

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-139224>

Метаанализ; Оригинальное исследование



# История научных исследований транспортных средств с водородными энергетическими установками

В.Р. Анисимов<sup>1, 2</sup>, А.В. Климов<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Инновационный центр «КАМАЗ», Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Топливные элементы являются одним из перспективных направлений в развитии электрифицированного транспорта благодаря возможности обеспечения пробега, сопоставимого с традиционными транспортными средствами (ТС), работающими на двигателях внутреннего сгорания (ДВС), при отсутствии вредных выбросов в окружающую среду во время движения ТС. Продолжительный процесс развития топливных элементов был связан с невозможностью реализации потенциала топливных элементов и наличием более доступных и надёжных в то время источников. Сегодняшние программы и меры поддержки электротранспорта и топливных элементов ставят перед собой задачу достижения целевых показателей в области сокращения выбросов вредных газов и увеличения доли электромобилей на дорогах.

**Цель работы** — изучение истории развития топливных элементов и их актуальности применения на транспортных средствах.

**Материалы и методы.** Расчёты по определению удельных параметров были выполнены методами решения дифференциального уравнения силового баланса движения транспортного средства, с помощью численного метода Эйлера.

**Результаты.** Результатами научного исследования является определение удельных параметров энергоустановок и проведение анализа истории развития топливных элементов. Путём сравнения удельных параметров было выявлено, что наиболее эффективными являются комбинированные энергоустановки на топливных элементах. При использовании таких энергоустановок было зафиксировано снижение массы в 2,5 раза по сравнению с другими типами энергоустановок.

**Заключение.** Применение топливных элементов позволяет снизить массу энергоустановки и повысить экологическую безопасность транспортного средства. Топливные элементы прошли несколько продолжительных этапов развития и достигли пика своего развития после начала активного освоения космоса. В настоящий момент, развитие водородных технологий активно продолжается, были выпущены программы развития электрифицированного транспорта во многих странах, в том числе и в Российской Федерации. Авторы отмечают актуальность проведения научных исследований в данной области и предполагают, что транспортные средства, работающие на электрохимических генераторах, получат своё дальнейшее развитие в ближайшие годы.

**Ключевые слова:** электрохимический генератор; топливные элементы; водородное топливо; история научных исследований; транспортные средства; электрифицированный транспорт.

## Как цитировать:

Анисимов В.Р., Климов А.В. История научных исследований транспортных средств с водородными энергетическими установками // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 2. С. 127–136. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-139224>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-139224>

Meta-Analysis; Original Study Article

# History of the scientific researches of the vehicles with hydrogen power units

Viktor R. Anisimov<sup>1,2</sup>, Alexander V. Klimov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Fuel cells are one of the promising directions in the development of electrified transport as it is capable of providing with mileage comparable to conventional vehicles powered by internal combustion engines, with no harmful emissions into the environment during the vehicle motion. The long-lasting process of development of fuel cells was associated with the inability to realize the potential of fuel cells and the availability of more accessible and reliable energy sources at that time. The present programs and measures to support electric vehicles and fuel cells set targets for reducing emissions of harmful gases and increasing the share of electric vehicles on the roads.

**AIMS:** The study of the history of the development of fuel cells and their relevance to the use in vehicles.

**METHODS:** The calculations to determine the specific parameters were performed with solving the differential equation of the force balance of vehicle motion using the numerical Euler method.

**RESULTS:** The results of the scientific research are the determination of specific parameters of power units and the analysis of the history of the development of fuel cells. By comparing the specific parameters, it was revealed that the most effective are combined power units on fuel cells. When using these power units, a 2.5-fold decrease in mass was recorded compared to other types of power units.

**CONCLUSIONS:** The use of fuel cells helps to reduce the weight of the power units and to improve the environmental safety of the vehicle. Fuel cells have undergone several long stages of development and reached their peak of development after the beginning of active space exploration. Currently, the development of hydrogen technologies is actively continuing, programs for the development of electrified transport have been issued in many countries, including the Russian Federation. The authors note the relevance of scientific research in this area and assume that vehicles powered by electrochemical generators will receive their further development in the coming years.

**Keywords:** *electrochemical generator; fuel cells; hydrogen fuel; history of the scientific researches; vehicles; electric vehicles.*

## To cite this article:

Anisimov VR, Klimov AV. History of the scientific researches of the vehicles with hydrogen power units. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(2):127–136. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-139224>

Received: 27.01.2023

Accepted: 01.06.2023

Published: 15.07.2023

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мировая климатическая ситуация, вызванная глобальным потеплением и увеличением содержания парниковых газов в атмосфере, задаёт тренд научно-технического развития в области энергетики и промышленности в сторону экологически чистых технологий. На 2019 год мировой парк колёсных транспортных средств (ТС) насчитывает около 1,5 миллиарда автомобилей [1]. В среднем в мире на 1000 человек приходится около 180 ТС. В развивающихся странах количество ТС на 1000 человек стремительно растёт, и уже сейчас в США на 1000 человек приходится более 800 автомобилей [1]. Такой стремительный рост количества ТС приводит к тому, что в крупных городах наблюдается рост содержания вредных загрязняющих веществ в воздухе. В связи с этим многие страны создают программы поддержки развития электрифицированных транспортных средств (ЭТС), которые способствуют переходу к экологическому чистому транспорту.

Первые топливные элементы (ТЭ) были уже известны в начале 19 века, но их развитие происходило с большими временными разрывами между историческими периодами. Это связано прежде всего с тем, что ТЭ очень долго не находили практического применения. Активное их развитие началось благодаря освоению космоса. Первыми ТЭ, нашедшими практическое применение, были щелочные топливные элементы. При освоении космоса они зарекомендовали себя как надёжный источник энергии и воды для космонавтов. Дальнейшее развитие ТЭ связано с энергетическим кризисом и со стремительным ростом содержания вредных выбросов в атмосфере. Ряд стран, в том числе и Россия, разработали программы поддержки чистых экологических источников энергии на несколько лет, что способствует их активному освоению и изучению.

## РАСЧЁТ УДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Наиболее распространённым источником энергии на ЭТС является тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ). Такие ТС могут работать на чистой электрической энергии ТАБ — электрические транспортные средства, или использоваться совместно с другими источниками энергии — гибридные транспортные средства. Электрические ТС имеют ряд недостатков в сравнении с гибридными электрическими транспортными средствами: долгое время заряда и небольшой пробег. Такие ТС хорошо могут зарекомендовать себя в городских условиях эксплуатации при небольших пробегах. Другие транспортные средства — это гибридные ТС, использующие комбинированные энергоустановки (КЭУ). КЭУ состоят из основного источника энергии и второстепенного

источника энергии. Второстепенный источник энергии необходим для хранения энергии от рекуперативного торможения и реализации требуемой мощности при разгоне ТС. Второстепенными источниками могут быть ТАБ, маховик, конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС) и др. Наиболее распространённым второстепенным источником энергии являются ТАБ. В качестве основного источника энергии может использоваться двигатель внутреннего сгорания (ДВС) или электрохимические генераторные установки (ЭХГ). Основными преимуществами использования ЭХГ в сравнении с ДВС являются отсутствие содержания вредных выбросов в отработавших газах и использование в качестве топлива водорода, запасы которого в отличие от углеводородных топлив не ограничены. Использование ТАБ в составе КЭУ также позволяет повысить общую удельную энергоёмкость. Для определения удельной энергоёмкости различных топологий ТС был проведён расчёт движения пассажирского колёсного транспортного средства по циклу движения *Orange County Bus* [2].

Для определения мощности тягового электродвигателя рассмотрено уравнение тягового баланса ТС:

$$F_{\Sigma} = F_f + F_a + F_w, \quad (1)$$

где  $F_f$  — сила сопротивления качению, Н;  $F_a$  — сила сопротивления подъёму, Н;  $F_w$  — сила сопротивления воздушной среды, Н.

С учётом выполнения тягового баланса ТС и согласно второму закону Ньютона, сила движения  $F_d$  определяется по следующей формуле:

$$F_d = \frac{dV}{dt} \cdot m \cdot \delta + F_{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $V$  — скорость движения ТС, м/с;  $m$  — масса ТС, кг;  $\delta$  — коэффициент учёта вращающихся масс.

С учётом полученного значения тяговой силы по формуле (3) находится крутящий момент электродвигателя для движения ТС по циклу.

$$M = \frac{F_d \cdot r_{\text{ст}}}{U_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{тр}}$  — передаточное число трансмиссии;  $r_{\text{ст}}$  — статический радиус колеса, м;  $\eta_{\text{тр}}$  — КПД трансмиссии.

Частота вращения ТЭД определяется по следующей формуле:

$$n_{\text{ТЭД}} = \frac{60 \cdot V \cdot U_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ст}}}. \quad (4)$$

Электрическая мощность ТЭД для тягового режима:

$$P_{\text{тяг}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{тяг}} \cdot n}{60 \cdot \eta_{\text{тЭД}}}, \quad \text{при } M_{\text{тяг}} > 0. \quad (5)$$

Для режима рекуперации:

$$P_{\text{рекуп}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{рекуп}} \cdot n \cdot \eta_{\text{ТЭП}}}{60}, \quad \text{при } M_{\text{рекуп}} < 0, \quad (6)$$

где  $\eta_{\text{ТЭП}}$  — КПД тягового электропривода.

Для определения затрачиваемой энергии во время движения ТС по циклу необходимо проинтегрировать по времени полученные значения мощности:

$$E = \int_{t_0}^t (P_{\text{тяг}} + P_{\text{рекуп}} + P_{\text{всп. об}}) dt, \quad (7)$$

где  $P_{\text{всп. об}}$  — средняя мощность вспомогательного оборудования, Вт.

Полученное значение энергии за цикл должно полностью обеспечиваться основным источником энергии, в то время как вторичный источник энергии обеспечивает мгновенную мощность для поддержания тяговых характеристик ТС и рекуперацию энергии.

Для того, чтобы необходимое значение энергии обеспечивалось первичным источником энергии, его мощность на конец жизненного цикла должна быть

$$P_1 \geq E/t. \quad (8)$$

Тогда масса первичного источника энергии будет определяться как:

$$m_1 = P_1/\rho_1, \quad (9)$$

где  $\rho_1$  — значение удельной мощности первичного источника энергии (Вт/кг), определяется исходя из существующих статистических данных о значениях массы и мощности энергетических установок (табл. 1).

Масса топливного бака, необходимая для движения ТС по циклу, будет определяться по формуле:

$$m_f = \int_{t_0}^t g_f dt + \int_{t_0}^t g_f dt \cdot \rho_f, \quad (10)$$

где  $g_f$  — мгновенный расход топлива, г/с;  $\rho_f$  — удельная масса хранения топлива,  $\text{кг}_{\text{Me}}/\text{кг}_{\text{топл}}$  (см. табл. 1).

Масса вторичного источника энергии определяется исходя из требуемой максимальной мощности тягового

электродвигателя и мощности вспомогательного оборудования:

$$m_2 = \frac{P_{\text{ТЭД макс}} + P_{\text{всп. об. макс}} - P_1}{\rho_2}, \quad (11)$$

где  $\rho_2$  — удельная мощность вторичного источника энергии, Вт/кг;  $P_{\text{всп. об. макс}}$  — максимальная мощность вспомогательного оборудования, Вт;  $P_{\text{ТЭД макс}}$  — максимальная мощность тягового электродвигателя, Вт.

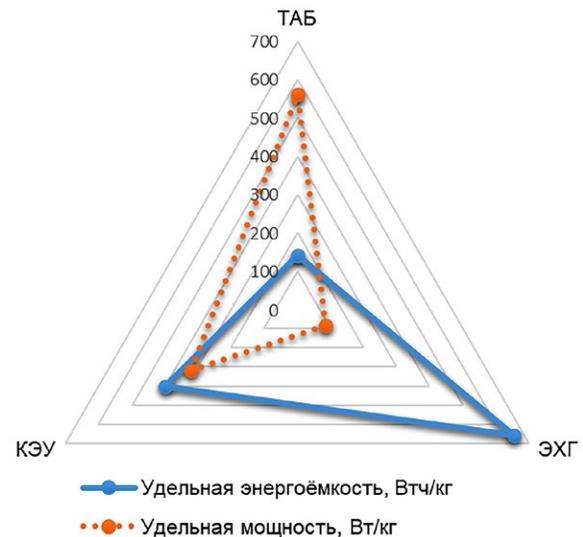
Исходя из вышеприведённых формул, можно найти значение энергоёмкости для КЭУ по формуле:

$$\rho_{\text{энерг. КЭУ}} = \frac{E}{m_1 + m_f + m_2}. \quad (12)$$

Аналогично, для удельной мощности КЭУ:

$$\rho_{\text{мощн. КЭУ}} = \frac{P_{\text{ТЭД макс}} + P_{\text{всп. об. макс}}}{m_1 + m_f + m_2}. \quad (13)$$

Удельные параметры, использованные для расчётов, были приняты исходя из анализа научных статей [3, 4] и представлены в табл. 1.



**Рис. 1.** Удельная энергоёмкость и мощность ТАБ и ЭХГ по отдельности и в составе КЭУ.

**Fig. 1.** Specific parameters for a traction battery and a fuel cell individually and being included to a combined power unit.

**Таблица 1.** Удельные параметры энергоустановок, использованные для расчётов

**Table 1.** Specific parameters of power units used for calculations

Параметр	Значение
Удельная масса хранения водородного топлива при давлении 350 бар, $\text{кг}_{\text{Me}}/\text{кг}_{\text{топл}}$	20
Удельная мощность ЭХГ без топливных баллонов, Вт/кг	500
Удельная мощность ТАБ, Вт/кг	560

Результаты расчётов представлены в виде лепестковой диаграммы на рис. 1. По результатам расчётов было выявлено, что энергоёмкость КЭУ выше, чем у ТАБ в 3 раза, а удельная мощность КЭУ, выше в 4 раза, чем у ЭХГ. При использовании ЭХГ как основного источника энергии масса энергоустановки составляет 2964 кг. При использовании ТАБ в качестве основного источника энергии для обеспечения требуемого пробега (без подзарядки в течении дня) необходима батарея ёмкостью 400 кВтч с массой 2857 кг. Сочетание ТАБ и ЭХГ в составе КЭУ позволяет снизить массу энергоустановки до 1060 кг, что примерно в 2.5 раза меньше по сравнению с использованием только одного источника энергии. Развитие топливных элементов находит всё большее развитие в современных научно-исследовательских работах из-за преимуществ, связанных с возможностью расширения пробега электрических транспортных средств и обеспечения отсутствия вредных выбросов.

Изучение истории вопроса применения водородного топлива на ТС позволяет понять пути развития и освоения водородных технологий, а также позволяет проанализировать взаимосвязь темпов развития технологий с ростом экологических и социальных проблем.

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРВЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Топливный элемент — гальваническая ячейка, вырабатывающая электроэнергию за счёт окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне [6]. Топливный элемент состоит из ионного проводника (электролита) и двух электронных проводников (электродов), находящихся в контакте с электролитом, который осуществляет перенос заряда ионами водорода. По типу электролита они классифицируются на щелочные, твёрдополимерные, фосфорнокислые, расплавкарбонатные и твёрдооксидные; по рабочей температуре — на низко-, средне- и высокотемпературные. Топливо и окислитель непрерывно подводятся к электродам — аноду и катоду, продукты (инертные компоненты и остатки окислителя, а также продукты окисления) непрерывно отводятся от них. Из молекулы водорода образуются два иона водорода и два электрона. На катоде водород соединяется с кислородом и возникает побочный продукт реакции — вода.

В 1839 г. Уильям Гров, британский юрист и учёный, разработал первый топливный элемент [5]. Открытие было обнаружено случайно во время проведения экспериментов по электролизу. Когда Уильям отделил батарею от электролизёра и соединил два электрода вместе, он обнаружил, что ток течёт в противоположном направлении, при этом расходуя газы водорода и кислорода.

Он назвал данное устройство газовой батареей [6]. Его газовая батарея состояла из платиновых электродов, помещённых в пробирки с водородом и кислородом, погружённые в ванну с разбавленной серной кислотой. В 1842 г. Гров последовательно соединил несколько газовых батарей, чтобы сформировать газовую цепь. Он использовал электричество, полученное из газовой цепи, для питания электролизёра, расщепляющего воду на водород и кислород [7]. Однако из-за проблем с коррозией электродов и нестабильности материалов топливный элемент Грова не был практичным, и в результате этого на протяжении многих лет никто не проводил дальнейших исследований топливных элементов.

В 1893 г. Фридрих Вильгельм Оствальд экспериментально установил взаимосвязь различных компонентов топливного элемента: электродов, электролита, окислителей и восстановителей, анионов и катионов [8]. Оствальд благодаря своей новаторской работе, связанной с физическими и химическими реакциями в топливных элементах, решил загадку газовой батареи Грова. Его исследования по химии топливных элементов стали основой для дальнейших исследований в этой области [9].

Монд и Лангер первыми усовершенствовали ячейку Грова [10]. Электроды были пористыми и имели трёхмерную форму, тем самым создавая структуру топливных элементов нового поколения. С увеличением популярности угля как топлива Монд и Лангер поняли, что его можно использовать для производства водорода для ТЭ. Монд, Лангер и Оствальд считали, что водород может стать таким же обычным топливом, как уголь, и что двадцатый век станет началом так называемой эры электрохимических топливных элементов.

В 1930-х годах был достигнут заметный прогресс в исследованиях ТЭ благодаря инженеру-химику из Кембриджского университета Томасу Фрэнсису Бэкону. Он был первым инженером, кому удалось разработать ТЭ, имеющий практическое применение. ТЭ преобразовывал воздух и водород непосредственно в электричество через электрохимические процессы. Бэкон начал свою работу с исследования щелочных ТЭ. В 1939 г. он построил электролизёр с никелевыми электродами, работающими при высоком давлении (200 бар), чтобы электролит не заливал поры электродов. Во время Второй мировой войны Бэкон разработал ТЭ для использования на подводных лодках Королевского флота. В 1958 г. он представил Британской национальной исследовательской корпорации щелочной ТЭ с электродами диаметром 25,4 мм. Несмотря на свою высокую стоимость, ТЭ Бэкона оказались достаточно надёжными, чтобы привлечь внимание *Pratt & Whitney*, компании, которая приобрела патент на работу Бэкона, касающуюся ТЭ, используемого в космическом корабле «Аполлон». В 1959 г. при поддержке компании *Marshall Aerospace* он представил батарею ТЭ (БТЭ), состоящую из 40 ячеек и имеющую эффективность 60% при выходной мощности 5 кВт.

## ПЕРВЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Упоминания о первых повсеместных практических использованиях ТЭ берут начало от разработок космических аппаратов. Причём исторически сложилось так, что первые ТЭ, которые удалось применить, были выполнены с жидким щелочным электролитом, и они проявили себя во времена активного освоения космоса. Применение ТЭ в космической отрасли имеет большое преимущество над применением обычных батарей в том, что они производили в несколько раз больше энергии на единицу массы. В 1960-х годах компания *International Fuel Cells* разработала силовую установку на топливных элементах для космического корабля «Аполлон». Данные топливные элементы обеспечивали экипаж корабля электричеством и питьевой водой во время полёта на Луну. Мощность данной энергоустановки составляет 12 кВт. Работа данных энергоустановок в миссиях «Аполлон» является показателем высокого технологического прогресса для того времени, во время миссий было выполнено более 10 000 часов без единого отказа.

В 1970-х годах *International Fuel Cells* разработала более мощный щелочной ТЭ для орбитального корабля NASA Space Shuttle [11]. На космическом шаттле нет резервных батарей, поэтому силовые установки на ТЭ должны были быть очень надёжными. Водородная установка питается водородом и кислородом из криогенных резервуаров и выдаёт 16 кВт в течение коротких периодов времени.

В 1971 г. появилась первая отечественная энергоустановка на топливных элементах «Волна». Она была способна работать в течение 1000 ч и выдавала один киловатт мощности при напряжении 27 В, масса установки составляла 60 кг. Следующий щелочной ТЭ, на сей раз для «Бурана», начали разрабатывать в 1978 году. Через десять лет появился элемент «Фотон» с ресурсом 2000 ч и мощностью 10 кВт. Эта разработка аналогична производимому компанией *International Fuel Cell* ТЭ для корабля NASA Space Shuttle.

Позже, в 2001 г., энергоустановка на основе ТЭ «Фотон» была применена на «АНТЭЛ-1» [12]. Энергоустановка с топливными баллонами занимала весь объём багажного отделения автомобиля. В багажнике располагались электрохимический генератор, баллоны с водородным топливом на 60 литров и баллоны с кислородом на 36 литров. В моторном отсеке установлены система управления, тяговый электродвигатель и стартовый аккумулятор. Запас хода ТС составляет 200 км. Основными недостатками данного ТС являются большая снаряжённая масса ТС по сравнению с базовой версией и отсутствие пространства под багажное отделение. Работа с «АНТЭЛ-1» показала, что мощности ТЭ было

недостаточно для быстрого разгона ТС и для этого был применён буферный источник энергии — в виде аккумулятораной батареи.

В 2003 году было разработано новое транспортное средство «АНТЭЛ-2» на базе ВАЗ-2111. Оно было избавлено от некоторых недостатков «АНТЭЛ-1». В нём применялся новый специально разработанный щелочной электрохимический генератор. Для снабжения ТЭ кислородом в данном ЭХГ использовался очищенный от углекислых газов атмосферный воздух, что позволило избавиться от баллонов с чистым кислородом. Благодаря такому техническому решению удалось сохранить не только потребительские свойства транспортного средства, но и увеличить пробег ТС до 350 км.

В 1959 г. группа под руководством Гарри Ирига построила БТЭ мощностью 15 кВт для трактора *Allis-Chalmers*. ТЭ состоит из 1008 ячеек по 1 В на каждую. В качестве топлива использовалась смесь газов, в основном пропан и сжатый водород, а в качестве окислителя выступал кислород [13].

Недостаток щелочного электролита в том, что щёлочь взаимодействует с углекислым газом и образуются нерастворимые в щелочной среде карбонаты. При отравлении щелочного ТЭ двуокись углерода реагирует с гидроксид-ионом в электролите с образованием карбоната, тем самым снижая концентрацию гидроксид-иона в электролите, что снижает общую эффективность топливного элемента.

Кроме того, у жидких и щелочных электролитов есть ещё один недостаток — это образование воды как на внешней, так и на внутренней поверхности электрода, которая разбавляет сам электролит.

Из-за перечисленных недостатков щелочные топливные элементы являются не самым эффективным решением для наземных транспортных средств, и инженеры сосредоточились на разработке не щелочных электролитов. Одним из таких типов являются ТЭ с протонно-обменной мембранной. Основными преимуществами ТЭ с протонно-обменной мембраной по сравнению с другими типами ТЭ являются наивысшие удельные характеристики, низкие рабочие температуры (до 100 °С), лучший динамический отклик, отсутствие отравления углекислым газом, твердый электролит уменьшает риск коррозии. Данные преимущества нашли своё применение в наземных транспортных средствах, поэтому их активное развитие связано с развитием транспортной отрасли.

В начале 1960-х *General Electric* совершила значительный прорыв в технологии ТЭ: благодаря работе Томаса Грабба и Леонарда Нидраха компания изобрела и разработала первый топливный элемент с протонно-обменной мембранной. Первоначально он был разработан в рамках государственной программы с военно-морским флотом США и военным центром управления для обеспечения портативного питания персонала в полевых условиях.

Привлечённое возможностью использования топливного элемента в миссиях «Аполлон» NASA проверило его потенциал для обеспечения вспомогательной энергии на борту космического корабля «Джемини». Космическая программа «Джемини» состояла из 12 полётов в рамках подготовки к полётам Аполлона на Луну. К сожалению, топливный элемент перед запуском столкнулся с техническими трудностями, в том числе с утечкой кислорода через мембрану, в результате чего первые четыре миссии выполнялись на батареях.

Топливная ячейка была модернизирована, и новая модель P3 успешно работала в миссиях «Джемини» с 6-й по 12-ю. Энергоустановка на топливных элементах «Джемини» состояла из двух секций батарей на топливных элементах, каждая из которых способна производить максимальную мощность около 1 кВт.

Ещё одним ограничением топливного элемента для «Джемини» в то время было большое количество платины, необходимой в качестве катализатора на электродах. Стоимость ТЭ с протонно-обменной мембранной была высокой, что ограничивало их использованием в космических операциях.

В 1979 г. Джеффри Баллард, Кит Пратер и Пол Ховард основали компанию *Ballard Power Systems*. В начале 1980-х Баллард взял заброшенный топливный элемент «Джемини», срок действия патентов которого истёк, и начал искать способы повысить его мощность и построить его из более дешёвых материалов.

Работая по контракту с Министерством национальной обороны Канады, Баллард разработал топливные элементы со значительным увеличением удельной мощности при одновременном снижении используемого количества платины. В результате этих разработок было признано, что топливные элементы можно сделать меньше, мощнее и дешевле для практического использования не только в космических целях, но и на наземном транспорте.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В конце 1990-х гг. в мире стартовал ряд крупных международных и национальных программ, ориентированных на коммерциализацию научно-технических разработок по водородным технологиям, топливным элементам, возобновляемым источникам энергии и ряду других направлений, конечной целью которых является реализация концепции водородных энерготехнологических систем [4]. Помимо государственных и неправительственных общественных организаций, работы в области водородных технологий спонсируются рядом коммерческих структур, главным образом, крупными автомобильными компаниями. Основным стимулом развития водородных технологий в настоящее время является

финансовая и политическая поддержка работ в данном направлении, осуществляемая на уровне правительства и координируемая соответствующими межгосударственными соглашениями.

Наиболее крупным комплексным планом развития работ в области водородных технологий на североамериканском континенте является программа Департамента энергетики США (DOE) «Водород, топливные элементы и технологии инфраструктуры», принятая в 1999 г. Основной мотивацией является снижение зависимости США от импорта сырой нефти, 2/3 которой потребляется автотранспортом. Поэтому основной упор делается на широкомасштабное использование водорода в транспортном секторе. С данным направлением также тесно связаны принятые в 2002 г. проекты модернизации автотранспорта: «Водородная инициатива» Президента США и программа *Freedom CAR*. Финансирование и координация указанных проектов осуществляются DOE совместно с крупнейшими автомобильными компаниями США: *Daimler Chrysler Corp.*, *Ford Motor Co.* и *General Motors Corp.*

Основные работы, ведущиеся в Японии в области водородных технологий и топливных элементов, курируются Министерством экономики, торговли и промышленности (METI). Работы главным образом направлены на создание инфраструктуры и широкое внедрение стационарных энергоустановок на ТЭ и на перевод автотранспорта на водородное топливо и ТЭ. Программа METI предусматривает увеличение суммарной мощности стационарных энергоустановок на ТЭ с 2,2 ГВт в 2010 г. до 10 ГВт в 2020 г. и 12,5 ГВт в 2030 г.

Начало широкомасштабной активности ЕС в области водородных технологий можно отнести к 1999–2001 гг., когда была создана Европейская тематическая сеть по водородной энергетике (*H<sub>2</sub>-Net*). Данная группа объединяет представителей Европейской науки и промышленности, включая *Norsk Hydro*, *Shell Hydrogen*, *Air Products*, *BMW* и другие крупные компании. Основным направлением её деятельности является выработка единой стратегии развития водородной энергетике в странах Европы и внесение соответствующих предложений в официальные структуры ЕС.

Топливные элементы также стали привлекательными и для общественного транспорта. В 1997 году *Mercedes-Benz* представил свой первый водородный автобус под названием *Nebus*. Данный водородный автобус оснащен ТЭ мощностью 250 кВт и эксплуатировался более 540 часов в Норвегии и Германии. Представленный в том же году дизельный автобус *Mercedes-Benz Citaro* также получил модифицированную версию с ТЭ. Этот низкочелночный автобус был способен перевозить 60 пассажиров и оснащён 200 кВт энергетической установкой на ТЭ. *Citaro* был разработан при поддержке европейской программы *CUTE (Clean Urban Transport for Europe)*.

В настоящее время, начиная с 2020 года, мировая энергетика вступила в IV стадию энергоперехода, в которой ключевую роль играют возобновляемые источники энергии (ВИЭ), декарбонизация и использование водорода как нового первичного источника энергии [14]. Таким образом, необходим новый пакет мировых соглашений. Во многих странах, включая Японию, Германию и Китай, были разработаны новые национальные стратегии по водородной энергетике и топливным элементам, которые включали долгосрочные планы по созданию инфраструктуры водорода и продвижению топливных элементов в транспортной отрасли. В Китае, крупнейшем автомобильном рынке мира, правительство активно продвигает развитие транспорта на топливных элементах. В рамках государственной программы *Made in China 2025* ставится цель внедрения 1 миллиона автомобилей на водородных топливных элементах к 2030 году. Существуют и другие формы поддержки, например, в Европе Европейская комиссия в рамках инициативы *Clean Hydrogen Alliance* планирует инвестиции в водородные технологии порядка 430 миллиардов евро к 2030 году [15], что включает не только производство чистого водорода, но и развитие отраслей его применения, включая транспорт на ТЭ. В 2020 году Калифорнийское агентство по защите окружающей среды (CARB) внедрило программу *Zero Emission Bus Rule*, требующую, чтобы до 2029 года все новые автобусы общественного транспорта имели нулевые выбросы. В конце 2020 г. были представлены документы по достижению целей полной углеродной нейтральности к 2050 г. (Европейская водородная стратегия) [16]. На первом этапе стратегии до 2024 г. Европейская комиссия ставит цель установки электролизеров, использующих возобновляемые источники энергии, суммарной мощностью минимум 6 ГВт и производство 1 млн. тонн «зелёного» водорода, а также декарбонизацию существующего производства водорода, например, в химической промышленности. С 2025 по 2030 гг. мощность электролизеров должна достигнуть 40 ГВт, производство — 10 млн тонн возобновляемого водорода. Водород, по мнению Европейской комиссии, должен стать неотъемлемой частью интегрированной энергосистемы, использоваться в отраслях, где электрификация с использованием возобновляемых источников энергии невозможна, дороже или не так эффективна, например, в крупном транспорте, промышленности.

Наиболее важным документом по развитию концепции водородной энергетике в РФ является Распоряжение правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 года № 2162-р. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 г. ставит цели войти в мировые лидеры по производству водорода. Заявлены объемы производства водорода 0,2 млн. тонн к 2024 г., от 2 до 12 млн тонн к 2035 г., от 15 до 50 млн тонн к 2050 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было проведено исследование истории научного вопроса применения водородного топлива на транспортных средствах.

Результатом научного исследования является определение удельных параметров комбинированных энергоустановок на электрохимическом генераторе, удельных параметров тяговой батареи и удельных параметров электрохимического генератора. Путём сравнения удельных параметров было выявлено, что наиболее эффективными являются комбинированные энергоустановки. При использовании таких энергоустановок было зафиксировано снижение массы на 2,5 раза по сравнению с другими типами энергоустановок.

В статье был проведён анализ разработок, связанных с ТЭ, и было выяснено, что ТЭ с щелочным электролитом обладают рядом преимуществ перед аккумуляторными батареями, что подтолкнуло учёных к разработке топливного элемента для применения в космических кораблях, первым из них был Аполлон — космический корабль для Лунных экспедиций США.

Однако с развитием технологий было определено, что щелочные ТЭ обладают рядом недостатков по сравнению с протонно-обменными ТЭ при их применении на наземном транспорте, поэтому для наземных транспортных средств приоритетным направлением развития стали ТЭ с протонно-обменной мембраной, получившие широкое распространение в современных наземных транспортных средствах.

При изучении тенденции научных исследований было выяснено, что в связи с экологической ситуацией в мире и снижением нефтяных запасов разработаны различные программы по развитию водородных технологий в разных странах, в том числе и в Российской Федерации. Данные программы способствуют развитию водородного транспорта и энергетике и ставят перед учёными новые задачи для улучшения энергоэффективности транспортных средств.

Таким образом, применение водорода в наземных транспортных средствах является относительно новым направлением развития и существует ряд нерешённых проблем. Интеграция ТЭ в массовое производство требует снижения стоимости водородного топлива, создания инфраструктуры и повышения ресурса ТЭ. Развитие топливных элементов позволит создать безопасную экологическую среду и повысить энергоэффективность перевозок. В настоящее время данное направление научного исследования имеет активную государственную и общественную поддержку, поэтому является одним из ключевых и актуальных направлений научного исследования.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** В.Р. Анисимов — анализ литературных источников, написание текста статьи расчёт удельной энергоёмкости источников энергии; А.В. Климов — сбор литературных источников, составление плана и структуры статьи, редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Motor Vehicle. Wikipedia. Дата обращения: 26.11.2022. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Motor\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle)
2. Orange County Bus (OC BUS) Cycle. Emission Test Cycles. Дата обращения: 09.03.2023. Режим доступа: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ocbus.php>
3. Hoogendoorn J. Fuel Cell and Battery Hybrid System Optimization Increased Range and Endurance [dissertation] Delft, 2018.
4. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014.
5. Fuel Cell. Wikipedia. Дата обращения: 26.11.2022. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)
6. Larminie J., Dicks A. Fuel Cell Systems explained. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2003. doi: 10.1002/9781118878330
7. Melis A., Happe T. Hydrogen Production. Green Algae as a Source of Energy // *Plant Physiology*. 2001. Vol. 127, N 3. P. 740–748. doi: 10.1104/pp.010498.
8. Stambouli A.B., Traversa E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): A review of an environmentally clean and efficient source of energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2002. Vol. 6, N 5. PP. 433–455. doi: 10.1016/s1364-0321(02)00014-x

## REFERENCES

1. Motor Vehicle. Wikipedia. [internet] Accessed: 26.11.2022. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Motor\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle)
2. Orange County Bus (OC BUS) Cycle. Emission Test Cycles. Accessed: 09.03.2023. Available from: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ocbus.php>
3. Hoogendoorn J. Fuel Cell and Battery Hybrid System Optimization Increased Range and Endurance [dissertation] Delft; 2018.
4. Radchenko RV, Mokrushin AS, Tyulpa VV. *Hydrogen in energetics*. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta; 2014. (In Russ.)

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** V.R. Anisimov — analysis of literary sources, writing the text of the manuscript; A.V. Klimov — search for publications on the topic of the article, calculation of the specific energy intensity of energy sources, drawing up a plan and structure of the article, editing the text of the manuscript. The authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

9. Appleby A.J. From Sir William Grove to today: fuel cells and the future // *Journal of Power Sources*. 1990. Vol. 29, N 1–2. P. 3–11. doi: 10.1016/0378-7753(90)80002-u
10. Stone C. From curiosity to 'power to change the World' // *Solid State Ionics*. 2002. Vol. 152–153. P. 1–13. doi: 10.1016/s0167-2738(02)00315-6
11. Burke K. Fuel cells for space science applications // 1st International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). 2003 Jun. 26 [Preprint]. doi: 10.2514/6.2003-5938
12. Мишин С. АНТЭЛ. Журнал “За рулём”. 2012. Дата обращения: 28.12.2022. Режим доступа: <https://wiki.zr.ru/АНТЭЛ>
13. Allis-Chamers Fuel Cell Tractor. *The Weekend Historian*. 2015. Дата обращения: 28.12.2022. Режим доступа: <https://theweekendhistorian.com/2015/02/28/allis-chalmers-fuel-cell-tractor>
14. Шайхатдинов Ф.А., Филимонова А.А., Хохонов А.А., и др. Создание в Российской Федерации электрического автобуса с водородными топливными элементами // *Надёжность и безопасность энергетики*. 2022. Т. 15, № 3. С. 190–198. doi: 10.24223/1999-5555-2022-15-3-190-198

5. Fuel Cell. Wikipedia [internet] Accessed: 26.11.2022. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)
6. Larminie J, Dicks A. *Fuel Cell Systems explained*. 2nd ed. Chichester: Wiley; 2003. doi: 10.1002/9781118878330
7. Melis A, Happe T. Hydrogen Production. Green Algae as a Source of Energy. *Plant Physiology*. 2001;127(3):740–8. doi: 10.1104/pp.010498
8. Stambouli AB, Traversa E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2002;6(5):433–55. doi: 10.1016/s1364-0321(02)00014-x

9. Appleby AJ. From Sir William Grove to today: fuel cells and the future. *Journal of Power Sources*. 1990;29(1–2):3–11. doi: 10.1016/0378-7753(90)80002-u
10. Stone C. From curiosity to “power to change the world.” *Solid State Ionics*. 2002;152–153:1–13. doi: 10.1016/s0167-2738(02)00315-6
11. Burke K. Fuel Cells for Space Science Applications. In: *1st International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*. 2003. doi: 10.2514/6.2003-5938
12. Mishin S. ANTEL. *Zhurnal Za rulem*. 2012. Accessed: 28.12.2022. (In Russ.) Available from: <https://wiki.zr.ru/AHTЭЛ>.
13. Allis-Chamers Fuel Cell Tractor. *The Weekend Historian*. 2015. Accessed: 28.12.2022. Available at: <https://theweekendhistorian.com/2015/02/28/allis-chalmers-fuel-cell-tractor>
14. Shaikhatdinov FA, Filimonova AA, Hokhonov AA, et al. Creation of an electric bus with hydrogen fuel cells in the Russian Federation. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2022;15(3):190–8. (In Russ.) doi: 10.24223/1999-5555-2022-15-3-190-198

## ОБ АВТОРАХ

\* **Анисимов Виктор Романович**,  
аспирант Передовой инженерной школы  
электротранспорта (ПИШЭ);  
адрес: Российская Федерация, 107023, Москва,  
ул. Большая Семеновская, д. 38;  
ORCID: 0000-0003-1268-6604;  
eLibrary SPIN: 5036-8965;  
e-mail: [rabota.viktor.99@mail.ru](mailto:rabota.viktor.99@mail.ru)

**Климов Александр Владимирович**,  
канд. техн. наук,  
доцент Передовой инженерной школы  
электротранспорта (ПИШЭ); руководитель службы  
электрифицированных автомобилей;  
ORCID: 0000-0002-5351-3622;  
eLibrary SPIN: 7637-3104;  
e-mail: [klimmanen@mail.ru](mailto:klimmanen@mail.ru)

\* Автор, ответственный за переписку

## AUTHORS' INFO

\* **Viktor R. Anisimov**,  
Postgraduate of the Advanced Engineering School  
of Electric Transport (AES);  
address: 38 Bolshaya Semenovskaya street, 107023 Moscow,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0003-1268-6604;  
eLibrary SPIN: 5036-8965;  
e-mail: [rabota.viktor.99@mail.ru](mailto:rabota.viktor.99@mail.ru)

**Alexander V. Klimov**,  
Cand. Sci. (Tech.),  
Associate Professor of the Advanced Engineering School  
of Electric Transport (AES), Head of the Electric Vehicles  
Department;  
ORCID: 0000-0002-5351-3622;  
eLibrary SPIN: 7637-3104;  
e-mail: [klimmanen@mail.ru](mailto:klimmanen@mail.ru)

\* Corresponding author