



Сравнительная оценка перспективности применения электромобилей на водородном топливном элементе



Александр ЛИМАРЕВ



Михаил ВОРОТНИКОВ

*Александр Сергеевич Лимарев¹,
Михаил Юрьевич Воротников²*

^{1, 2}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

✉ ² vorotnikov_1996@inbox.ru.

¹ Author ID: 492825, ORCID: 0000-0002-1499-4988.

² ORCID: 0000-0001-8206-9287.

АННОТАЦИЯ

Одним из основных загрязнителей окружающей среды на сегодняшний день является автомобильный транспорт. На его долю приходится более половины всех выбросов. В связи с этим набирает актуальность вопрос о разработке мероприятий по уменьшению воздействия автомобилей на окружающую среду. Существуют различные подходы, позволяющие решить этот вопрос, но наиболее перспективным направлением является применение электромобилей. При этом следует отметить, что нельзя говорить об их абсолютной экологической чистоте, поскольку косвенное воздействие на окружающую среду все-таки присутствует.

В работе рассматриваются перспективы использования и недостатки двух типов электромобилей – аккумуляторного и водородного.

В настоящее время производство электромобилей является более популярным направлением, что в значительной степени обусловлено развитием технологий в области производства аккумуляторных батарей. При этом не стоит полностью исключать и другие направления, такие как автомобили с водородным топливом. Такие автомобили отличаются хорошей экологичностью, что обуславливается

характером продукта сгорания и возможностью получения данного вида ресурса. Тем не менее, применение водорода в качестве топлива для ДВС является не актуальным. Более перспективным является разработка автомобиля с электрохимическим генератором. На сегодняшний день достаточно большое количество ведущих мировых автомобильных компаний ведут работы в этом направлении.

Рассматриваемые в работе электромобили имеют схожие по характеру выбросы вредных веществ, которые при равных условиях приближаются к нулю. Тем не менее, оба типа автомобиля оставляют «углеродный след», основной объем которого формируется при выработке электроэнергии и производстве водорода. В работе выполнена сравнительная оценка качественных характеристик, «углеродного следа» и эксплуатационных затрат электромобилей с различными типами питающих установок в российских условиях эксплуатации. Исходя из сравнения, выявлены основные достоинства и недостатки электромобилей. Предложены действия, позволяющие увеличить экологичность электромобилей и решить проблемы, затрудняющие их эксплуатацию.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, электромобиль, снижение выбросов, водородный транспорт, экологичность, сравнение.

Для цитирования: Лимарев А. С., Воротников М. Ю. Сравнительная оценка перспективности применения электромобилей на водородном топливном элементе // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 99–105. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-11>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Парк автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в регионах России возрастает. Данная категория автомобилей вырабатывает большое количество вредных выбросов, что отрицательно влияет на экологическую обстановку. Известно, что преобладающая часть всех выбросов приходится на автомобильный транспорт, поэтому наиболее остро данная проблема стоит в крупных городах [1]. Для решения этой проблемы возрастает актуальность вопроса разработки комплекса мероприятий, направленных на уменьшение выбросов от автомобилей. Большая часть ведущих автомобильных компаний заинтересована в решении данной проблемы. Например, Tesla Motors разработала собственные электромобили, а также совершенствует систему экологически чистых электрических заправок станций, Toyota Motor Corporation преуспела в создании эффективных гибридных автомобилей и электромобилей [2, 3].

На рис. 1 представлены основные методы снижения воздействия автомобилей на окружающую среду.

Одним из наиболее перспективных методов уменьшения вредных выбросов от автотранспорта является применение электромобилей с различными источниками энергии – водородных и аккумуляторных. Это обусловлено тем, что электромобиль не имеет прямого воздействия на окружающую среду и количество выбросов зависит от способа добычи электроэнергии или водорода [4].

Следует отметить, что наблюдается существенный рост популярности работы над электромобилями среди автопроизводителей. В значительной степени это обусловлено научными достижениями в области хранения электроэнергии, а именно – улучшением показателей ёмкости и ресурса аккумуляторных батарей [5].

Также стоит отметить возможность применения водорода в качестве топлива для автомобиля. Водород, прежде всего, отличается своей экологичностью, поскольку продуктом сгорания является водяной пар, кроме того, из-за его сущности он относится к возобновляемым ресурсам. Эти две характеристики являются его главными достоинствами.

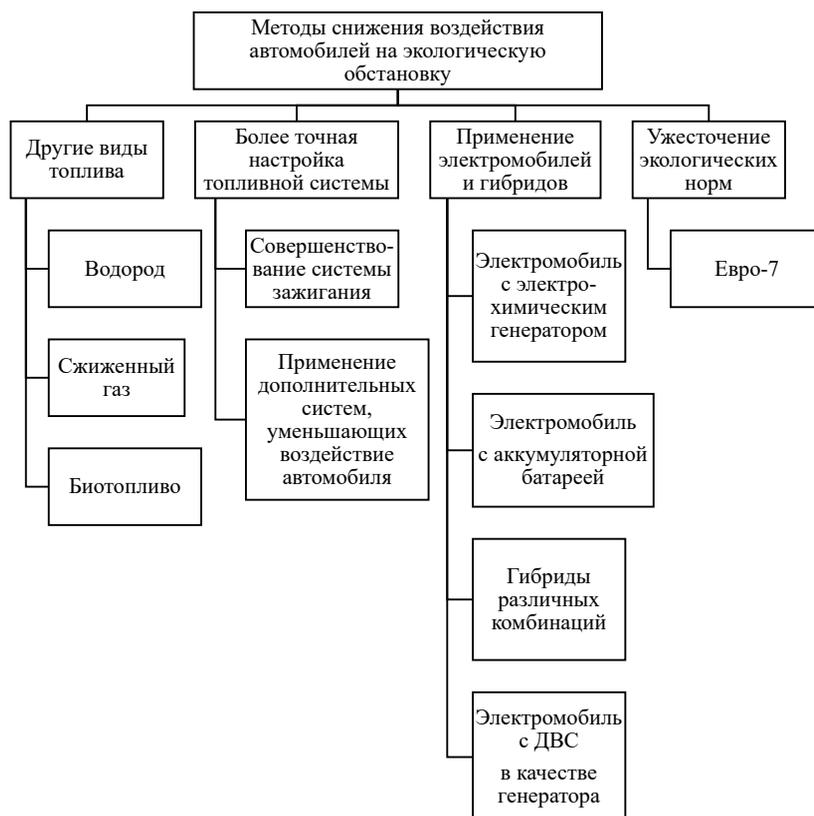


Рис. 1. Методы снижения воздействия автомобилей на окружающую среду [выполнено авторами].

Использование водорода в автомобильном транспорте осуществляется двумя способами [6]:

1. Путём сжигания в камере сгорания;

2. В качестве топливного элемента: водород направляется в электрохимический генератор, где преобразовывается в электрическую энергию для питания электродвигателя.

ДВС на водородном топливе имеет мало отличий от аналога на бензиновом топливе, но в ходе его эксплуатации возникает ряд сложностей:

– водород более энергоёмкий и имеет большую теплоту сгорания, которая почти в три раза больше бензина, из-за чего на повышенных оборотах происходит перегрев деталей двигателя, моторного масла и детонация;

– при этом, так как водород имеет хорошие характеристики на низких оборотах, для решения вышеуказанной проблемы применяется бензиново-водородная смесь. В этом случае концентрация газа уменьшается по мере увеличения оборотов двигателя, что приводит к падению мощностных и динамических показателей автомобиля [7].

Исходя из вышесказанного, применение водорода в качестве топлива для ДВС является не актуальным, поэтому наиболее перспективной является разработка автомобиля с электрохимическим генератором. Принцип его действия идентичен принципу функционирования электромобилей, питающихся от сети; главное отличие заключается в методе образования электроэнергии. В электромобилях с водородным топливным элементом энергия вырабатывается в процессе физико-химической реакции, происходящей непосредственно в силовом агрегате.

Большое количество ведущих мировых автомобильных компаний занимается разработками и проектированием более эффективных электромобилей. Так, компания Toyota в 2015 году представила водородный электромобиль Toyota Mirai. В данном автомобиле электроэнергия вырабатывается в генераторе за счёт взаимодействия водорода с кислородом. Автомобиль оснащён тяговым синхронным электродвигателем, который питается не только от топливных элементов, но и от никель-металлгидридной аккумуляторной батареи, которая подпитывается за счёт рекуперации энергии торможения [8].

Компания Tesla оснащает свои электромобили асинхронным электрическим двигателем, инвертором и блоком литий-ионных аккумуляторных батарей, зарядка которых производится от внешнего источника, либо от рекуперации энергии торможения. Работа силовой установки заключается в преобразовании постоянного тока от аккумуляторных батарей в переменный трёхфазный для питания электродвигателя, данную задачу выполняет инвертор [9].

Вследствие вышесказанного становится актуальным сравнение качественных характеристик электромобилей на водородном топливном элементе и аккумуляторной батарее в российских условиях эксплуатации.

Таким образом, целью исследования, изложенного в работе, является сравнительный анализ перспективности использования и недостатков двух типов электромобилей – аккумуляторного и водородного.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение рисков при эксплуатации. На данный момент в аккумуляторных электромобилях устанавливается литий-ионный аккумулятор, в котором при повреждении одной из ячеек возникает вероятность короткого замыкания, из-за чего воспламеняется электролит, что приводит к пожару. Потушить такой аккумулятор не представляется возможным: придётся ждать, пока электролит полностью не выгорит.

В электромобиле на водородном топливном элементе основную опасность представляет ёмкость со сжатым (компримированным) водородом, находящаяся под давлением в 700 атмосфер (вследствие химических свойств водорода у него самая низкая температура сжижения и плотность). На данный момент топливные баки изготавливают из углепластиковых материалов, лишенных возможности выброса осколков при повреждении ёмкости, что делает данный вид транспорта наиболее безопасным.

Сравнение «углеродного следа». Рассматриваемые в работе электромобили имеют схожие по характеру выбросы вредных веществ, которые при равных условиях приближаются к нулю. Тем не менее, оба типа автомобиля оставляют «углеродный след», основной объём которого формируется при выработке электроэнергии и производстве водорода.





Рис. 2. Мировое производство электроэнергии [12].

Анализ статистических данных показал, что порядка 26 % загрязняющих воздух выбросов приходится на энергетическую отрасль, поэтому рационально рассмотреть экологический эффект от электромобилей, учитывая выброс от выработки электроэнергии [10].

По данным международного энергетического агентства, на долю теплоэлектростанций приходится порядка 60 % от всей вырабатываемой электроэнергии, получаемой путем сжигания углеродных ископаемых: угля, газа, мазута (рис. 2). Следует отметить, что такой способ выработки электроэнергии оказывает наибольшее влияние на экологическую обстановку и является самым «грязным». Порядка 19 % электричества добывается на гидроэлектростанциях, которые в свою очередь, способствуют разрушению экосистемы в местах её дислокации [11]. Атомные электростанции вырабатывают 17,5 % электроэнергии от общего количества, а на долю электростанций, вырабатывающих электроэнергию за счёт альтернативных ис-

точников энергии, приходится порядка 1,5 %.

Следует отметить, что для получения более достоверных результатов при проведении расчётов необходимо учитывать основные компоненты, которые применяются для производства водорода. На сегодняшний день в качестве сырья для производства водорода преобладают углеводороды (рис. 3) [13]:

- 69 % – природный газ;
- 15 % – нефть;
- 11 % – уголь;
- 5 % – электролиз воды.

Кроме того, полученный водород бывает трёх типов [15]:

1. «Серый» – водород, произведённый посредством паровой конверсии метана. «Углеродный след» составляет 10 кг CO_2 на произведённый 1 кг H_2 . Себестоимость при производстве составляет 60–100 рублей.

2. «Голубой» – технология получения водорода полностью соответствует технологии производства «серого» водорода. Главное отличие заключается в технологии улавливания и хранения углекислого газа. Стоимость

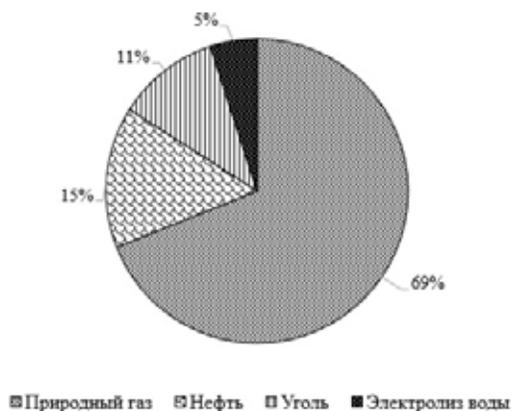


Рис. 3. Сырьё для производства водорода [14].

Результаты оценки образования «углеродного следа» от электромобиля с аккумуляторной батареей и электромобиля с водородным электрохимическим двигателем [выполнено авторами]

Выброс при различных типах энергетической системы	Пробег электромобилей, тыс. км					
	50		100		200	
	Аккумулятор	H ₂	Аккумулятор	H ₂	Аккумулятор	H ₂
Российские условия эксплуатации, т	7	3,750	14	7,5	28	15
Ветроэнергетика и зелёный водород, т	1	0,01	2	0,02	4	0,04

возрастает до 150 рублей за килограмм водорода.

3. «Зелёный» – производится посредством электролиза воды при помощи энергии, полученной от возобновляемых источников энергии. Это наиболее предпочтительный метод получения при декарбонизации, так как «углеродный след» стремится к нулю. Недостатком является высокая стоимость производства, достигающая 1000 рублей за килограмм водорода.

Таким образом, любой тип электромобиля оставляет так называемый «углеродный след», который характеризуется количеством выбросов на стадии производства и эксплуатации транспортного средства и топлива для него. Поэтому с целью определения степени влияния электромобиля, с различными типами энергетической установки, стоит сравнить образование «углеродного следа» для электромобиля с аккумуляторной батареей и электромобилей на водородном топливном элементе в моменте эксплуатации транспортных средств, учитывая выброс при производстве топлива и самого электромобиля.

Для оценки степени воздействия электромобилей на окружающую среду были произведены расчёты, учитывающие КПД силовых установок, а также КПД преобразования энергетических носителей в топливо [16]. Эксплуатация аккумуляторного электромобиля на протяжении 200 тыс. км при использовании смешанных источников энергии вырабатывает выброс равный 23 тоннам эквивалента углекислого газа. При том же пробеге, если использовать только альтернативные источники энергии, выброс составит 0,4 тонны эквивалента [17].

Средний расход водорода электромобилем на водородном топливном элементе составляет 1 кг H₂/100 км². исходя из этого можем рассчитать выброс эквивалента углекислого газа, усреднив показания выброса при различных типах добычи водорода.

В табл. 1 представлены результаты оценки образования «углеродного следа» электромобилями с аккумуляторной батареей и на водородном топливном элементе в моменте эксплуатации транспортных средств. Также, можем заметить, что общий «углеродный след» в российских условиях эксплуатации от электромобиля на водородном топливном элементе ниже, чем у аккумуляторного электромобиля почти в два раза. Стоит отметить, что при использовании наиболее чистого способа добычи топлива для силовой установки выброс при производстве водорода стремится к нулю.

Эксплуатационные затраты. Проведём расчёт эксплуатационных затрат для электромобилей с аккумуляторной батареей и электромобилей с электрохимическим водородным двигателем.

Основой для движущей силы электромобиля является электроэнергия. Исходя из этого, для электромобиля с аккумуляторной батареей расчёт сводится к определению стоимости кВт•ч., а для водородного электромобиля к стоимости 1 кг водорода.

Стоимость кВт•ч. рассчитываем на основе среднего значения домашнего тарифа по всем регионам Российской Федерации: средний дневной тариф – 3.45 руб./кВт•ч., средний ночной тариф – 1.68 руб./кВт•ч. [18]. Среднее значение дневного и ночного тарифа – 2,57 руб./кВт•ч. Также учтём, что средний расход электроэнергии составляет 15 кВт•ч/100 км. Кроме того, электромобиль сильно подвержен уменьшению запаса хода при низких температурах, примерно в два раза от идеальных условий; учтём, что таких дней в году 50 %.

В настоящее время на территории Российской Федерации эксплуатируется лишь одна водородная автомобильная заправочная станция (АЗС), стоимость одного килограмма водорода на которой обходится в 250 руб./кг [19].



**Эксплуатационные затраты на топливо для электромобиля с аккумуляторной батареей и электромобиля с водородным электрохимическим двигателем
[выполнено авторами]**

Тип силовой установки	Пробег электромобиля, тыс. км					
	50		100		200	
	Аккумулятор	H ₂	Аккумулятор	H ₂	Аккумулятор	H ₂
Расходы на топливо, тыс. руб.	26,8	125	53,7	250	107,4	500

Общие затраты на топливо представлены в табл. 2.

Можем заметить, что расходы на топливо для аккумуляторного электромобиля почти в шесть раз ниже, чем для водородного, это связано с неразвитостью инфраструктуры для водородных электромобилей. На момент подготовки статьи на территории Российской Федерации существовала лишь одна водородная АЗС. Данный фактор прямо влияет на ценообразование, завышенная стоимость формируется из отсутствия логистики и постоянного спроса [20]. Аккумуляторный электромобиль, в свою очередь, проще обслуживать, так как даже при отсутствии развитой инфраструктуры зарядных станций, сохраняется возможность зарядить автомобиль с помощью общественных электросетей.

Выводы

Исходя из вышесказанного, оба типа электромобилей имеют собственные достоинства.

Водородный электромобиль по ряду факторов превосходит аккумуляторный:

– *Время заправки.* Время заправки водородом сравнимо со временем заправки обычного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, в отличие от аккумуляторного электромобиля, где данный интервал может достигать 12 часов, при низкой мощности зарядного устройства.

– *Безопасность.* Безопасность формируется из химических свойств водорода, его масса в 14,5 раз легче воздуха, как следствие в 14,5 раз выше диффузионные свойства, что позволяет ему быстро удалиться из негерметичного помещения или резервуара, не накапливаясь.

– *Экологичность.* «Углеродный след» от использования водородного электромобиля почти в два раза ниже в российских условиях эксплуатации. Также, при добыче водорода

методом электролиза воды «углеродный след» будет стремиться к нулю.

– *Отсутствие потребности в дополнительных подогревателях.* КПД водородного электромобиля составляет 55–60 %. За счёт реакции водорода с кислородом выделяется большое количество теплоты способное подогреть автомобиль, не затрачивая дополнительной энергии. В российских условиях эксплуатации это является весомым достоинством, так как при применении аккумуляторного электромобиля в холодное время года его запас хода уменьшается почти в два раза.

Вместе с тем имеются приведённые ниже недостатки водородного электромобиля и возможные способы их решения:

– *Отсутствие инфраструктуры для водородного транспорта.* При этом наиболее экономически выгодным способом транспортировки водорода является трубопроводное сообщение. На данный момент трубопровод лишён явления водородного охрупчивания, что даёт возможность беспрепятственно транспортировать водород данным способом.

– *Экологичность.* На данный момент 95 % водорода производят из ископаемого сырья. Решение данной проблемы сводится к решению проблемы удешевления производства и популяризации зелёного водорода для автомобильного транспорта.

Эффективность эксплуатации электромобилей в значительной степени определяется территорией использования. На основе проведенных расчетов установлено, что в условиях Российской Федерации электромобиль на водородном топливном элементе имеет преимущество перед аккумуляторным. В большей степени это обусловлено способом добычи электроэнергии, где более 60 % приходится на сжигание углеводородов. Главным недостатком водородного электромобиля является отсутствие широкой сети водородных заправок. Отсутствие необходимой инфраструктуры приводит к существенному

росту стоимости водорода и, как следствие, эксплуатации автомобилей.

Обобщая сказанное, отметим, что электромобиль является лишь инструментом, имеющим высокий потенциал, который обуславливается косвенным воздействием на окружающую среду в процессе создания самого транспортного средства и топлива для него, поэтому декарбонизация автомобильного транспорта будет увеличиваться по мере совершенствования незагрязняющих методов производства электроэнергии или водорода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грушников В. А. Разумная автомобилизация. Электромобили // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сб. – 2017. – № 4. – С. 47–52. EDN: XXZHTR.

2. Хамад И., Абдуллаев Э. Г., Бутов А. В. Применение инновационных технологий на примере компании Tesla // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2022. – Т. 2. – № 3 (123). – С. 199–206. DOI: 10.36871/ek. up. p. r.2022.03.02.022. EDN: HMFYWQ.

3. Usmanov U., Yuldoshev Q. State of the art of fuel cell technology in automotive industry // Universum: технические науки. 2022, Iss. 5–11 (98), pp. 33–40. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13575. EDN: JPYCWO.

4. Лимарев А. С., Мезин И. Ю., Воротников М. Ю., Зотов С. В. Улучшение динамической характеристики электромобиля за счет применения многоступенчатой коробки передач // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 4. – С. 61–67. EDN: DEDEJM.

5. Юсупова О. А. О проблемах и перспективах развития рынка электромобилей в России // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сб. – 2022. – № 2. – С. 38–42.

6. Назметдинов Н. Р. Перспективы применения водородного топлива на автомобилях // Энергетика и автоматизация в современном обществе: Материалы V Международной научно-практ. конференции обучающихся и преподавателей. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 20 мая 2022 года / Под общей редакцией Т. Ю. Коротковой. Том Часть I. – СПб.: Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2022. – С. 171–174. EDN: WQZVUE.

7. Keller, A. V., Karpukhin, K. E., Kolbasov, A. F., Kozlov, V. N. Analysis of hydrogen use as an energy carrier in transport. International conference on digital solutions for automotive industry, roadway maintenance and traffic control (DS ART 2020), 2022, 012087. EDN: BPBWUP.

8. Каширин В. А., Мищенко Е. В. Toyota Mirai и принцип действия водородного двигателя // Научно-практ. конференции факультета агротехники и энергообеспечения кафедры инженерной графики и механики. – 2017. – С. 159–163. EDN: ZSLQZT.

9. Ларин В. Tesla-электромобиль // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – № 1. – С. 69–72. EDN: VWHQQH.

10. Dyvak, M., Darmorost, I., Shevchuk, R. [et al]. Correlation analysis traffic intensity of the motor vehicles and the air pollution by their harmful emissions. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 855–858. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336331. EDN: YBSWRN.

11. Лагерева А. В., Ханаева В. Н. Возможные направления снижения выбросов парниковых газов от электростанции в России до 2050 г. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 1. – С. 50–58. EDN: KZDWMH.

12. Поспелов В. К., Чувахина Л. Г., Миронова В. Н. Современные тренды глобальной энергетической политики. – М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2022. – 220 с. ISBN 978-5-907497-59-7.

13. Белый Ю. И., Терегулов Т. А. Водородная энергетика: преимущества и недостатки // Вопросы философии. – 2016. – № 12. – С. 8. [Электронный ресурс]: <https://scientificjournal.ru/images/PDF/2016/VNO-24/vodorodnaya-energetika-preimushchestva-i-nedostatki.pdf?ysclid=lp9lm144li339240672>. Доступ 25.05.2023.

14. Прокопенко А. Н., Смирнов А. А. Производство водорода из углеводородного сырья для энергетических целей // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. – 2010. – № 8. – С. 26–33. EDN: NCDSVR.

15. Лесюкова В. В. Характеристики водорода как топлива и накопителя энергии // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». – 2021. – С. 528–531. EDN: INFIQQ.

16. Лимарев А. С., Сомова Ю. В., Коваленко А. О., Очкова Е. А., Акманова З. С. Анализ возможностей снижения экологического воздействия автомобилей на окружающую среду // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 47–50. EDN: XHSDSP.

17. Лимарев А. С., Мезин И. Ю., Воротников М. Ю., Сомова Ю. В., Москвина Е. А. Электромобиль как перспектива снижения воздействия на окружающую среду // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сб. – 2022. – № 8. – С. 55–59. EDN: VOAYNK.

18. Воротников М. Ю., Лимарев А. С., Мезин И. Ю. Сравнение эксплуатационных расходов электромобиля и автомобиля с двигателем внутреннего сгорания // Транспорт: наука, техника, управление. – 2021. – № 10. – С. 50–53. EDN: RJDKHU.

19. Филимонова А. А., Чичиринов А. А., Чичирова Н. Д., Разакова Р. И. Электротехнические технологии для автомобилей на водородном топливе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 2. – С. 104–115. EDN: AZKNEE.

20. Тимергазин А. Р., Щелудяков А. М. Автомобильный транспорт с водородными топливными элементами // Master's Journal. – 2022. – № 1. – С. 111–118. EDN: OHUUQS.

Информация об авторе:

Лимарев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, aslimarev@mail.ru.

Воротников Михаил Юрьевич – студент Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, vorotnikov_1996@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023, одобрена после рецензирования 27.05.2023, принята к публикации 02.06.2023.

