

## Перспективы применения транспортных средств с водородными энергоустановками и электрической тягой

© А. Г. Осипов, М. Е. Лебедева, К. П. Зенин

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье дана историческая справка о получении водорода и его применении в качестве топлива двигателей различных транспортных средств, включая автомобили. Отмечено, что отработавшие газы автомобильных двигателей, также как и промышленные выбросы, загрязняют атмосферу и неблагоприятно влияют на здоровье людей. В качестве альтернативы двигателям внутреннего сгорания рассмотрены электрические и водородные. Проанализированы их достоинства и недостатки. Сделано заключение о целесообразности применения в перспективе средств передвижения с водородными энергоустановками и электрической тягой. Проведены аналитические исследования литературного материала. Сделаны экономические расчеты. В результате этого установлено, что в будущем транспортные средства с водородными энергоустановками и электрической тягой получат наиболее широкое распространение. Обоснована целесообразность их применения. Сформулированы рекомендации по устранению факторов, сдерживающих применение экологически чистых средств передвижения.

**Ключевые слова:** экология, получение и применение водорода, автомобили, автомобильные двигатели, электродвигатели, электротяга, электромобили, электробусы, водородные двигатели, водородомобили, водоробусы, водородные энергоустановки, топливные элементы

## Prospects for the vehicles usage with hydrogen power plants and electric traction

© Artur G. Osipov, Marina E. Lebedeva, Konstantin P. Zenin

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** The article provides a historical background on obtaining access and its use as a fuel for various vehicles, including cars. It is noted that the exhaust gases of automobile engines, as well as industrial emissions pollute the atmosphere and negatively affect human health. As an alternative to internal combustion engines, the article considers electric and hydrogen engines, analyzes their advantages and disadvantages. The article concludes on the feasibility of using in the future vehicles with hydrogen power plants and electric traction. The article presents analytical studies of literary material and economic calculations. As a result of this, the article found that in the future, vehicles with hydrogen power plants and electric traction will become the most widespread; the article substantiates the feasibility of their use and gives recommendations on how to eliminate the factors that hinder the use of environmentally friendly vehicles.

**Keywords:** ecology; production and application of hydrogen; automobiles; automobile engines; electric motors; electric traction; electric cars; electric buses; hydrogen engines; hydrogen cars; water buses; hydrogen power plants; fuel cells

В настоящее время в связи с повышенной загазованностью атмосферы вредными производственными выбросами и отработавшими газами всех видов транспортных средств появляется острая необходимость перехода промышленности на новые безопасные технологии и перевода транспортных средств на экологически чистое топливо. В связи с последним, перспективным является перевод транспортных средств, в первую очередь, автомобилей на электротягу и экологически чистое водородное топливо.

Водород – основной составной компонент горючего газа, являющегося в ближайшем будущем заменителем углеводородного

жидкого топлива.

Еще в XVI–XVII вв., на заре становления химии как науки, проводились опыты по выделению горючего газа в процессе взаимодействия кислот и металлов. Впервые в XVI веке водород получил Парацельс, погружая железные опилки в серную кислоту [1]. В 1671 году Роберт Бойль подробно описал химическую реакцию между железными опилками и разбавленными кислотами, при которой выделяется газообразный водород. В 1766 году Генри Кавендиш был первым, кто признал газообразный водород индивидуальным элементом, назвав газ, выделяющийся при реакции металла с кислотой, «го-

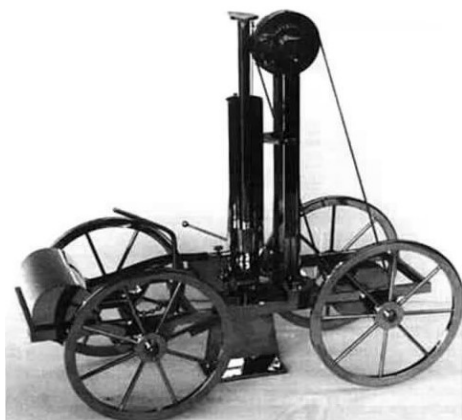
рючим воздухом» [2]. Он предположил, что «горючий воздух» идентичен гипотетическому веществу, называемому «флогистон» и в 1781 году обнаружил, что при его сгорании образуется вода.

В 1807 году французско-швейцарский изобретатель Франсуа Исаак де Риваз построил самодвижущийся четырехколесный экипаж (рис. 1а) с первым поршневым водородным двигателем, нередко называемым двигателем де Риваза. Он работал на газобразном водороде, имея конструктивные элементы, вошедшие с тех пор в конструкцию будущих двигателей внутреннего сгорания, в частности, цилиндропоршневую группу и искровое зажигание от столба Вольта [3]. В 1826 году Сэмьюэл Браун построил «летающую газовую машину», представляющую четырехколесный экипаж с газовым двигателем (рис. 1б). В 1876 году в Германии Николау-

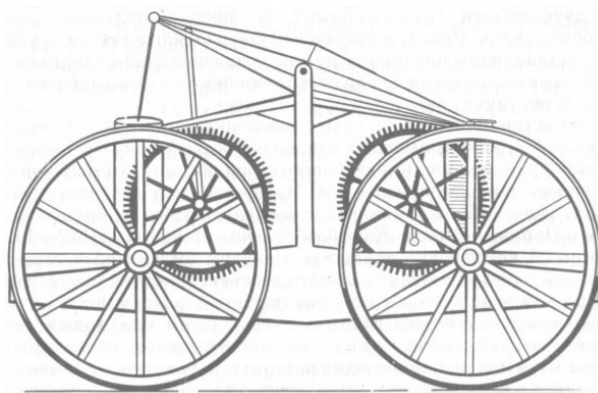
сом Августом Отто был построен первый работоспособный четырехтактный газовый двигатель [4].

Более 150 лет изобретатели, ученые и практики всего мира занимаются вопросами использования водорода в качестве топлива для двигателей. Еще в 1820 году В. Сесил в докладе Кембриджскому философскому обществу предложил использовать водород для привода в движение машин. Первый патент на двигатель, работающий на смеси водорода и кислорода, был выдан в Англии в 1841 году [5].

Со временем водородные двигатели стали устанавливаться не только на наземные транспортные средства (рис. 2а), но и на воздушные летательные аппараты, в частности, дирижабли (рис. 2б). Так в 1928 году был проведен испытательный перелет такого дирижабля через Средиземное море.

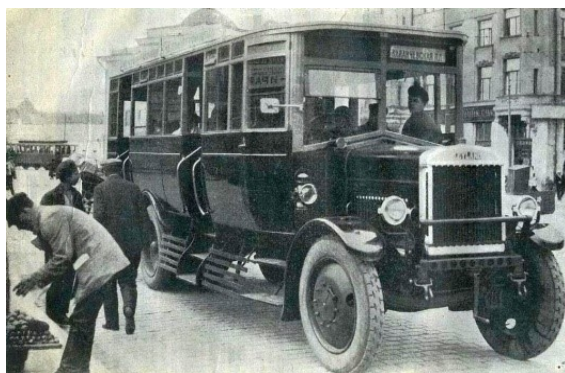


а)



б)

Рис. 1. Первые самоходные экипажи с водородными двигателями: а) конструкции Ф. И. де Риваза, б) конструкции С. Брауна



а)



б)

Рис. 2. Водородные транспортные средства: а – водоробус «Лэйлэнд», б – дирижабль

Особое место в истории развития водородных двигателей занимают работы Рудольфа Эррена, выполненные в 1920–30-х гг. Он впервые применил внутреннее смесеобразование в цилиндре двигателя, работающего на водороде, который подавался в цилиндр через его стенку, что снижало опасность возникновения обратной вспышки. При этом у двигателя сохранялась система подачи основного топлива, и он мог работать на любом его виде и даже на жидком, с добавлением водорода.

Р. Эррен перевел на водород несколько типов двигателей, в том числе и дизельных, устанавливаемых на автобусе «Лэйлэнд» (рис. 2а). Успешная пробная эксплуатация этого водоробуса осуществлялась в пригороде Лондона. Эрреном также был разработан и испытан первый водородо-кислородный двигатель. На такте впуска в цилиндр подавалась смесь кислорода с водяным паром, на такте сжатия – водород.

После Второй мировой войны продолжились фундаментальные исследования процессов сгорания в автомобильных двигателях, работающих на водородном топливе. Они проводились во многих странах мира, в том числе и в СССР, например, в НИИ энергетики Казахстана, Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО АН СССР и некоторых других организациях. Однако результативность исследовательских работ в этом направлении существенно снизилась. Дешевая нефть и не осознанные еще негативные последствия бурного развития транспортных средств, работающих на углеводо-

родных жидких топливах, не оставляли возможности для развития и распространения водородомобилей.

Несмотря на значительное снижение научно-технического потенциала страны в области новых водородных технологий, в 1990-х годах наиболее дальновидным руководителям и исследовательским коллективам удалось сохранить и продолжить работы по ряду перспективных направлений, связанных с использованием водородной теплоэнергетики.

В настоящее время идеи использования водорода в качестве топлива для наземного общественного транспорта, и тем самым улучшения экологической обстановки в крупных городах, обсуждаются во многих странах, в том числе и в России.

В 2013 году впервые был представлен публике на Токийском автомобильном салоне Toyota Mirai – водородомобиль с водородной энергоустановкой, работающей на топливных элементах [6,7]. В 2017 году на Всемирном экономическом форуме в Давосе был создан Всемирный совет по водородным технологиям [8]. Целями организации данного совета стало привлечение инвестиций в водородные проекты, а также активная популяризация данного экологически чистого вида топлива.

В России в настоящее время уделяется внимание созданию поездов, работающих на водородном топливе. Так в 2023 году первые семь водородных поездов должны появиться на Сахалине [5]. Ну а пока, к выходу на московские городские маршруты готовится отечественный водоробус фирмы КамАЗ (рис. 3).



Рис. 3. Водоробус КамАЗ-6290 с водородной энергоустановкой мощностью 45 кВт

Полная масса нового водоробуса КамАЗ-6290 [9] составляет 19 т. При такой массе и мощности водородной энергоустановки 45 кВт, максимальная скорость движения машины составляет 80 км/ч. Как и электробус, водоробус может работать при температуре окружающей среды от – 40 до + 40 °С. Однако его главным техническим преимуществом перед электробусом является значительно больший запас хода. Водоробус может проехать без подзарядки до 250 км, в то время как максимальный пробег электробуса (КамАЗ-6282) не превышает 70 км.

Таким образом, водоробус можно использовать не только на городских маршрутах движения, но и на междугородних пассажирских перевозках. Его общая пассажироплощадь составляет 80 человек, из которых 33 могут располагаться на сиденьях. Кроме того, салон водоробуса приспособлен для перевозки маломобильных пассажиров.

Также в России ведутся разработки легковых и грузовых водородных автомобилей. В ноябре 2020 года компания «Эвокарго» объявила о выпуске беспилотного грузового водородомобиля EVO-1, конструкция которого полностью создана на базе отечественных российских разработках. Грузовик оснащен электродвигателем, работающим от традиционных аккумуляторных батарей и водородной энергоустановки с топливными элементами [10].

Технические характеристики представленных на мировом рынке автомобилей с водородными энергоустановками сведены в табл. 1. Анализируя технические показатели этих водородомобилей, можно констатировать, что при сопоставимой максимальной скорости и времени зарядки водородная энергоустановка водородомобиля GLC F-Cell

немецкой фирмы Mercedes-Benz развивает наибольшую мощность 211 л. с. Однако наибольший запас хода – 650 км принадлежит японскому водородомобилю Honda Clarity. Результаты анализа технических характеристик водородомобилей с водородными энергоустановками графически показаны на рис. 4.

Для определения достоинств и недостатков водородных энергоустановок рассмотрим принцип их работы, который в первом приближении заключается в следующем.

На специальных заправочных станциях топливный баллон водородомобиля заправляется сжатым водородом. Он поступает в топливный элемент с мембраной, образующей две камеры с анодом и катодом. В первую камеру с анодом поступает водород, а во вторую камеру с катодом – кислород из воздухозаборника. Каждый из электродов топливного элемента покрыт слоем катализатора, которым чаще всего служит платина. В результате реакции водород начинает терять электроны, то есть свои отрицательно заряженные частицы. Одновременно через мембрану к катоду поступают протоны – положительно заряженные частицы. Они соединяются с электронами и на выходе образуют водяной пар и генерируют электричество.

Принципиально водородомобиль – это тот же электромобиль, только с другим аккумулятором, емкость которого в десять раз больше емкости традиционного литий-ионного аккумулятора. Топливный бак водородомобиля, представляющий баллон емкостью порядка 5 кг сжатого водорода, заполняется в течение 3–5 минут и обеспечивает пробег до 650 км.

**Таблица 1.** Технические характеристики водородомобилей с водородными энергоустановками

Фирма-производитель	Мощность, л. с.	Запас хода, км	Максимальная скорость, км/ч	Время заправки, мин.
Toyota Mirai [5,6]	154	500	178	5
Hyundai Nexa [11]	163	600	179	5
Mercedes-Benz GLC F-Cell [12]	211	481	160	3
Opel Zafira [13]	82	400	150	5
Honda Clarity [14]	177	650	160	5

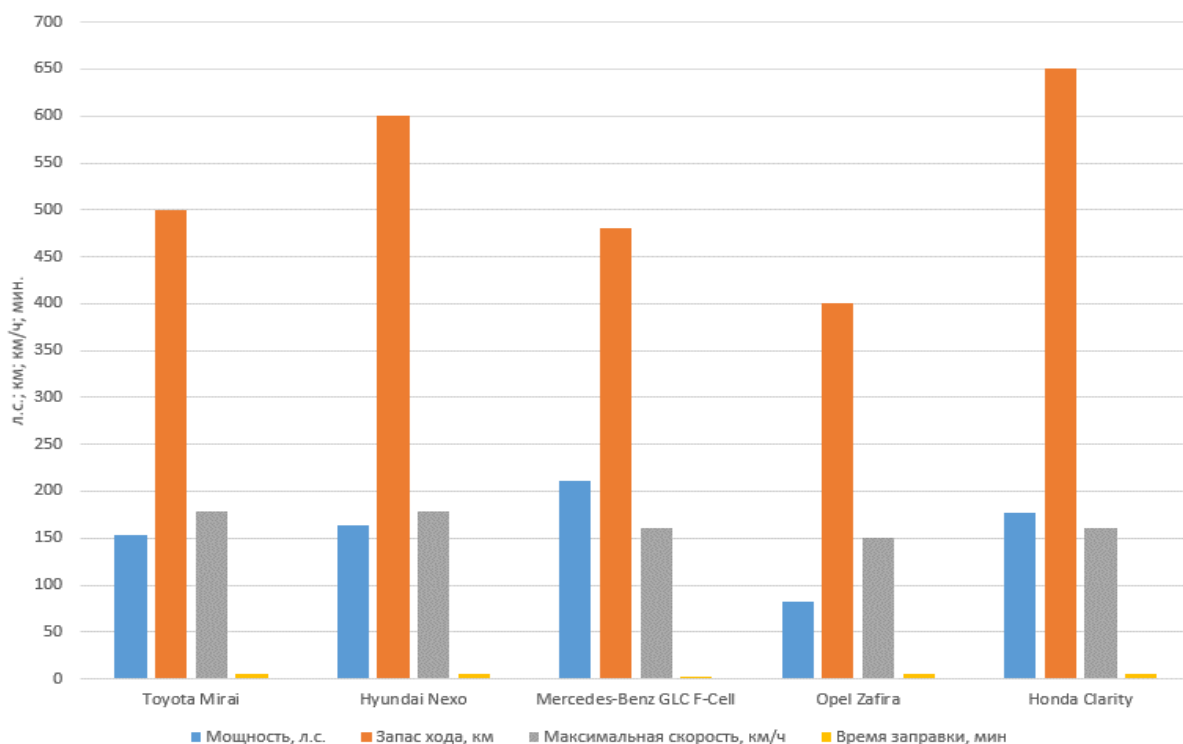


Рис. 4. Результаты анализа технических характеристик водородомобилей с водородными энергоустановками

Преимуществом топливных элементов на основе протонообменных мембран является высокая удельная мощность и относительно низкая рабочая температура. Они быстро прогреваются и почти сразу после старта начинают генерировать электроэнергию.

Срок службы топливных элементов водородомобиля Toyota Mirai можно установить по сведениям фирмы Toyota, которая заявляет, что один топливный элемент гарантированно будет работать в течение пробега 250 000 км. Затем, если работа топливного элемента ухудшится, его можно заменить в сервисном центре [15].

Для сравнительной оценки водородомобилей японской фирмы Toyota проведем экономический расчет эксплуатационных расходов при разных двигателях и результаты расчетов сведем в табл. 2.

Как видно из табл. 2, заправка водородомобиля водородом в 3,3 раза дешевле, чем заправка автомобиля бензином марки 95. Процесс заправки не отличается от обычной заправки бензином или дизельным топливом. При заправке газ подается в сжатом или сжиженном состоянии, при этом водород уменьшается в объеме почти в 850 раз, его температура при сжиженном состоянии опус-

кается до – 259°С, а давление газа поднимается до 350 или 700 атмосфер. На большинстве заправок водородное топливо отпускается в газообразном состоянии.

Таблица 2. Анализ эксплуатационных расходов японских автомобилей фирмы Toyota при разных двигателях

Стоимость, руб.	Россия	Европа
1 л 95-го бензина	53	113
1 кВт энергии	2,50	21,75
1 кг водорода	150	826,50
Плата за 100 км по бензину	397,50	847,50
Плата за 100 км по электричеству	62,50	543,75
Плата за 100 км по водороду	120	650

Российские ученые сделали и уже подключили к автозаправке первый отечественный электролизный генератор газа, способный производить водород с чистотой 99,999 % [16].

Поскольку водород – горючий газ, то при его транспортировке и хранении следует соблюдать особые меры осторожности. Для этого необходимы высокочувствительные газоанализаторы, способные в случае утечки газа подавать аварийный сигнал. Следует отметить, что водород, являясь самым лег-

ким химическим элементом, характеризуется высокой летучестью и при попадании в атмосферу быстро поднимается вверх.

Тем не менее при значительном числе водородомобилей на дороге потребуются новые более жесткие меры безопасности движения. Однако транспортные средства с бензиновыми и дизельными двигателями внутреннего сгорания также пожароопасны в случае аварии и повреждения топливного бака. Вытекшее на дорогу жидкое углеводородное топливо легко может воспламениться и привести к подрыву машины.

Для повышения пожарной безопасности топливные баки водородомобилей исполняются из высокопрочных современных материалов типа углепластика. Известная японская фирма Toyota для своих водородомобилей исполняет топливные баки из сверхпрочного волокна, выдерживающего выстрелы из крупнокалиберного оружия. Таким образом, с точки зрения дорожной безопасности, водородомобили не уступают традиционным транспортным средствам и не представляют особой опасности на дороге.

Перевод транспортных средств на экологически чистое водородное топливо только начинается. В России делаются самые первые шаги – в стране практически нет водородного транспорта, поэтому нет и инфраструктуры для его заправки [15].

Проанализируем достоинства и недостатки транспортных средств с водородными энергоустановками.

Достоинствами водородных транспортных средств являются:

- экологичность – незагрязнение атмосферы токсичными выбросами;
- высокий КПД, достигающий 45–70 %;
- больший в 2,5–3 раза пробег на 1 кг водорода, чем на эквивалентном ему по энергоемкости и объему галлоне (3,8 л) бензина;
- бесшумная работа энергоустановки;
- быстрая заправка, особенно в сравнении с электромобилями;
- сокращение зависимости от углеводородов;
- возможность работы в широком диапазоне температур от – 40 до + 40 °С.

Водородным транспортным средствам не нужна нефть, запасы которой не бесконечны

и к тому же сосредоточены только в нескольких странах. Это позволяет «нефтяным» государствам диктовать цены на мировом рынке, что невыгодно для стран с развитой экономикой.

Недостатками водородных транспортных средств являются:

- высокая стоимость изготовления и эксплуатации;
- специальные станции для заправки водородом стоят дороже, чем обычные;
- водород получают из сырья, на 95 % состоящего из полезных ископаемых;
- при паровом риформинге метана используются углеводороды;
- высокий риск самовоспламенения и взрыва.

Высокая стоимость изготовления и эксплуатации водородных транспортных средств объясняется, во-первых, тем, что галлон бензина на мировом рынке стоит около \$3,1, а эквивалентный ему 1 кг водорода – \$8,6.

Во-вторых, получение водорода обходится довольно дорого. Однако, если получать водород из попутного нефтяного газа, то КПД водородных энергоустановок станет несравненно выше и достигнет 70 %, но при этом в выбросах появится углекислый газ [17].

В-третьих, водородные топливные элементы энергоустановки содержат платину – один из самых дорогих металлов в мире.

В-четвертых, дополнительные меры безопасности также делают водородные энергоустановки дорогими: в частности, специальные системы хранения, топливные баки из углепластика и другие компоненты.

Высокий риск самовоспламенения и взрыва обуславливается тем, что водород при заправке сжимается в 850 раз, из-за чего давление газа достигает 700 атмосфер [18].

В связи с весьма ограниченным количеством водородных заправок или их полным отсутствием конструкторы изобрели бивалентный двигатель, который может работать как на водородном топливе, так и на бензине.

В настоящее время на дорогах России, Японии, Европы и США уже появились первые экспериментальные модели водородомобилей и водоробусов. Однако это единичные случаи, поскольку еще не существует сервисной инфраструктуры и разветвленной

сети водородных заправочных станций, обеспечивающих безопасную заправку транспортных средств водородом [19].

На основании результатов проведенных исследований можно сделать выводы, что водородные транспортные средства в настоящее время целесообразно эксплуатировать преимущественно в городских условиях. Од-

нако в перспективе при снижении стоимости получения водородного топлива, доводки конструкции водородных энергоустановок, а также постройки необходимого числа водородных заправочных станций, водородные транспортные средства найдут более широкое применение.

Воздух в городах и поселках станет чище.

#### Список источников

1. Недоглядов П. А. Выделение горючего газа при взаимодействии кислот и металлов наблюдали в XVI и XVII веках на заре становления химии как науки. Прямо указывал на выделение // MyShared. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.myshared.ru/slide/643288/> (15.02.2022).
2. Водород // Грасис. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.grasys.ru/gazy/promyshlennye/vodorod/> (20.03.2022).
3. Водород // ГлавСправ. [Электронный ресурс]. URL: <http://edu.glavsprav.ru/info/h/> (25.01.2022).
4. Heywood J. Internal Combustion Engine Fundamentals 2E. New York: McGraw-Hill, 2018. 1056 с.
5. Хрусталева Е. Д., Малышенко С. В. Из истории водородной энергетики // Энергетика и промышленность России. 2008. № 15–16. С. 107–108.
6. Кулешов М. А. Водородный автомобиль: Toyota Mirai – водородный автомобиль // Industrial Tyres. [Электронный ресурс]. URL: <https://pkfst.ru/raznoe/vodorodnyj-avtomobil-toyota-mirai-vodorodnyj-avtomobil.html> (25.01.2022).
7. DmitrySpb79. Toyota Mirai с водородным двигателем – «будущее» уже в Европе // Хабр. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/387091/> (27.11.2015).
8. Инновации в пути: водоробусы на смену электробусам // Ростех. [Электронный ресурс]. URL: <https://rostec.ru/news/innovatsii-na-puti-vodorobusy-na-smenu-elektrobusam/> (13.09.2021).
9. Чернявцева В. Д. «КамАЗ» представил водородный автобус // N+1 [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/news/2021/09/06/vodorobus> (06.09.2021).
10. Сычёв В. Т. Водородный беспилотный грузовик испытали на Центральной кольцевой автодороге // N+1. [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/news/2020/11/12/evo> (12.11.2020).
11. МРАК. Водородный автомобиль проехал на одной заправке почти 900 км. Hyundai Nexo установил очередной рекорд // iXBT.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixbt.com/news/2021/05/15/900-hyundai-nexo.html> (15.05.2021).
12. Александров Д. В. Mercedes-Benz создал водородный кроссовер // Autonews. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5825b1e39a79474743133755> (14.06.2016).
13. Распопова А. Д. Opel с водородным двигателем скоро появятся в продаже // Autonews. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5825a0d39a79474743120a28> (14.06.2016).
14. Водородный седан Honda Clarity прошёл технический апгрейд // Драйв. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.drive.ru/news/honda/5dfb684bec05c4a236000259.html> (19.12.2019).
15. Агаджанов М. Л. Справочная: как работают водородные автомобили и когда они появятся на дорогах // Хабр. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/450886/> (07.05.2019).
16. Кинякина Е. П. Автозаправка сможет получать топливо из воздуха // Ведомости. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2020/12/01/849082-avtozapravka-smozhet> (02.12.2020).
17. Ежов А. В. Новая Toyota Mirai: увеличенная дальность, задний привод и классный дизайн // Колеса.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kolesa.ru/news/novaya-toyota-mirai-uvlichennaya-dalnoboynost-zadny-privod-i-klassnyy-dizayn> (11.10.2019).
18. Водородные автомобили: особенности, характеристики и ТОП-7 моделей // AutoGEEK. [Электронный ресурс]. URL: <https://autogeek.com.ua/hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles/> (26.07.2021).
19. Зуйкова А. В. Как работает водородный двигатель и какие у него перспективы // РБК. [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6048e0629a794750974c67a7> (19.03.2021).

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Артур Геннадьевич Осипов,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Конструирование и стандартизация  
в машиностроении»,  
Институт авиационного строительства и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
arthur.osipov@rambler.ru

**Марина Евгеньевна Лебедева,**

студент группы ММБ-19-2,  
Институт авиационного строительства и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
lebedeva21.2000@mail.ru

**Константин Павлович Зенин,**

студент группы ММБ-19-2,  
Институт авиационного строительства и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
kostya-zenin@mail.ru

**Artur G. Osipov,**

Cand. Sci. (Technics),  
Associate Professor of Design and Standardization  
in Mechanical Engineering Department,  
Aircraft and Mechanical Engineering and Transport  
Institute,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
arthur.osipov@rambler.ru

**Marina E. Lebedeva,**

Student,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
lebedeva21.2000@mail.ru

**Konstantin P. Zenin,**

Student,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
kostya-zenin@mail.ru