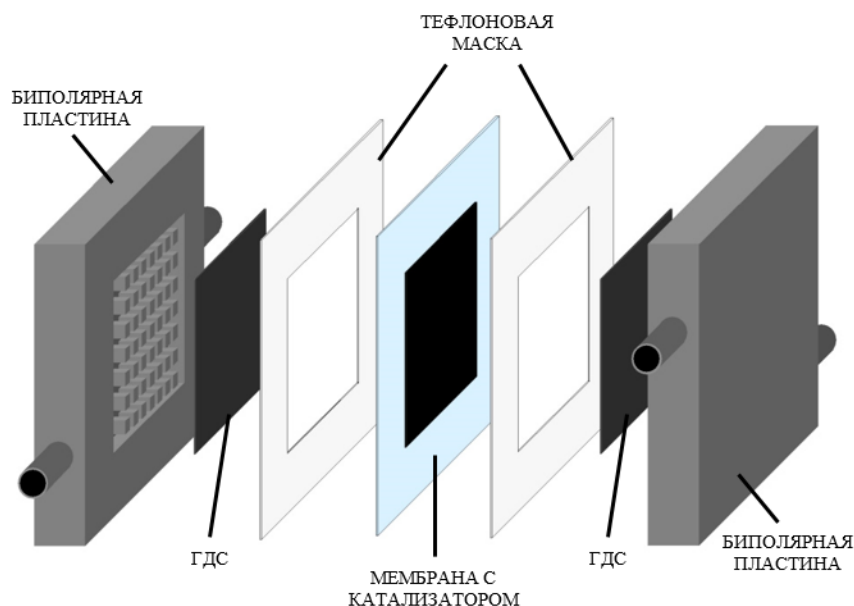


Рис. 2. Мембранно-электродный блок топливного элемента

Сравнение МЭБ с различными структурами, а именно с углеродным нетканым материалом и с углеродным картоном на аноде описано в работе [11]. В результате проведённого исследования обнаружено, что при практически равных активационных и диффузионных потерях резистивные потери у образца на основе углеродной бумаги немного ниже, а удельное сопротивление ниже в три раза ( $3 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$  по сравнению с  $9 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$  у образца с углеродным нетканым материалом). Максимальные значения плотности мощности в пике следующие:  $167 \text{ мВт}/\text{см}^2$  у МЭБ с углеродной бумагой и  $157 \text{ мВт}/\text{см}^2$  у МЭБ с нетканым материалом. Следует отметить, что данный эксперимент был проведён при оптимальных условиях эксплуатации, которые могут существенно отличаться от реальных.

В работе [12] представлены результаты разработки четырёх типов ГДС для топливных элементов, используемых в энергетических установках, с двухслойной конструкцией, разработанные с целью получения лучших, по сравнению с аналогами, характеристик: меньшей толщины, большей жесткости на изгиб, более низкими остаточными деформацией и сжимаемостью. Для изготовления ГДС применялись активированный уголь и одностенные нанотрубки Tuball. Электроды были изготовлены методом каландрирования, который позволяет получать электроды больших толщин, благодаря чему уменьшается сопротивление.

### **Проблемы производства и внедрения топливных элементов и водородных технологий в России**

В январе 2023 года между Правительством РФ, ГК «Росатом» и ПАО «Газпром» было подписано соглашение о реализации новой «дорожной карты» развития водородной энергетики на период до 2030 года (взамен предыдущей до 2024 года), которая стала единым документом развития отрасли. На развитие водородной



энергетики Правительство РФ также планирует выделить 9,3 млрд. рублей на период до 2024 года [13].

На отечественную водородную отрасль, как и на многие другие отрасли экономики, огромное влияние оказывает напряжённая геополитическая ситуация. Если до 2022 года государственная стратегия была ориентирована на производство и экспорт водорода, полученного из природного газа, электролизом, а также с использованием АЭС, то сейчас она перенаправляется на интересы внутреннего рынка.

Очевидно, что напряжённая обстановка в мире, в том числе введенные в отношении России санкции, сдерживают развитие рынка водородных технологий. Ситуация вынуждает сдвигать сроки реализации запланированных проектов. Так, например, городской автобус на водородном топливе, который президент В.В. Путин в конце 2020 года поручил создать к 2023 году, оказался очень дорогим (оценочная стоимость 90 млн. руб. по сравнению с 64 млн. руб. за электробус) и ещё не готовым к массовым испытаниям ввиду санкций, отсутствия водородных заправочных станций (ВЗС) и других проблем. В то же время в Москве планируется поставка более тысячи электробусов в 2023-2024 гг. [14].

Без водородной инфраструктуры невозможно развитие водородного транспорта и наоборот. Оба направления требуют вложений. По данным исследовательской компании Information Trends [15], количество ВЗС в мире составляет более 1000 штук. Из них только на Китай приходится примерно 1/3, на Японию – около 200, на США – менее 100. В России в настоящее время нет ни одной водородной заправочной станции. Вследствие глобального потепления, перехода на альтернативные и возобновляемые источники энергии спрос на водородные транспортные средства только растёт, поэтому инвестировать в ВЗС необходимо на перспективу.

Если ранее российским компаниям было выгоднее закупать топливные элементы и комплектующие к ним из-за рубежа, то сейчас санкционное давление сильно ограничивает эту возможность. Именно поэтому отечественные производители переходят на импортозамещение важных компонентов топливных элементов: протонообменных мембран, газодиффузионных слоёв, биполярных пластин. Важно понимать, что переход на отечественную продукцию потребует немало времени, к тому же существует проблема нехватки квалифицированных кадров, прежде всего, в области электрохимии.

Сдерживающим фактором широкого распространения топливных элементов на водном транспорте являются инвестиционные и эксплуатационные затраты. Топливные элементы в процессе работы СЭУ изнашиваются, вследствие чего возникают дополнительные экономические расходы. По некоторым оценкам, такие расходы составляют от 50 до 60 % капитальных затрат на ТЭ. Немаловажными также считаются проблемы, связанные с безопасным использованием, хранением и транспортировкой водородного топлива на борту судна. Конкретных требований к видам топлива и технологиям в настоящее время нет, они не включены в «Международный кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ)». Поэтому для того, чтобы сделать водородные системы такими же безопасными, как, например, системы на природном газе, потребуется немало времени и вложений [16].

### **Заключение**

Водородные технологии могут сыграть важную роль в решении проблем выбросов вредных веществ на воде. Водород и топливные элементы являются перспективным и надёжным решением, способным удовлетворить будущие требования по выбросам и обеспечивающим переход отрасли на безуглеродное использование энергии.

К сожалению, в настоящее время судостроительная отрасль в России находится на начальном этапе внедрения СЭУ на базе топливных элементов. В первую очередь это связано с геополитической обстановкой и переориентацией на внутренний рынок

страны, требующей от российских производителей создания отечественных водородных технологий. Производство и широкое распространение низкотемпературных топливных элементов с протонообменной мембраной в России сдерживается отсутствием внутреннего рынка ключевых компонентов ТЭ, преимущественно протонпроводящих мембран, газодиффузионных слоёв, биполярных пластин, а также отсутствием водородной инфраструктуры. Проблема здесь также заключается в большом количестве времени, которое должно быть затрачено на импортозамещение, и в нехватке высококвалифицированных кадров в области водородной энергетики. Для решения всех описанных в статье проблем должны быть приложены большие усилия, направленные, прежде всего, на создание в России предприятий, производящих протонообменные мембраны и химическое сырье для их производства, а также на введение в образовательные стандарты технических вузов соответствующих компетенций.

#### Список литературы

1. Скаридов А.С. «Зеленое судоходство» и проблема устойчивого использования морского транспорта // *Международное право и международные организации*. 2021. №1. С. 31-45. DOI: 10.7256/2454-0633.2021.1.35070.
2. Розов И.В., Титов С.В. Возможности широкого применения водородных топливных элементов на водном транспорте // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2023. № 1. С. 113-119.
3. Glebova N.V., Mazur A.S., Krasnova A.O., Pleshakov I.V., Nechitailov A.A. Investigation of stability of composite Nafion/nanocarbon material // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2023. Т. 14. №. 2. С. 202-207. DOI 10.17586/2220-8054-2023-14-2-202-207.
4. Каюмов Р.Р., Сангинов Е.А., Золотухина Е.В., Герасимова Е.В., Букун Н.Г., Укше А.Е., Добровольский Ю.А. «Самоувлажняемые» нанокомпозитные мембраны Nafion/Pt для низкотемпературных твердополимерных топливных элементов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. №. 13 (135). С. 40-48.
5. Кудашова Д.С., Кононенко Н.А., Бровкина М.А., Фалина И.В. Изучение деградации перфторированной мембраны в процессе работы в водородном топливном элементе // *Мембраны и мембранные технологии*. 2022. Т. 12. № 1. С. 29-37. DOI: 10.1134/S2218117222010059.
6. Отдел политетрафторэтилена и перфторированных ионообменных мембран // ОАО Пластполимер. URL: <http://www.plastpolymer.com/structure/otdel-politetrafortjetilena-i-perftorirovannyh-ionoobmennyyh-membran/> (дата обращения: 12.06.2023).
7. Кононенко Н.А., Лоза Н.В., Шкирская С.А., Тимофеев С.В. Электротранспортные и структурные свойства модифицированных протонообменных мембран // *МЕМБРАНЫ-2022. XV Юбилейная всероссийская научная конференция (с международным участием): тезисы докладов*. М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2022. С. 108-110.
8. Юрова П.А., Стенина И.А., Ярославцев А.Б. Мембранные материалы на основе катионообменных мембран и оксида церия с функционализированной поверхностью // *МЕМБРАНЫ-2022. XV Юбилейная всероссийская научная конференция (с международным участием): тезисы докладов*. М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2022. С. 128-130.
9. Российские компетенции водородной промышленности // Минпромторг России. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/5d77b582-6423-40b9-b33f-406f50994aba> (дата обращения: 12.06.2023).
10. Мембраны для водородных двигателей будут производить в России // *Научная Россия*. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/membrany-dla-vodorodnyh-dvigatелеj-budut-proizvodit-v-rossii> (дата обращения: 12.06.2023).
11. Федотов А.А., Тарасенко А.Б., Каранова Д.А. Влияние структуры анодного газодиффузионного слоя на характеристики топливного элемента // *Энергосбережение – теория и практика: Труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 19–23 октября 2020 г.)* – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. С. 282-284.

12. Киселева Е.А., Василенко А.А. Газодиффузионные слои из функциональных углеродных материалов для топливных элементов, используемых в энергетических установках // Завалишинские чтения 18 : сборник докладов, Санкт-Петербург, 16–20 апреля 2018 года / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. С. 240-243.
13. На водородную энергетику в России выделяют 9 млрд рублей до 2024 года // Интерфакс. URL: <https://www.interfax.ru/business/885918> (дата обращения: 12.06.2023).
14. Путин поставил задачу к 2023 году. Почему на улицы Москвы не выехали водоробусы и ждать ли их в будущем // MSK1.RU. URL: <https://msk1.ru/text/transport/2023/05/06/72281036/> (дата обращения: 12.06.2023).
15. Hydrogen Station Deployments Surpass 1,000 With China Leading the Way // INFORMATION TRENDS. URL: <https://informationtrends.com/global-market-for-hydrogen-fueling-stations-2023/press-release.php> (дата обращения: 12.06.2023).
16. Живлюк Г.Е., Петров А.П. Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2022. Т. 14. №. 1. С. 104-119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

### References

1. Skaridov A.S. «Zelenoe sudokhodstvo» i problema ustoichivogo ispol'zovaniya morskogo transporta [“Green shipping” and the problem of sustainable use of maritime transport]. International Law and International Organizations. 2021. No. 1. P. 31-45. DOI: 10.7256/2454-0633.2021.1.35070.
2. Rozov I.V., Titov S.V. Possibilities of wide application of hydrogen fuel cells in water transport // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2023. No. 1. P. 113-119.
3. Glebova N.V., Mazur A.S., Krasnova A.O., Pleshakov I.V., Nechitaïlov A.A. Investigation of stability of composite Nafion/nanocarbon material // Nanosystems: Phys. Chem. Math. 2023. Vol. 14. No. 2. P. 202-207. DOI 10.17586/2220-8054-2023-14-2-202-207.
4. Kayumov R.R., Sanginov E.A., Zolotukhina E.V., Gerasimova E.V., Bukun N.G., Ukshe A.E., Dobrovolsky Yu.A. Self-humidifying Platinum-Nafion nanocomposite membranes for low temperature polymer exchange membrane fuel cells // Alternative Energy and Ecology. 2013. No. 13 (135). P. 40-48.
5. Kudashova D.S., Kononenko N.A., Brovkina M.A., Falina I.V. Study of Perfluorinated Membrane Degradation During Operation in Proton Exchange Membrane Fuel Cell // Membrany i membrannye tekhnologii. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 29-37. DOI: 10.1134/S2218117222010059.
6. Otdel politetraforetilena i perflorirovannykh ionoobmennykh membran [Department of polytetrafluoroethylene and perfluorinated ion-exchange membranes] // OAO Plastpolimer. URL: <http://www.plastpolymer.com/structure/otdel-politetrafortjetilena-i-perflorirovannykh-ionoobmennykh-membran/> (accessed 12.06.2023).
7. Kononenko N.A., Loza N.V., Shkirkaya S.A., Timofeev S.V. Ehlektrotransportnye i strukturnye svoïstva modifitsirovannykh protonoobmennykh membran [Electrotransport and structural properties of modified proton exchange membranes] // MEMBRANES-2022 [MEMBRANES-2022]. XV Yubileinaya vsrossiiskaya nauchnaya konferentsiya (s mezhdunarodnym uchastiem): tezisy dokladov. Moscow: D. Mendeleev University, MUCTR. 2022. P. 108-110.
8. Yurova P.A., Stenina I.A., Yaroslavtsev A.B. Membrannye materialy na osnove kationoobmennykh membran i oksida tseriya s funktsionalizirovannoi poverkhnost'yu [Membrane materials based on cation-exchange membranes and cerium oxide with a functionalized surface] // MEMBRANES-2022 [MEMBRANES-2022]. XV Yubileinaya vsrossiiskaya nauchnaya konferentsiya (s mezhdunarodnym uchastiem): tezisy dokladov. Moscow: D. Mendeleev University, MUCTR. 2022. P. 128-130.
9. Rossiiskie kompetentsii vodorodnoi promyshlennosti [Russian competencies of the hydrogen industry] // Minpromtorg Rossii [Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation]. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/5d77b582-6423-40b9-b33f-406f50994aba> (accessed 12.06.2023).

10. Membrany dlya vodorodnykh dvigatelei budut proizvodit' v Rossii [Membranes for hydrogen engines will be produced in Russia] // Nauchnaya Rossiya [Scientific Russia]. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/membrany-dla-vodorodnyh-dvigatlej-budut-proizvodit-v-rossii> (accessed 12.06.2023).
11. Fedotov A.A., Tarasenko A.B., Karanova D.A. Vliyanie struktury anodnogo gazodiffuzionnogo sloya na kharakteristiki toplivnogo ehlementa [Influence of the Structure of the Anode Gas Diffusion Layer on the Characteristics of a Fuel Cell] // Ehnergoberezhenie – teoriya i praktika: Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov (Moskva, 19–23 oktyabrya 2020 g.) – Kursk: Izd-vo ZAO «Universitetskaya kniga». 2020. P. 282-284.
12. Kiseleva E.A., Vasilenko A.A. Gazodiffusion layers from functional carbon materials for fuel elements used in energy installations // Zavalishinskie chteniya 18 : sbornik dokladov, Sankt-Peterburg, 16–20 aprelya 2018 goda / Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aehrosmicheskogo priborostroeniya. Spb: State University of Aerospace Instrumentation. 2018. P. 240-243.
13. Na vodorodnuyu ehnergetiku v Rossii vydelyat 9 mlrd rublei do 2024 goda [9 billion rubles will be allocated for hydrogen energy in Russia until 2024] // Интерфакс [Interfax]. URL: <https://www.interfax.ru/business/885918> (accessed 12.06.2023).
14. Putin postavil zadachu k 2023 godu. Pochemu na ulitsy Moskvy ne vyekhali vodorobusy i zhdaf' li ikh v budushchem [Putin set a target by 2023. Why hydrogen buses did not take to the streets of Moscow and whether to expect them in the future] // MSK1.RU. URL: <https://msk1.ru/text/transport/2023/05/06/72281036/> (accessed 12.06.2023).
15. Hydrogen Station Deployments Surpass 1,000 With China Leading the Way // INFORMATION TRENDS. URL: <https://informationtrends.com/global-market-for-hydrogen-fueling-stations-2023/press-release.php> (accessed 12.06.2023).
16. Zhivljuk G.E., Petrov A.P. The use of fuel cells in the energy supply of water transport // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 104-119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Розов Илья Владимирович**, аспирант, специалист научно-исследовательской службы, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [ilya\\_rozov@mail.ru](mailto:ilya_rozov@mail.ru)

**Ilya V. Rozov**, postgraduate student, Specialist of the Research Service, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [ilya\\_rozov@mail.ru](mailto:ilya_rozov@mail.ru)

**Титов Сергей Владиленович**, д.т.н., доцент кафедры Судовых энергетических установок, начальник научно-исследовательской службы, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [scom@ngs.ru](mailto:scom@ngs.ru)

**Sergey V. Titov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Marine Power Plants Department, Head of the Research Service, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [scom@ngs.ru](mailto:scom@ngs.ru)

**Черных Елена Викторовна**, экономист научно-исследовательской службы, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: [shvorneva.lena@bk.ru](mailto:shvorneva.lena@bk.ru)

**Chernykh Elena Viktorovna**, Economist of the Research Service, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: [shvorneva.lena@bk.ru](mailto:shvorneva.lena@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; опубликована онлайн 20.09.2023.  
Received 20.06.2023; published online 20.09.2023.