



ТРАНСПОРТ: ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И АККУМУЛЯТОРЫ¹

В.Н. ФАТЕЕВ, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник
(НИЦ “Курчатовский институт”)

В.В. ТИШКИН, инженер-исследователь
(НИЦ “Курчатовский институт”)

Поступила в редакцию: 14.05.2026

Принята к публикации: 10.07.2026

В работе рассмотрены современные подходы к использованию водородных топливных элементов и аккумуляторов в транспортных средствах. Проведён сравнительный анализ различных типов топливных элементов, их рабочих характеристик и ограничений при применении в автотранспорте. Рассмотрены принципы работы и основные типы аккумуляторов, включая литий-ионные системы, а также их эксплуатационные характеристики. Показано, что, несмотря на высокий потенциал водородных технологий, на современном этапе аккумуляторные системы занимают лидирующие позиции благодаря развитой инфраструктуре и улучшенным характеристикам зарядки.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

В настоящее время продолжается конкуренция между водородными, включая топливные элементы (ТЭ), и аккумуляторными технологиями для транспорта и, в первую очередь, для автомобилей. Цель – снижение вредных выбросов. Для транспорта может быть использован не только электрохимический процесс генерации электроэнергии для электродвигателя, но и процесс сжигания водорода в двигателе внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) были разработаны достаточно давно, ещё в конце XVIII века, а в 1807 г. швейцарский изобретатель **Франсуа Исаак де Риваз** соорудил первый автомобиль, работавший на водороде. Он установил в самодвижущийся экипаж двигатель внутреннего сгорания, который работал на смеси газообразного водорода и кислорода. Возможно, были и другие первопроходцы.

Цель данного изобретения – поиск альтернативных источников топлива, а стоимость и массогабаритные характеристики водорода и всей водородной системы

не учитывались. В СССР в 1930-е гг. начались исследования по созданию ДВС с использованием водорода. В блокадном Ленинграде работали грузовики на водороде, который по предложению воентехника службы ПВО Б.И. Щелища доставляли из аэростатов (А.с. № 64209 от 21.09.1941 г.). Разработки получили дальнейшее развитие. В частности, компания BMW организовала мелкосерийное производство автомобилей с водородным двигателем. Среди подобных автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на водороде одним из наиболее известных является BMW Hydrogen 7 (рис. 1).

Мощность двигателя – 170 кВт (228 л.с.), пробег на водороде при одной заправке – около 300–350 км и около 700 км при дополнительном использовании бензина. Водород хранится в жидкой форме. Недостатком BMW Hydrogen 7, кроме высокой стоимости, является ограниченный запас хода на водороде. Автомобиль характеризуется низким уровнем выбросов, хотя и производит оксиды азота. Ориентировоч-

ная стоимость на момент выпуска в 2007 г. составляла около 100 000 евро (примерно 3.5 млн руб. по курсу того периода). В пересчёте на современные значения это соответствует примерно 9–11 млн руб.

Конкурентом водородных двигателей внутреннего сгорания являются топливные элементы, впервые созданные Уильямом Гроувом в 1839 г.



Рис. 1. BMW Hydrogen 7

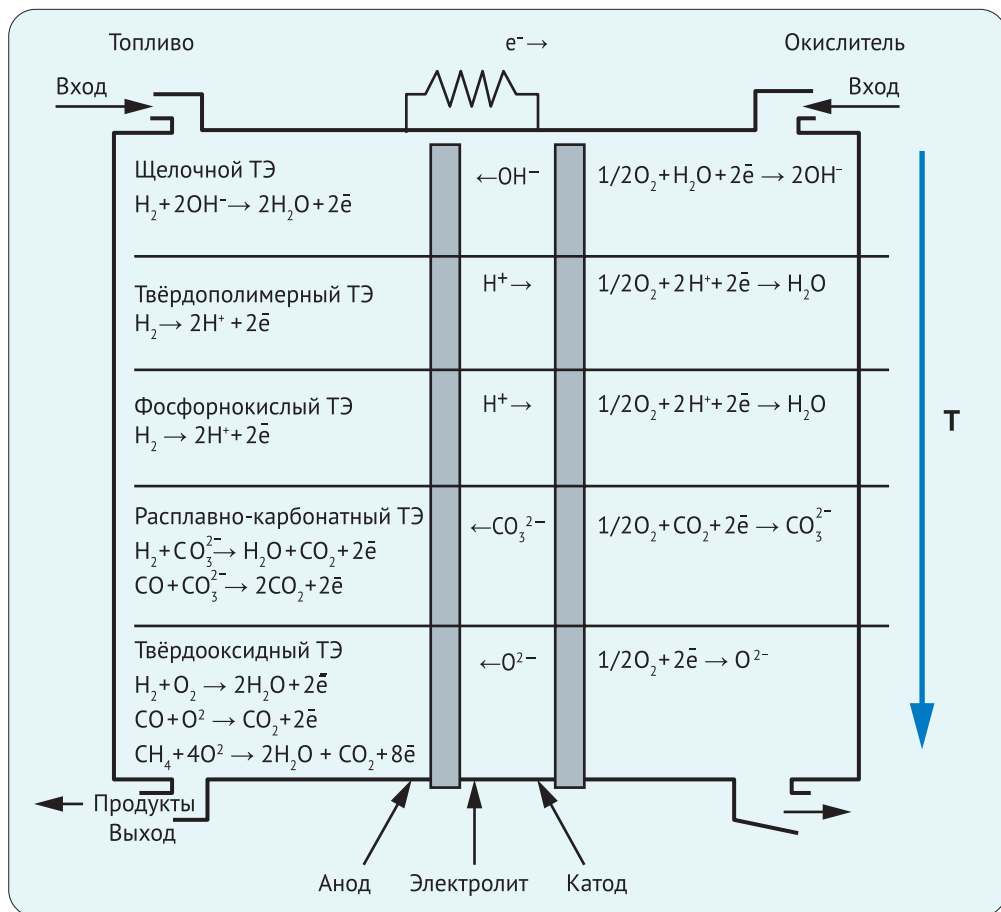


Рис. 2. Различные типы топливных элементов и протекающих в них реакций

Однако первое применение ТЭ на транспорте датируется 1959 г.: тогда компания Allis-Chalmers представила трактор на щелочных топливных элементах. В 1966 г. компания General Motors создала первый экспериментальный автомобиль на ТЭ – Electrovan.

Выделяют основные типы водородных ТЭ (рис. 2)². Жирным шрифтом представлен список ТЭ также

разрабатываемых/разработанных в России. Приведены типы топливных элементов, используемые электролиты и протекающие в них реакции. Стрелка справа указывает на изменение рабочей температуры ТЭ.

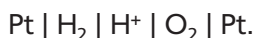
1. **Щелочные ТЭ.**
2. **Твёрдополимерные ТЭ.**
3. **Фосфорнокислые ТЭ.**
4. **Расплавно-карбонатные ТЭ.**
5. **Твёрдооксидные ТЭ.**

Для автомобильного транспорта не пригодны расплавно-карбонатные и твёрдооксидные ТЭ из-за высокой рабочей температуры (свыше

² Qasem N.A.A. A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications // International J. of Energy Research. 2024. Vol. 2024. Article ID7271748. DOI: 10.1155/2024/7271748

400 °С). Фосфорнокислые ТЭ также имеют излишне высокую рабочую температуру (около 200 °С) и оказались недостаточно эффективными для автомобильного транспорта. Наиболее перспективными являются щелочные ТЭ (электролит – раствор щелочи) и твёрдополимерные ТЭ (электролит – ионообменная мембрана), для которых оптимальная рабочая температура около 50–80 °С.

Однако при использовании воздуха в качестве окислителя у щелочных ТЭ возникает проблема, связанная с реакцией диоксида углерода (из воздуха) со щёлочью электролита и “разрушением” электролита. На данном этапе для автотранспорта рассматриваются в первую очередь твёрдополимерные ТЭ. Это ТЭ на основе перфторированной мембраны с функциональными сульфогруппами (–SO₃H). Проблему хранения и холодного пуска таких ТЭ при отрицательных температурах достаточно успешно решает ряд разработчиков, в частности используя добавки метанола к жидкой фазе и водороду³. Схематически топливный элемент с ТПЭ можно записать следующим образом:



Анодная реакция:



Катодная реакция:



Суммарная реакция:



Разность потенциалов (напряжение) при температуре 25 °С и давлении кислорода и водорода 1 бар $E = +1.229$ В.

Эти ТЭ имеют достаточно большой срок службы (более 5000 ч при стационарной работе, до 3000–4000 ч при применении на транспорте), хотя встречаются упоминания о достигнутых 60 000 ч при испытании единичной ячейки⁴. Они характеризуются быстрым пуском и маневренностью, но используют дорогие платиновые катализаторы (платина на углеродном носителе) и проблемой замерзания воды, необходимой для обеспечения хорошей проводимости мембраны. КПД достигает 45–60%, что выше КПД двигателя внутреннего сгорания (35–40%), а удельная мощность современных стеков ТЭ составляет порядка 1–2 кВт/кг (для самого стека), однако для всей энергоустановки этот показатель существенно ниже.

Первый серийный автомобиль на водородных ТЭ, запущенный в серийное коммерческое производство, был выпущен Toyota Mirai в 2014 г. (рис. 3). Максимальная мощность электродвигателя – 113 кВт (154 л.с.), а мощность стека ТЭ – 114 кВт. Запас хода на одной заправке – около 500 км (при запасе около 5 кг водорода в баках под давлением 700 бар). Удельная

³ Ivanova N.A., Spasov D.D., Grigoriev S.A., Kamyshtinsky R.A., Peters G.S., Mensharapov R.M., Seregina E.A., Millet P., Fateev V.N. On the influence of methanol addition on the performances of PEM fuel cells operated at subzero temperatures // *J. Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Issue 34. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.195; Ivanova N.A., Spasov D.D., Mensharapov R.M., Kukueva E.V., Zasyapkina A.A., Fateev V.N., Grigoriev S.A. Efficient and stable subzero operation of a PEM fuel cell with a composite anode using hydrogen-methanol composition during freeze/thaw cycles // *J. Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.298

⁴ Cleghorn S.J.C., Mayfield D.K., Moore D.A., Moore J.C., Rusch G., Sherman T.W., Sisofo N.T., Beuscher U. A polymer electrolyte fuel cell life test: 3 years of continuous operation // *J. of Power Sources*. 2006. Vol. 158. No. 1. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.09.062



Рис. 3. Toyota Mirai и стек ТЭ под капотом

мощность стека ТЭ первого поколения Toyota Mirai примерно 2 кВт/кг (3.1 кВт/л), что на момент выпуска – один из лучших показателей для серийных систем⁵. С учётом всей силовой установки (баки для хранения водорода, компрессор, буферная батарея и вспомогательные системы) удельная мощность снижается примерно до 470–510 Вт/кг, то есть примерно в 4 раза по сравнению с показателем стека в отдельности. Однако возможны другие варианты хранения водорода, например в жидком виде (данные по стеку ТЭ крайне актуальны). Рекомендованная розничная цена при запуске в Японии (декабрь 2014 г.) составляла около 7.2 млн иен (~57 500 долл. США), что по курсу того периода – примерно 3.5–4.0 млн руб.

Наряду с водородными ТЭ на транспорте применяются аккумуляторы – вторичные (перезаряжаемые) химические источники тока. При разряде аккумулятора хими-

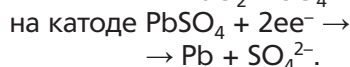
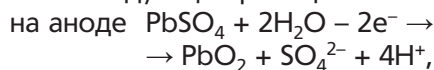
ческая энергия активных веществ, входящих в состав катода, анода и электролита, преобразуется в электрическую энергию. При заряде аккумулятора подводимая электрическая энергия расходуется на регенерацию продуктов разряда. Основные типы аккумуляторов представлены в табл., а их удельные массогабаритные характеристики – на рис. 4.

Неудачные характеристики имеет свинцово-серноокислый аккумулятор, изобретённый французским учёным Гастоном Планте в 1859 г. Электрохимическая ячейка может быть записана в виде:

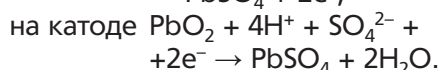
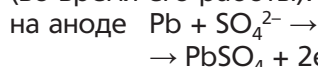


Напряжение элемента близко к 2.0 В.

При зарядке аккумулятора протекают следующие реакции:



При разрядке аккумулятора (во время его работы):



⁵ Konno N., Mizuno S., Nakaji H., Ishikawa Y. Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack. SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2015. Vol. 4, No. 1. P. 123–129. DOI: 10.4271/2015-01-1175

Таблица

Основные типы аккумуляторов и их характеристики
(максимально до 4.5 В для кобальтовых электродов)

Тип аккумулятора	Обозначение	Номинальное напряжение, В	Особенности
Свинцово-кислотный (серная кислота)	–	2.0	Низкая энергоёмкость, высокая масса
Никель-кадмиевый	NiCd	1.2	Долговечный, эффект памяти
Никель-металлгидридный	NiMH	1.2	Более экологичный
Литий-ионный	Li-ion	3.7	Высокая энергоёмкость
Литий-полимерный	Li-pol	3.6	Гибкая форма

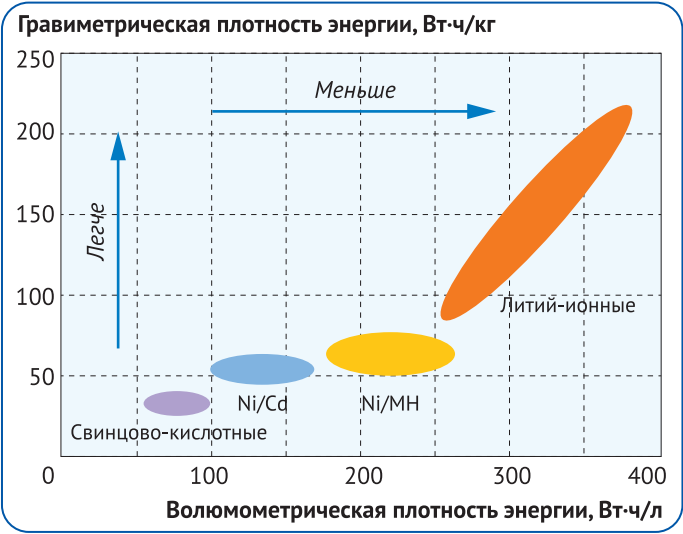


Рис. 4. Сравнение аккумуляторов по удельной гравиметрической и объёмной плотности энергии

Таким образом, при разряде оба электрода переходят в сульфат свинца PbSO_4 , а при заряде восстанавливаются до Pb и PbO_2 соответственно. Несмотря на крайне низкие удельные характеристики, он широко производится и используется в качестве стартерного ак-

кумулятора в связи с низкой стоимостью и устойчивостью к отрицательным температурам.

Однако в качестве компонентов энергоустановки в настоящее время преимущественно используются литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы. Электроды в аккумуляторах разделены пористым сепаратором, пропитанным электролитом – безводным раствором соли лития (как правило,

LiPF_6) в органическом растворителе, что исключает побочные реакции с водой. При заряде на положительном электроде протекает реакция: $\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + x\text{e}^-$, а на отрицательном электроде: $\text{C} + x\text{Li}^+ + x\text{e}^- \rightarrow \text{CLi}^x$, где x – степень интер-

калий⁶. На схеме (рис. 5) представлен наиболее типичный графитовый электрод, то есть литий внедряется в углерод. При разряде процессы идут в обратном направлении: происходит деинтеркаляция (извлечение) ионов лития из углеродного материала на отрицательном электроде и интеркаляция ионов лития в оксид на положительном электроде: $\text{CLi}^x \rightarrow \text{C} + x\text{Li}^+ + xe^-$ (отрицательный электрод), $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^- \rightarrow \text{LiCoO}_2$ (положительный электрод).

Следовательно, во всей системе отсутствует металлический (нуль-валентный) литий, а процессы заряда и разряда сводятся к переносу ионов лития с одного электрода на другой – отсюда и название “литий-ионные”. Отсутствие металлического лития существенно снижает пожаро- и взрывоопасность аккумулятора при соблюдении рекомендуемых режимов зарядки и разрядки (рис. 5). Удельная энергия составляет около 200–300 Вт · ч/кг.

Таким образом, аккумуляторы и водородные ТЭ имеют сопоставимые и достаточно высокие характеристики. Применительно к автотранспорту первоначально лидировали топливные элементы, которые использовались в различных автомобилях и автобусах (в том числе в экспериментально-демонстра-

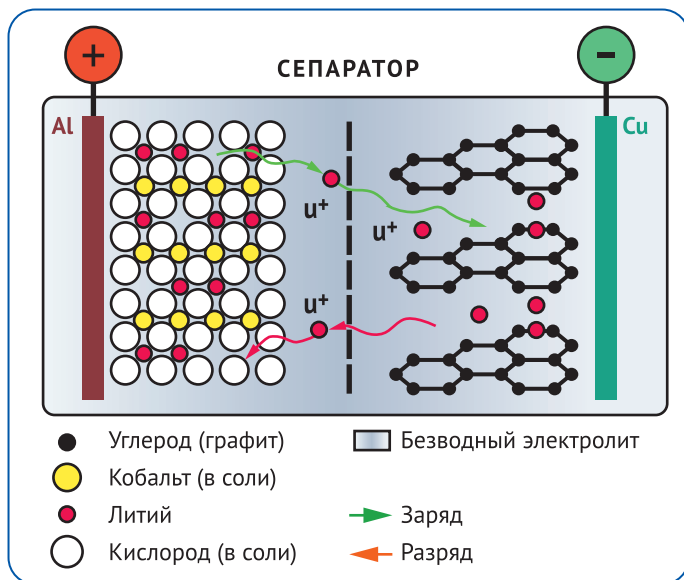


Рис. 5. Схема процессов зарядки и разрядки литий-ионного аккумулятора с графитовым электродом

ционных образцах “Нива”), что было обусловлено продолжительным временем зарядки имевшихся литий-ионных аккумуляторов. Причиной такого периода зарядки были ограничения, связанные с риском образования дендритов лития, ведущим к короткому замыканию, перегреву и деградации графитового электрода при высоких токах зарядки. Однако интенсивные работы по созданию альтернативных электродов (из кремния, LiFePO_4 , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ и др.) позволили решить эту проблему. С учётом того, что время зарядки сократилось в разы – современные литий-ионные аккумуляторы с электродами LiFePO_4 и $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ способны заряжаться до 80% ёмкости за 20–30 мин при быстрой зарядке против 6–8 ч у первого поколения графитовых систем. Аккумуляторы стали выходить на лидирующие позиции. Ресурс работы, определяющийся числом циклов зарядки – разрядки

⁶ Интеркаляция – обратимое включение молекулы или группы между другими молекулами или группами.



Рис. 6. Тесла модель Y

составляет более 2000 циклов или более 5 лет⁷. Единственной проблемой оставалось падение уровня заряда при отрицательных температурах, что решалось за счёт оптимизации состава электродов и электролита. Электробусы, разъезжающие по Москве, по-видимому, вместо графитового электрода имеют оксидные электроды; точный состав не раскрывается – это секрет китайской фирмы-производителя. Одним из последних достижений является автомобиль Тесла модель Y (рис. 6) с мощностью двигателя 450 л.с. (331 кВт), с аккумуляторами, обеспечивающими 719 км пробега на одной зарядке (2025 г. выпуска, стоимостью 7.7 млн руб).

Теперь уже аккумуляторы вышли на лидирующие позиции, которые вряд ли уступят. Лидерство обусловлено тем, что для транспорта на топливных элементах необходима инфраструктура водородной заправки,

включающая и транспорт водорода от производителей на станции заправки. Создание такой структуры “с нуля” на данном этапе нереально, а “заправка” током может легко быть организована везде, где есть электроэнергия. Таким образом, на уровне автотранспорта есть определённое преимущество автомобилей на аккумуляторах.

Заключение

Водородные топливные элементы и литий-ионные аккумуляторы – перспективные источники энергии для транспорта. Топливные элементы обладают высокой экологичностью, большим запасом хода и малым временем заправки водородом (3–5 мин), однако требуют создания специализированной инфраструктуры производства, транспортировки, хранения и заправки водорода. Литий-ионные аккумуляторы благодаря разработке новых электродов и технологий быстрой зарядки в настоящее время занимают лидирующие позиции в автомобильном транспорте. Дальнейшее развитие водородных ТЭ связано прежде всего со снижением содержания платины в катализаторах, повышением ресурса и решением проблемы холодного пуска, тогда как для аккумуляторных систем основные направления – увеличение удельной энергии, сокращение времени зарядки и повышение эффективности работы при отрицательных температурах.

⁷ новая наука: проблемы и перспективы // Международное научное периодическое издание (по итогам Международной научно-практической конференции 26 февраля 2017 г.)