



## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

А.А. Филимонова, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, Р.И. Разакова

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

aachichirova@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть используемые электрохимические технологии для производства водорода на автозаправочных станциях и функционирования двигателей гибридных электромобилей на аккумуляторных батареях с топливными элементами. *Провести сравнительный анализ производства и использования энергии электрохимическими и традиционными методами на автотранспорте. МЕТОДЫ.* Основаны на анализе литературных данных и проведении математических расчетов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Для легкового электромобиля было рассчитано количество электричества, которое можно получить в топливном элементе при переработке 1 кг водорода. Показано, что удельный расход топлива для водородного электромобиля составляет в среднем 1 кг водорода на 100 км. Было проведено сравнение топливных затрат для различных типов автомобильных двигателей для текущих рыночных условий в России и странах Евросоюза. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Водород может стать экологически безопасным топливом будущего, снизить глобальную зависимость от ресурсов ископаемого топлива и уменьшить выбросы углекислого газа в транспортной отрасли. В настоящее время экологичные технологии достигли значительного прогресса, разработаны и продаются по всему миру современные автомобили различных классов на водородном топливе, причем их ценовые характеристики уже сопоставимы с имеющимися традиционными технологиями. Преимущества электрохимических технологий получения и использования водорода в автотранспортном секторе достаточные, чтобы сделать водород серьезным кандидатом в энергоносители для современных транспортных систем.

**Ключевые слова:** водородная энергетика; топливные элементы; водородные автозаправочные станции; электрохимические технологии; автомобили на водородном топливе.

**Для цитирования:** Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Разакова Р.И. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 104-115. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-104-115.

## ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGIES FOR HYDROGEN POWERED VEHICLES

Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Razakova R.I.

Kazan State Power Engineering University

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russia

aachichirova@mail.ru

**Abstract:** *PURPOSE.* Consider the electrochemical technologies used for the production of hydrogen at gas stations and the operation of hybrid electric vehicle engines on storage batteries with fuel cells. *Comparative analysis of the production and use of energy by electrochemical and traditional methods in vehicles. METHODS.* Based on the analysis of literature data and mathematical calculations. *RESULTS.* For a light electric vehicle, the calculation of the amount of electricity that can be obtained in a fuel cell by processing 1 kg of hydrogen was carried out. It has been shown that a hydrogen electric car can travel about 100 km for 1 kg of hydrogen. A comparison was made of the fuel costs for different types of automotive engines for the current

*market conditions in Russia and the EU countries. CONCLUSION. Hydrogen can become the environmentally friendly fuel of the future, reduce global dependence on fossil fuel resources and reduce carbon dioxide emissions from the transportation industry. Today, green technologies have made significant progress, modern vehicles of various classes on hydrogen fuel have been developed and sold around the world, and their price characteristics are already comparable to existing traditional technologies. The advantages of electrochemical technologies for the production and use of hydrogen in the road transport sector are sufficient to make hydrogen a serious energy candidate for modern transportation systems.*

**Key words:** *hydrogen energy; fuel cells; hydrogen filling stations; electrochemical technologies; hydrogen powered vehicles.*

**For citation:** Filimonova AA, Chichirova ND, Chichirov AA, Razakova RI. Electrochemical technologies for hydrogen powered vehicles. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2): 104-115. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-104-115.

### **Введение**

В 2020 году произошло окончательное общественное признание водорода в качестве ключевого фактора в борьбе с декарбонизацией промышленных и транспортных выбросов [1, 2]. Многие страны, в том числе Европейский Союз (ЕС) обязались сократить выбросы парниковых газов, особенно в транспортном секторе. Крупнейшие производители грузовых автомобилей в Евросоюзе 14 декабря 2020 года решили прекратить продажи большегрузных машин с бензиновыми и дизельными двигателями к 2040 году - на десятилетие раньше, чем первоначально планировалось.

Водород является экономически привлекательным энергоносителем для использования в транспортной энергетике, где он выступает прямым конкурентом для электротранспорта и традиционных двигателей внутреннего сгорания. В сфере грузового автотранспорта и автобусов водород уже сейчас обладает экономическими преимуществами перед батарейным электрическим транспортом в отличие от водородных легковых автомобилей, которые пока являются дальнесрочной перспективой. Таким образом, транспортный сектор мог бы существенно способствовать достижению целей декарбонизации за счет внедрения новых экологически более чистых автомобильных технологий в сравнении с традиционными. К таким альтернативным технологиям относятся, в первую очередь, электрохимические, обеспечивающие «нулевые» прямые выбросы парниковых газов на автотранспорте [3].

### **Обзор литературы**

Существующие традиционные технологии производства электроэнергии представляются сложным, многостадийным процессом, что неминуемо ведет к потере выходной мощности на каждом последующем этапе и снижению КПД. Так производство электроэнергии путем сжигания органического топлива и использования полученной теплоты для совершения работы в двигателе, вращающем электрогенератор, с точки зрения логики не является простейшим путем превращения химической энергии в электрическую. В свою очередь, электрохимические устройства, основанные на электролизе, позволяют реализовать прямое превращение энергии химической реакции в электрическую в одном аппарате, в принципе состоящем из двух электродов и электролита между ними. Именно по этой причине, КПД работающих топливных элементов и гибридных установок на их основе уже сейчас превосходит все остальные существующие системы получения электроэнергии.

В настоящее время рынок аккумуляторных электромобилей, основанных на электрохимических технологиях производства энергии, стремительно растет, хотя все же есть некоторые недостатки, которые до сих пор остаются нерешенными, включая высокие инвестиционные затраты, небольшой запас хода, ограниченную инфраструктуру подзарядки и электричество на основе ископаемого топлива, сводящее к минимуму устойчивые преимущества технологии [4, 5].

Только набирающий обороты водородный автотранспорт и его инфраструктура [6] также используют электрохимические технологии для получения энергии.

*Схема работы водородной заправочной станции с использованием электрохимических технологий*

На водородных автозаправочных станциях (АЗС) электрохимические технологии применяются для получения водорода высокой степени чистоты, водоподготовки (очистки

воды), для проведения процесса электролиза и для компримирования (сжатия) полученного водорода [7].

Кроме электролизных заправок существуют варианты использования каталитического риформинга углеводородов при температуре 500 градусов и давлении 4 МПа с последующей доочисткой выходящих газов и использование привозного водорода в баллонах, полученного, например, на промышленных предприятиях с последующей системой доочистки.

По объему выпускаемой продукции водородные автозаправочные станции делятся на следующие типы:

- малые, выпускают 20 - 40 кг водорода в сутки, для заправки 5-10 автомобилей;
- средние, производят 50-1250 кг водорода в сутки для заправки 250 легковых и 25 грузовых автомобилей;
- промышленные предоставляют до 2500 кг газа в сутки для заправки 500 и более автомобилей.

Примерный расход энергии при работе всей заправочной станции, включая оборудование, с компрессией выходящего водорода до 350 атм. составляет 65 кВт\*ч/кг. Если АЗС компримирует водород до 700 атм., то примерный расход электроэнергии составляет 68 кВт\*ч/кг.

Водородная заправочная станция состоит из нескольких блоков. Стационарная АЗС или автономный блок-контейнер подразумевает наличие генератора водорода и вспомогательных агрегатов, таких как блок водоподготовки, блок электропитания, система охлаждения и др. (рис. 1).

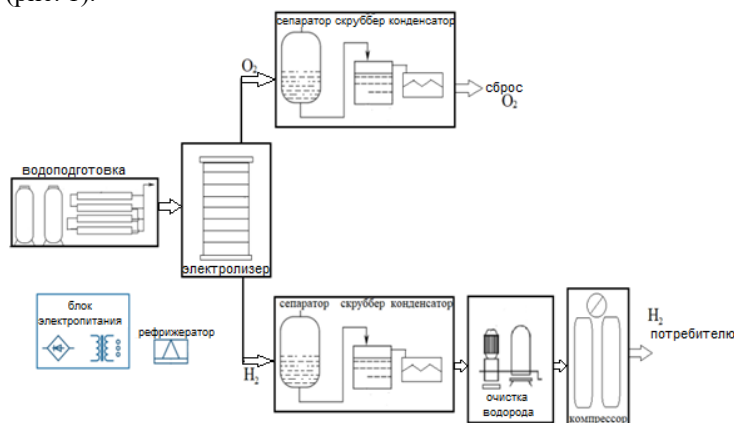


Рис. 1. Принципиальная схема водородной автозаправочной станции

*Fig. 1. Schematic diagram of a hydrogen gas station*

Процесс начинается с подготовки воды, так как для электролиза нужна чистая вода, освобожденная от макро и микропримесей, с удельной электропроводностью меньше 0,1 мкСм/см. Использование обессоленной воды позволяет избежать образования отложений на мембранах и электродах.

Исходная водопроводная вода подается в блок очистки, где проходит последовательно стадии механической фильтрации, ионного обмена и обратного осмоса, либо электродеионизации в качестве финишной обработки (рис. 1).

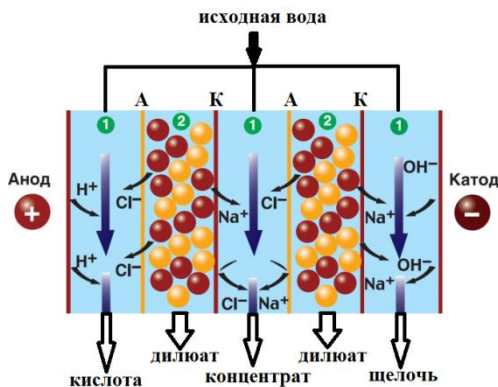


Рис. 2. Схема обессоливания воды методом электродеионизации

*Fig. 2. Scheme of water desalination by electrodeionization*

Электродеионизация – электрохимический метод подготовки воды, основанный на электролизе, объединяет в себе два процесса – электродиализ с ионным обменом. Электродеионизация применяется для получения сверхчистой воды в теплоэнергетике, в медицине и в лабораторных анализах.

К деионизированной воде для повышения электропроводности добавляют щелочь КОН или NaOH до получения раствора электролита с массовой долей 30%. Для предотвращения или уменьшения коррозии деталей электролизёров при приготовлении электролита применяют только чистые КОН или NaOH, получаемые, например, электролизом растворов хлоридов щелочных металлов с ртутным катодом.

Предельное содержание растворимых в электролите и не разрушающихся в процессе электролиза примесей можно вычислить по уравнению:

$$C_p = C_3 + \frac{C_v \cdot Q_v \cdot C_{щ}}{Q_{щ}} - \text{содержание примесей в растворе электролита,}$$

$C_v$  - содержание примеси в питательной воде, г/л;  $C_3$  - содержание примеси в свежем растворе электролита, подаваемого в аппарат для пополнения потерь щелочи, г/л;  $C_{щ}$  - концентрация щелочи в электролите, г/л;  $Q_v$  - расход питательной воды на единицу выработанного газа, л;  $Q_{щ}$  - расход щелочи на единицу выработанного газа, г.

Затем полученный щелочной раствор подается в блок электролиза. На водородных АЗС используют электролизеры преимущественно с твердо-полимерным электролитом, работающие на чистой воде (рис. 3) [8-10].

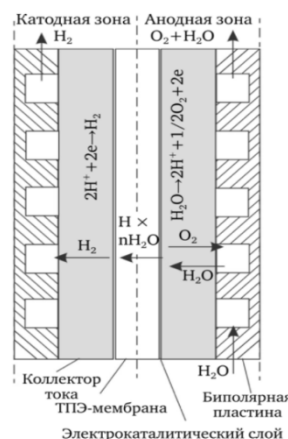
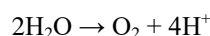
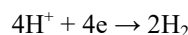


Рис. 3. Схема электролизера с твердо-полимерным электролитом  
Fig. 3. Diagram of an electrolyzer with a solid polymer electrolyte

При проведении твердо-полимерного электролиза на аноде из воды образуются кислород и протоны, мигрирующие через протонообменную мембрану к катоду:



На катоде, протоны соединяются с электронами из внешней сети и происходит реакция выделения водорода:



На сегодняшний день твердо-полимерный электролиз - это наиболее подходящая технология для получения водорода на АЗС в связи с ускоренным динамическим временем отклика, возможностью работать при высокой плотности тока, при повышенном давлении до 150 атм. и температуре до 370 °С. Такие показатели способствуют снижению эксплуатационных расходов, высокому проценту рабочей эффективности до 80-90% и возможности получения на выходе газов с чистотой 99,999%.

Для работы электролизной установки нужно понизить сетевое напряжение и преобразовать переменный ток в постоянный. Эти функции выполняет «Блок электропитания», который, кроме того, обеспечивает электропитание для остального оборудования водородной установки.

Выделяющиеся газы (водород и кислород) далее идут по отдельным трактам.

Водород из электролизера поступает в «Блок сепарации» по трубопроводу в виде смеси с электролитом. Для выделения водорода от жидкости служит газожидкостный сепаратор. Сепаратор представляет собой сосуд, в котором газ выделяется из электролита и

собирается в верхней части сосуда. Электролит остается внизу сосуда, затем после полного выделения газа сливается и возвращается в блок электролиза.

На следующем этапе водород, который содержит примеси щелочи, подается в скруббер для отмывки от щелочи. В скруббер снизу подаётся газ, а сверху из разбрызгивателя течет деионизированная вода. Капли воды в виде душа падают вниз, промывая встречный поток газа от остатков щелочи. Отработавшая вода с примесью щелочи направляется в блок электролиза.

После очистки от щелочи водород насыщен водяным паром и имеет температуру около 50°C, т.е. требуется его охлаждения и осушка. Эти процессы проводятся в конденсаторе. Конденсатор – это теплообменник, в котором газ охлаждается хладоносителем поступающим от «Рефрижератора». Предлагаются различные варианты охлаждения водорода, например, рефрижератор может быть частью оборудования водородной станции, возможен вариант, когда хладоноситель подаётся от внешней системы охлаждения и др. [11, 12]. Водяной пар конденсируется в конденсаторе после чего отводится из системы. Водород, полученный на этом этапе, содержит примеси воды и кислорода и подаётся в «Блок очистки». Кислород, в случае, если он не нужен потребителю, сбрасывается в атмосферу.

Для самой тонкой очистки используются либо мембранная технология, в которой водород проходит через мембрану с нанесенным покрытием из палладия или других металлов платиновой группы, либо через собой сосуд, заполненный мелкими гранулами катализатора на основе благородных металлов (платина, палладий). В присутствии катализатора примеси селективно окисляются, а кислород активно реагирует с водородом, превращаясь в воду.

Далее водород подаётся в осушитель, заполненный специальным поглотителем (адсорбентом). Адсорбент поглощает влагу из газа. Сосуды-адсорберы работают попеременно – один находится в рабочем цикле, другой – в цикле регенерации. Таким образом водород осушается до точки росы -75°C, после чего подаётся в компрессор, так как в автомобилях обычно используют водородные баллоны с давлением 350 или 700 атм.

Работающие на водородном топливе автомобили заправлять сложнее, чем традиционный транспорт [13]. Заправка выполняется газом в сжатом или сжиженном состоянии. На большинстве АЗС топливо продаётся в газообразном состоянии. Сжиженный водород используется только на 10% станций. Время заправки водородным топливом составляет 5 минут. Примерно столько же тратится на заполнение полного бака бензином.

Для сжатия водорода используют либо традиционные механические компрессоры, либо возможно применение электрохимических водородных насосов, принцип действия которых основан на процессах электролиза. Электрохимический насос имеет ряд преимуществ перед традиционным механическим компрессором [14].

На рис. 4 приведена схема электрохимического насоса, который представляет собой элемент с твердо-полимерной мембраной. При подаче водорода на аноде происходит следующая реакция:



Молекулы водорода отбирают электроны от анода, образуя ионы водорода (протоны).

Образовавшиеся протоны мигрируют к катоду, где происходит электрохимическое восстановление до водорода:



Компрессия происходит без недостатков, присущих механическим компрессорам - большой потребляемой мощности, уровня шума и загрязнения смазочными материалами сжатого водорода. Электрохимический компрессор может обеспечивать давление до 300-400 атм. Причем, в одном аппарате кроме компрессии газа возможна еще и его очистка, так как на анод можно подавать водородсодержащую смесь газов. В результате анодного окисления образующиеся протоны будут мигрировать через мембрану, которая становится препятствием для всех остальных газов смеси, что является фактором сепарации газовой смеси.

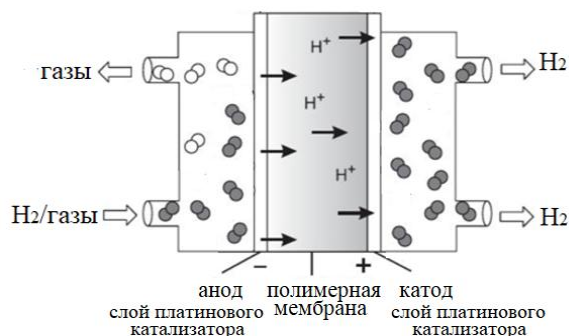


Рис. 4. Схема функционирования электрохимического насоса  
Fig. 4. Operation diagram of the electrochemical pump

Предполагая, что водород ведет себя как идеальный газ, термодинамическое напряжение процесса сжатия определяется по соотношению входного и выходного давлений. Расчет требуемого напряжения проводится по уравнению Нернста:

$$E = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}$$

где  $E$  – электродвижущая сила,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура,  $F$  – постоянная Фарадея,  $P_{\text{вх/вых}}$  – давление газа на входе/выходе.

Когда ячейка используется только для очистки водорода, а не для сжатия, ее параметры соответствуют значениям  $P = 0$  и  $E = 0$ . В случае работы в режиме компрессии водорода, требуется напряжение 30 мВ для получения десятикратного сжатия при 298 К.

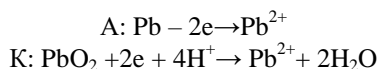
#### Электрохимические источники энергии для автотранспорта

Автомобили на топливных элементах представляют собой электромобили, в которых электроэнергия генерируется системой топливных элементов. Такие электромобили в основном представляют собой гибриды, включающие дополнительный источник энергии аккумуляторную батарею. Отношение мощности тяговой аккумуляторной батареи к общей мощности (степень гибридизации) варьируется в зависимости от модели. Обычно система топливных элементов имеет мощность 60-100 кВт, а аккумуляторная батарея до 30 кВт на легковых автомобилях [15].

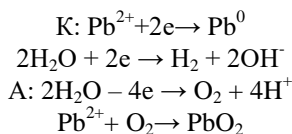
Устройство, в котором происходит как процесс преобразования химической энергии в электрическую, так и обратный процесс преобразования электрической энергии в химическую, получило название электрохимического аккумулятора (или просто аккумулятора) (рис. 5). Из определения следует, что аккумулятор сочетает в себе как гальванический элемент, так и электролизную ячейку. Процесс преобразования электрической энергии в химическую называется зарядом, в этом режиме электрохимический аккумулятор работает как электролизная ячейка. В процессе заряда происходит накопление энергии в виде химической энергии окислителя и восстановителя. Процесс преобразования химической энергии в электрическую получил название разряда. В этом режиме аккумулятор работает как гальванический элемент.

Рассмотрим в качестве примера процессы в свинцовом аккумуляторе, электрохимическую систему которого можно записать в виде разряда и заряда.

При разряде на катоде и на аноде образуются ионы свинца, которые при взаимодействии с серной кислотой образуют малорастворимую соль сульфата свинца.



При заряде кислород соединяется со свинцом и образует оксид свинца на аноде, на катоде образуется свинец.



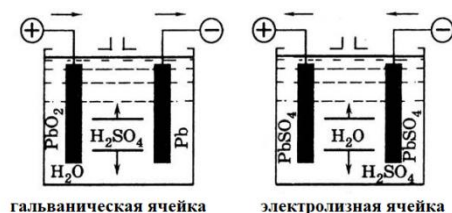


Рис. 5. Схема работы электрохимического аккумулятора  
Fig. 5. Scheme of operation of the electrochemical battery

Топливные элементы функционируют по принципу электролиза с обратными процессами на электродах. В связи с этим имеющиеся на сегодняшний день топливные элементы по конструкции соответствуют существующим электролизерам: в них работают те же материалы и технологии (например, те же мембраны, электрокатализаторы на основе металлов Pt-группы, схожие технологии их синтеза и нанесения и т.д.). В связи с этим наиболее подходящим для использования на автотранспорте является топливный элемент с твердо-полимерным электролитом, функционирующий по тому же принципу, что и твердо-полимерный электролизер, использующийся для генерации водорода на АЗС [16, 17]. С этой точки зрения существуют реальные предпосылки для снижения стоимости электролизёров с твердо-полимерным электролитом, связанные с началом широкомасштабного производства топливных элементов по той же технологии.

Эти топливные элементы функционируют при относительно низких рабочих температурах (60—160 °С) и их КПД составляет 50% (рис. 6). Они отличаются высокой удельной мощностью, позволяют быстро регулировать выходную мощность, могут быть быстро включены. Недостаток этого типа элементов — высокие требования к качеству топлива, поскольку загрязненное топливо может вывести из строя мембрану. Номинальная мощность топливных элементов этого типа составляет 1–100 кВт.

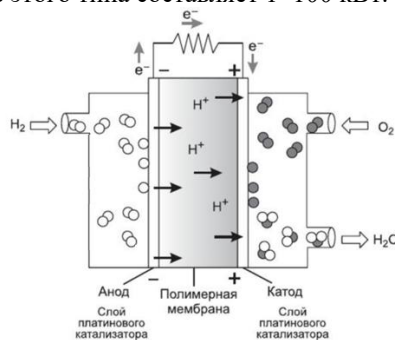


Рис. 6. Схема твердо-полимерного топливного элемента для автотранспорта  
Fig. 6. Scheme of solid-polymer fuel cell for motor transport

Через протонообменную мембрану могут перемещаться протоны, но через нее не проходят электроны, в результате чего между катодом и анодом возникает разность потенциалов. Расщепление молекулы водорода происходит относительно легко при использовании платинового катализатора. Однако, к сожалению, расщепление молекулы кислорода является более трудным, и это вызывает значительные электрические потери. Подходящий каталитический материал для этого процесса не был обнаружен, и платина является лучшим вариантом. Мембраны должны обладать высокой ионной проводимостью, малой газопроницаемостью, высокой механической прочностью и отсутствием электронной проводимости.

На анод подают водород, где он под действием катализатора расщепляется на протон и электрон. Вновь образованные протоны проникают через мембрану полимерного электролита на катодную сторону. Электроны перемещаются по внешней цепи к катоду, создавая, таким образом, выходной ток топливного элемента. Между тем, на катод подается поток кислорода. Молекулы кислорода реагируют с протонами, проникающими через мембрану полимерного электролита, и электронами, проходящими через внешнюю цепь, с образованием молекул воды.

#### Материалы и методы

Материалы и методы включают обзор литературных данных с целью рассмотрения используемых электрохимических технологий для производства водорода на автозаправочных станциях и функционирования двигателей гибридных электромобилей на аккумуляторных батареях с топливными элементами.

С целью проведения сравнительного анализа производства и использования энергии электрохимическими и традиционными методами на автотранспорте проведены математические расчеты стоимости заправки легковых автомобилей с различными типами двигателей в текущих рыночных условиях.

*Сравнительный анализ топливных расходов на легковой автомобиль с различными типами двигателей*

Для анализа топливных затрат водородного автотранспорта проведем расчет с использованием электрических характеристик легкового электромобиля Tesla 3.

При известной выходной мощности автомобиля для анализа расхода топлива воспользуемся законами электрохимии. Основными физическими характеристиками электрохимических систем и конкретных типов химических источников тока являются электродвижущая сила (ЭДС), напряжение, вольт-амперная характеристика и разрядная кривая, а также мощность  $P$ , удельная мощность  $P_{уд}$ , емкость  $Q$ , удельная емкость  $Q_{уд}$ , энергия  $W$  и удельная энергия  $W_{уд}$ , и другие.

Рассчитаем, какое количество электричества можно получить в топливном элементе при переработке 1 кг водорода.

Для каждой молекулы водорода ( $H_2$ ), которая реагирует в топливном элементе, на аноде топливного элемента высвобождаются два электрона. Это наиболее легко увидеть в твердо-полимерных топливных элементах из-за простоты анодной (топливной) реакции, хотя правило двух электронов на двухатомную молекулу водорода ( $H_2$ ) справедливо для всех типов топливных элементов.

Решение требует расчета силы тока (А) и использования принципа эквивалентности электронов:



Расчет ведем по закону Фарадея:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{F \cdot n}$$

$$I = \frac{96500 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}} \cdot 1000 \text{ г} \cdot 2}{3600 \text{ с} \cdot 2 \text{ г/моль}} = 26,8 \text{ кА}$$

Результат этого расчета показывает, что из 1 кг водорода в топливном элементе можно сгенерировать 26,8 кА тока или, другими словами, расход топлива на 1 Ампер тока составляет 0,037605 кг  $H_2$ .

Одна ячейка топливного элемента может выдавать теоретическое напряжение постоянного тока 1,23 В. Решение этой задачи можно упростить, если предположить, что отдельные топливные элементы подключены параллельно. То есть напряжение сборки топливных элементов совпадает с напряжением каждой отдельной ячейки, а ток сборки топливных элементов равен току отдельной ячейки, умноженному на число ячеек.

Мощность (Р) является произведением напряжения (U) и тока (I):

$$P = I \cdot U$$

Примем, что твердо-полимерный топливный элемент имеет КПД примерно 57%. Тогда из 1 кг водорода можно получить выходную мощность 18,8 кВт постоянного тока. С учетом КПД преобразования постоянного тока в переменный 95% это значение составит 17,9 кВт.

Основываясь на данных производителя, электромобиль Tesla 3 расходует электроэнергию 17 кВт·ч на 100 км. Таким образом, с учетом проведенных расчетов, можно утверждать, что водородный легковой автомобиль с электрическими характеристиками как у Tesla 3, сможет проехать на 1 кг водорода около 100 км. Этот результат подтверждается данными производителей водородного автотранспорта, представленными в табл. 1.

Стоимость электроэнергии на «быстрой» электрозаправке для электромобиля Tesla 3 составляет за 2,5 евро в Европе и 153 рубля в России на 100 км пути.

Для двигателей внутреннего сгорания на дизельном топливе расход легковых автомобилей в среднем составляет 5 л/100 км. В России затраты на 100 км пути находятся на уровне 235 рублей, а в Европе – 7 евро.

Для двигателей внутреннего сгорания на бензине расход легковых автомобилей в среднем составляет 10 л/100 км. В России затраты на 100 км пути находятся на уровне 450 рублей, а в Европе – 14 евро.



Рыночная стоимость «электролизного» водорода в Европе сейчас составляет около 9 евро за килограмм на 100 км пробега. Если АЗС работает на водороде, полученном каталитическим риформингом с доочисткой, стоимость его составляет около 2 евро/кг.

Нужно учитывать, что КПД водородного автомобиля составляет 55-60%, бензинового 35-40%, электромобиля – 94%.

Таблица 1

Технические характеристики водородного автотранспорта [18, 19]

Марка	Расход водорода на 100 км	Запас хода, км	Мощность, кВт ТЭ/АБ	Водородный баллон
<b>Легковые автомобили</b>				
<i>Toyota Mirai</i>	0,75 кг	500	114/	5 кг, 700 атм
<i>Honda Clarity</i>	0,85 кг	700	100/130	4 кг, 350 атм
<i>Ford Airstream</i>	0,9 кг	485	128(общая)	4,5 кг, 350 атм
<b>Грузовые автомобили</b>				
<i>Canadian Hydrogenics</i>	7 кг	500	270/22	33 кг, 345,4 атм
<i>Energon Hydrogen</i>	нет данных	700	260/80	нет данных
<i>Hino Profia</i>	8 кг	600	240/80	45 кг, 690 атм
<b>Автобусы</b>				
<i>Toyota Sora</i>	16,8	200	225(общая)	33,6 кг, 690 атм
<i>CDK6900CEFCV</i>	9,4	500	150(общая)	47 кг
<i>Urbino 12</i>	10,5	350	125(общая)	36,8 кг, 250 атм
<b>Мотоциклы, велосипеды</b>				
<i>Alpha 2.0</i>	0,056	100	0,25(общая)	0,056 кг, 350 атм
<i>Linde Group H2 bike</i>	0,034	100	0,25(общая)	0,034 кг, 350 атм
<i>Suzuki Burgman Hydrogen</i>	нет данных	350	1,77(общая)	700 атм

1 кВт = 1,36 л.с.

### Результаты

По результатам проведенных расчетов показано, что наиболее экономичными по затратам на заправку в настоящий момент являются электромобили на аккумуляторных батареях.

Гибридные автомобили на топливных элементах с аккумуляторными батареями потребляют малое количество топлива, примерно 1 кг водорода на 100 км пути. Однако, высокая стоимость чистого водорода ставит такой автотранспорт по затратам на один уровень с двигателями внутреннего сгорания в Европе. Для условий России стоимость водорода пока значительно выше в сравнении с другими видами топлива.

Если сравнивать автомобили на электрохимических технологиях в целом с традиционными авто на органическом топливе с двигателями внутреннего сгорания, то уже сейчас, помимо известных экологических, очевидны их экономические преимущества. Особенно это ощутимо в европейских странах в связи с политикой ценообразования на органическое топливо и электроэнергию.

### Заключение

Электрохимические технологии является многообещающим решением для декарбонизации энергетической мировой политики и экономики. В свою очередь, ожидаемый рост выбросов парниковых газов и сильная зависимость от ископаемых источников энергии становятся вескими причинами для перехода к новым альтернативам и стимулом для промышленных субъектов инвестировать в технологии «зеленой» энергии.

Сегодня комбинации различных электрохимических способов получения энергии на автотранспорте обладают рядом неоспоримых преимуществ, включающих высокие экологические показатели, низкие расходы топлива, высокую энергоемкость водорода, быструю заправку, достаточный запас хода и высокую мощность, и в экономическом плане «догоняют» традиционные технологии получения энергии в двигателях внутреннего сгорания на органическом топливе, особенно в странах Евросоюза.

Кроме того, для успешного развития экологичных транспортных технологий необходима развитая инфраструктура, которая работает на тех же принципах электрохимических процессов. Твердо-полимерные электролизеры, производящие водород на автозаправочных станциях, имеют те же материалы и используют те же технологии, что и твердо-полимерные топливные элементы, утилизирующие этот водород и превращающие его в энергию для автотранспорта. С этой позиции, имеются реальные предпосылки для

снижения стоимости производства электромобилей и сопутствующей инфраструктуры в связи с определенной унификацией и масштабированием производства.

### Литература

1. Andrews J., Shabani B. The role of hydrogen in a global sustainable energy strategy // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. 2014. № 3. pp. 474–489.
2. Ball M., Weeda M. The hydrogen economy – Vision or reality? // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. № 40. pp. 7903–7919.
3. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане / Известия вузов. Проблемы энергетики. №6-2020 С.79-91
4. Acar C., Dincer I. The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming // International Journal of Hydrogen Energy. 2018.
5. Köhler J., Wietschel M., Whitmarsh L., Keles D., Schade W. Infrastructure investment for a transition to hydrogen automobiles // Technological Forecasting and Social Change. 2010. № 77. pp.1237–1248.
6. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Куличихин В.В. Современные направления развития водородных энергетических технологий // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т.12. №2. С. 89-96.
7. Campiñez-Romero S., Colmenar-Santos A., Pérez-Molina C., Mur-Pérez F. A hydrogen refuelling stations infrastructure deployment for cities supported on fuel cell taxi roll-out // Energy. 2018. №148. pp. 1018–1031.
8. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal / International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2020.
9. Fischer D., Kaufmann F., Selinger-Lutz O., Voglstätter C. Power-to-gas in a smart city context - Influence of network restrictions and possible solutions using on-site storage and model predictive controls // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. №43. pp. 9483–9494.
10. Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies // Catalysis Today. 2009. №139. pp. 244–260.
11. Lee J.H., Skala G.W. Cooling system for a fuel cell stack. U.S. Patent. 2002. № 6.866.955.
12. RU 2455394 Глухих И.Н., Челябин В.Ф., Щербаков А.Н. Электролизная система заправки водородом, работающая при высоком давлении, и способ ее эксплуатации
13. Maus S., Napke J., Ranong C.N., Wüchner E., Friedlmeier G., Wenger D. Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks // International Journal of Hydrogen Energy. 2008. №33. pp. 4612–4621.
14. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005. 280 с.
15. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. 2018. Third ed. New York, NY: CRC Press.
16. Barbir F. PEM fuel cells: Theory and practice. 2013. San Diego, CA: Academic Press.
17. Dicks A.L., Rand D.A.J. Fuel cell systems explained. 2018. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
18. Chang W.C., Huang A.Y.J., Huang D.R., Chen T.Y. An economic evaluation on the purification and storage of waste hydrogen for the use of fuel cell scooters // International Journal of Green Energy. 2016. №13. pp. 1608–1614.
19. Alavi F., Lee E., van de Wouw N., De Schutter B., Lukszo Z. Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks // Applied energy. 2017. № 192. pp. 296–304.

### Авторы публикации

**Филимонова Антонина Андреевна** – канд. мед. наук, доцент кафедры, Казанский государственный энергетический университет.

**Чичиров Андрей Александрович** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика», Казанский государственный энергетический университет.

**Чичирова Наталия Дмитриевна** – д-р химич. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

**Разакова Регина Иршатовна** – ассистент, Казанский государственный энергетический университет.

## References

1. Andrews J., Shabani B. The role of hydrogen in a global sustainable energy strategy // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. 2014. №3. P. 474–489.
2. Ball M., Weeda M. The hydrogen economy – Vision or reality? // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. №40. P. 7903–7919.
3. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Pechenkin A.V. Prospects for the development of hydrogen energy in Tatarstan / Energy problems. №6. 2020 P. 79-91.
4. Acar C., Dincer I. The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming // International Journal of Hydrogen Energy. 2018.
5. Köhler J., Wietschel M., Whitmarsh L., Keles D., Schade W. Infrastructure investment for a transition to hydrogen automobiles // Technological Forecasting and Social Change. 2010. №77. P.1237–1248.
6. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Kulichikhin V.V. Modern directions of development of hydrogen energy technologies // Reliability and safety of energy. 2019. V.12. №2. P. 89-96.
7. Campiñez-Romero S., Colmenar-Santos A., Pérez-Molina C., Mur-Pérez F. A hydrogen refuelling stations infrastructure deployment for cities supported on fuel cell taxi roll-out // Energy. 2018. №148. P. 1018–1031.
8. IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal / International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2020.
9. Fischer D., Kaufmann F., Selinger-Lutz O., Voglstätter C. Power-to-gas in a smart city context - Influence of network restrictions and possible solutions using on-site storage and model predictive controls // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. №43. P. 9483–9494.
10. Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies // Catalysis Today. 2009. №139. P. 244–260.
11. Lee J.H., Skala G.W. Cooling system for a fuel cell stack. U.S. Patent. 2002. №6.866.955.
12. RU 2455394 Glukhikh I.N., Chelyaev V.F., Shcherbakov A.N. Electrolysis hydrogen refueling system operating at high pressure and method of its operation. 2012.
13. Maus S., Hapke J., Ranong C.N., Wüchner E., Friedlmeier G., Wenger D. Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks // International Journal of Hydrogen Energy. 2008. №33. P. 4612–4621.
14. Korovin N.V. Fuel cells and electrochemical power plants. Moscow: MEI Publishing House, 2005. 280 p.
15. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. 2018. Third ed. New York, NY: CRC Press.
16. Barbir F. PEM fuel cells: Theory and practice. 2013. San Diego, CA: Academic Press.
17. Dicks A.L., Rand D.A.J. Fuel cell systems explained. 2018. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
18. Chang W.C., Huang A.Y.J., Huang D.R., Chen T.Y. An economic evaluation on the purification and storage of waste hydrogen for the use of fuel cell scooters // International Journal of Green Energy. 2016. №13. P. 1608–1614.
19. Alavi F., Lee E., van de Wouw N., De Schutter B., Lukszo Z. Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks // Applied energy. 2017. №192. P. 296–304.

## Authors of the publication

**Antonina A. Filimonova** - Kazan State Power Engineering University.

**Andrey A. Chichirov** - Kazan State Power Engineering University.

***Natalya D. Chichirova*** - Kazan State Power Engineering University.

***Regina I. Razakova*** - Kazan State Power Engineering University.

***Получено***

***24 марта 2021г.***

***Отредактировано***

***25 марта 2021г.***

***Принято***

***25 марта 2021г.***