

Экологические перспективы «водородного» электричества для транспорта

А.Р. Кульчицкий

Камешковский механический завод, Камешково, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Одна из главных проблем современности — загрязнение окружающей среды вредными веществами, образующимися в процессе сгорания традиционных углеводородных топлив в двигателях внутреннего сгорания, обеспечивающих движение транспортных средств. Решением указанной проблемы является переход на гибридные моторные установки и электромобили, в том числе с использованием водорода, в качестве экологически наиболее чистого топлива. Однако, экологический эффект использования электроэнергии на транспорте обычно рассматривается только для мест эксплуатации транспорта. Вместе с тем, выработка электроэнергии на станциях электрогенерации сопровождается загрязнением атмосферы. Поэтому рассмотрение совокупности воздействия на окружающую среду как замены автомобилей на электромобили, так и последствий электрогенерации является актуальной задачей.

Цель работы — оценка воздействия на атмосферу использования водорода в тепловых двигателях и топливных элементах, а также технологий электрогенерации и получения водорода.

Материалы и методы. Метод исследования — аналитический обзор. Рассмотрены материалы исследований и обзоров применения водорода в качестве топлива, а также технологии выработки водорода и его хранения на борту транспортного средства.

Результаты. Реализация применения электроэнергии на транспорте возможна, во-первых, путём зарядки тяговых аккумуляторов от внешних электросетей, передающих электроэнергию от электростанций. А во-вторых, за счёт выработки электроэнергии непосредственно на транспорте с помощью топливных элементов, в которых топливом может служить водород, при этом продуктом химической реакции является вода. Но выработка электроэнергии, в основном, происходит на тепловых электростанциях за счёт сжигания углеводородного топлива — природного газа и угля, в результате чего происходит образование вредных веществ и их последующий выброс в атмосферу. При электрогенерации на атомных станциях в атмосферу выделяется большое количество водяного пара, который обладает в три раза большей парниковой активностью по сравнению с диоксидом углерода. Функционирование станций, использующих возобновляемые источники энергии (солнечные, ветряные), существенно зависит от природных условий. Гидроэлектростанции также носят вспомогательную роль. Применение гибридных моторных установок позволяет использовать в тепловых двигателях водород, продуктами сгорания которого являются вода и оксид азота. Но в природе нет свободного водорода, и его выработка обеспечивается, в основном, за счёт паровой конверсии метана, что сопровождается образованием вредных веществ и «парниковых» газов. Использование на транспорте сжиженного водорода и жидких носителей водорода также требует затрат электроэнергии, что сопровождается загрязнением атмосферы.

Заключение. Ценность настоящего обзора заключается в оценке совокупного воздействия на окружающую среду технического решения о переходе на использование электротранспорта взамен автомобильного транспорта.

Ключевые слова: электромобиль; электрогенерация; водород; вредные вещества; парниковые газы.

Как цитировать:

Кульчицкий А.Р. Экологические перспективы «водородного» электричества для транспорта // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 3. С. **х-у**. DOI: 10.17816/0321-4443-635734 EDN: BROFYG

Environmental Prospects of "Hydrogen" Electricity for Transport

Alexey R. Kulchitskiy

Kameshkovo Mechanical Plant, Kameshkovo, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: One of the main problems of the present time is environmental pollution with harmful substances formed during the combustion of traditional hydrocarbon fuels in internal combustion engines that provide moving of vehicles. The solution is the transition to hybrid power units and electric vehicles, including the use of hydrogen as the most environmentally friendly fuel. But the environmental effect of using electricity in vehicles is usually considered only for areas of transport operation. However, the generation of electricity at power plants goes with air pollution. Therefore, consideration of the totality of the impact on the environment of both the replacement of cars with electric vehicles and the consequences of electricity generation is a relevant task.

AIM: Evaluation of the impact of using hydrogen in heat engines and fuel cells, as well as electricity generation and hydrogen production technologies, on the atmosphere.

METHODS: The research method is an analytical review. The materials of studies and reviews of the use of hydrogen as a fuel, as well as the technology of production and on-board storage of hydrogen are considered.

RESULTS: The use of electric power in vehicles is possible, firstly, by means of charging traction batteries from external power grids transmitting electricity from power plants and, secondly, by means of on-board electricity generation using fuel cells, in which hydrogen serves as fuel, while the by-product is water. However, the electricity generation mainly occurs at thermal power plants by means of burning hydrocarbon fuel such as natural gas and coal, which leads to formation of harmful substances and their subsequent emission into the atmosphere. When generating electricity at nuclear power plants, a large amount of water vapor is released into the atmosphere, which has three times greater greenhouse effect compared to carbon dioxide. The operation of power plants with renewable energy sources (solar, wind) significantly depends on natural conditions, hydroelectric power plants also play an auxiliary role. The use of hybrid motor units allows the use of hydrogen in heat engines, the combustion products of which are water and nitrogen oxide. But there is no free hydrogen in nature, and its production is ensured mainly by steam conversion of methane, which goes with the formation of harmful substances and "greenhouse" gases. The use of liquefied hydrogen and liquid hydrogen carriers in transport also requires consuming of electricity, which leads to air pollution.

CONCLUSION: The value of this review lies in the evaluation of the cumulative impact of the technical solution to switch to the use of electric transport instead of motor vehicles on the environment.

Keywords: electric vehicle; power generation; hydrogen; harmful substances; greenhouse gases.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kulchitskiy AR. Environmental Prospects of "Hydrogen" Electricity for Transport. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;92(3):x–y. DOI: [10.17816/0321-4443-635734](https://doi.org/10.17816/0321-4443-635734) EDN: BROFYG

ВВЕДЕНИЕ

Первые электромобили были созданы в США и Шотландии в 1837 г. С конца XIX века развитие электромобилей и автомобилей с тепловыми двигателями шло параллельно. При этом последние составляли слабую конкуренцию, поскольку электромобили имели более простую конструкцию, а также в городских условиях эксплуатации их пробег на одной зарядке аккумуляторов (10–15 км) и скорость передвижения (в пределах 20 км/ч) вполне удовлетворяла потребителей; в 1899 г. на электромобилях была достигнута скорость 106 км/ч. В конце XIX века в США из всего числа автомобилей 38% были оснащены электродвигателями, 40% — паровыми, 22% — бензиновыми двигателями. В начале XX века на электромобилях уже был обеспечен запас хода 50–80 км, а скорость — до 35 км/ч. Однако именно в начале XX века конструкция и характеристики автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) были существенно улучшены: их скорости достигли значения 80 км/ч, а запас хода — до 300 км. Организация массового производства автомобилей и низкая стоимость топлива при высоких технико-эксплуатационных показателях обеспечили автомобилям безусловное преимущество над электромобилями [1]. В 1916 г. появился автомобиль с гибридной моторной установкой: бензиновый двигатель плюс электродвигатель [2]. В то же время началось использование в городах трамваев, а несколько позднее и троллейбусов; к 1960 г. в Англии количество электромобилей составило 26 000 единиц, использовались они в процессах централизованной доставки товаров из торговых сетей на дом, перевозок посылок и почты, т.е. там, где не требовались большие скорости и большой пробег; не отставал и железнодорожный транспорт: в эксплуатации нашли широкое применение электропоезда [3].

С середины 1960-х годов снова возник интерес к электромобилям (особенно в США, Японии, Германии и Англии), что было обусловлено энергетической и экологической проблемами. Последнее было связано с ростом числа автомобилей, вызвавшее загрязнение атмосферы городов выбросами вредных веществ, присутствующих в отработавших газах ДВС (бензиновых, дизельных, газовых). В связи с чем, например, в США в 1963 г. был принят «Акт о чистом воздухе» [4]. Однако существенного расширения использования электромобилей так и не произошло: причиной застоя в развитии конструкций электромобилей явилось отсутствие новых источников тока, обладающих высокой энергоёмкостью при их небольшой стоимости [1].

В начале 2000-х годов в ряде стран мира интерес к применению электричества для обеспечения движения транспортных средств «обрёл второе дыхание». И это было обусловлено уже не только стремлением сократить содержание в воздухе городов вредных веществ от транспортных средств (количество которых в настоящее время достигло 1,5 млрд единиц [5]). Второй проблемой стала необходимость экономии невозобновляемых углеводородных топлив и, в связи с этим, потребность избежать зависимости от стран-экспортёров углеводородного топлива.

Япония первой в мире провозгласила курс на построение водородной экономики и приняла соответствующую стратегию. В приоритетном порядке страна развивает два направления: создание распределенной тепловой генерации на топливных элементах (ТЭ) для освещения и отопления жилых домов и офисных помещений и электромобилей с использованием водорода [6]. Опубликована «Водородная стратегия ЕС» [7]: согласно документу, к 2030 году Европе должны покрыть водородные газопроводы протяженностью 23 тыс. км. Однако на переходном этапе допускается производство водорода из ископаемого топлива. Ожидается, что к 2050 году четверть генерации электроэнергии будет осуществляться с помощью водорода. Само его производство будет базироваться на использовании энергии ветра и солнца [8].

Рассматривая применение электричества для привода в движение транспортных средств, обычно концентрируют внимание на проблемах применения электродвигателя на транспортном средстве. Однако подавляющее количество электромобилей получает электроэнергию для подзарядки тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ) от внешних источников генерации электроэнергии, вырабатываемой различными способами. И при этом не придают большого значения вопросам: как получена эта электроэнергия, за счёт какого источника, какова эффективность электропередачи от мест выработки электроэнергии до места её использования?

Первый ДВС, созданный Э. Ленуаром в 1860 г., работал на светильном газе — смеси метана,

оксида углерода, водорода и других горючих газов, полученном при сухой перегонке каменного угля. В настоящее время водород рассматривается как наиболее эффективная замена природному газу с экологической точки зрения, поскольку непосредственным продуктом сгорания H_2 является вода, а сопутствующим — оксид азота, как результат высокой температуры, развиваемой в процессе сгорания водорода [9]. Однако в природе практически нет свободного водорода, и для его получения необходимы затраты электроэнергии. В настоящее время около 96% годового мирового производства водорода получают из ископаемого топлива посредством таких технологий как паровая конверсия метана (48%), конверсия нефти (30%) и газификация угля (18%), что сопровождается образованием вредных веществ с последующим их выбросом с отходящими газами в атмосферу [10]. Здесь возникает вопрос: насколько экологически безвредно будет получение водорода, а также его транспортировка от места получения до места выработки электроэнергии?

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка воздействия на атмосферу использования водорода для выработки электроэнергии как на транспорте, так и станциях электрогенерации.

МЕТОДЫ

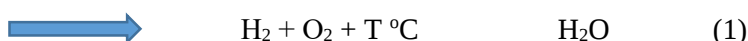
Метод исследования — аналитический.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Производство водорода: «50 ОТТЕНКОВ» ЦВЕТА

Наиболее распространенное топливо — углеводороды C_nH_m , которое при сгорании образует такие продукты окисления как оксид углерода CO (угарный газ), диоксид углерода CO_2 (углекислый газ), продукты неполного окисления углеводородов C_nH_b . «Претензии» к CO обусловлены тем, что этот газ при вдыхании вытесняет из крови кислород, приводя к удушью, а среди C_nH_b есть канцерогенные (например, бензапирен $C_{20}H_{12}$), провоцирующие развитие онкологических заболеваний [11]. Углекислый газ в настоящее время отнесен к «парниковым газам» (см. далее).

Из всех возможных газообразных топлив только водород не имеет в своём составе углерода соответственно, уже изначально водород можно считать экологически наиболее чистым газом, непосредственным продуктом сгорания которого является вода:



Побочным продуктом при горении водорода (как и при горении любого вида топлива) является оксид азота NO, при условии, что в процессе горения достигается $2000 \text{ } ^\circ C$ [9]. Также можно добавить, что в случае утечек водорода из топливной ёмкости загрязнения окружающей среды не будет, в отличие от испарений дизельного топлива, бензина, а также природного и нефтяного газов.

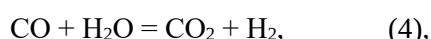
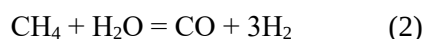
Но водород в чистом виде практически не встречается, он входит в состав многочисленных химических соединений, самое известное из которых — это вода H_2O . Соответственно получение водорода в чистом виде требует затрат энергии. Стоимостной фактор является одним из основных, определяющих спрос на водород как энергоноситель в промышленных масштабах. Поэтому переход на водородную энергетику означает крупномасштабное производство водорода, его хранение, распределение, транспортировку. Поэтому при «низких» ценах на традиционное моторное топливо водородные технологии будут экономически малопривлекательными. Однако при «высоких» ценах картина существенно меняется: водород при централизованном производстве на базе природного газа, угля и ядерной энергии требует более низких затрат по сравнению с традиционными технологиями производства топлив для ДВС [12].

Для простоты определения способа получения и сопоставления степени воздействия на окружающую среду было предложено за основу взять *степень экологичности* соответствующей технологии: чем больше диоксида углерода CO_2 выделяется при производстве водорода, тем менее экологичной является соответствующая технология. И каждой такой технологии дали «цветовое» определение [13]:

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- «Белый» водород (природный, золотой, геологический) — естественным образом вырабатывается или присутствует в земной коре.
- «Зеленый» водород является самым экологичным из производимых, т. к. получают его с помощью электролиза воды H_2O и при условии, что электричество поступает от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как ветер, солнечная энергия, гидроэнергия, соответственно выбросы CO_2 отсутствуют.
- «Желтый (оранжевый)» водород также получают путем электролиза, однако источником энергии являются атомные электростанции (АЭС). Выбросы CO_2 отсутствуют, но метод не является абсолютно экологичным в связи с большим выбросом водяных паров вследствие охлаждения горячей воды, поступающей от реакторов, с помощью градирен.
- «Серый» водород производится путем паровой конверсии метана CH_4 , т.е. исходным сырьем для такой реакции служит природный газ.
- «Бирюзовый» водород получают посредством разложения CH_4 на водород и твердый углерод путем пиролиза (высокотемпературного воздействия при недостатке окислителя). Такое производство дает относительно низкий уровень выброса углерода, который, может быть, либо захоронен, либо использован в промышленности, например, в производстве стали или шин, и, таким образом, он не попадает в атмосферу.
- «Изумрудный» водород получают разложением биометана и природного газа с помощью термоплазменного электролиза.
- «Голубой (синий) водород» получают путем паровой конверсии метана, но при условии улавливания и хранения углерода, что дает сокращение выбросов углерода примерно в 2 раза. Данная технология получения водорода весьма дорогостоящая.
- «Коричневый (бурый)» водород получают с помощью газификации бурого угля с образованием синтез-газа (сингаза): смеси углекислого газа, окиси углерода, водорода, метана и этилена, а также небольшого количества других газов.
- «Чёрный» водород, для которого исходным сырьём служит каменный уголь.

В настоящее время около 96% годового мирового производства водорода получают из ископаемого топлива посредством таких технологий как паровая конверсия метана (48%), конверсия нефти (30%) и газификация угля (18%). Однако, наиболее распространенный процесс получения водорода из метана (риформинг-процесс) основан на следующих реакциях:



продуктом которых является диоксид углерода и водород.

В водородной установке с производительностью один миллион $\text{м}^3 \text{H}_2$ в день в атмосферу ежедневно выбрасывается около 0,3–0,4 миллиона стандартных кубических метров CO_2 . При этом улавливание CO_2 накладывает примерно 25–30% дополнительных затрат на производство водорода [14].

Метод, позволяющий обойтись без использования ископаемого топлива, это электролиз воды: процесс расщепления воды на составляющие элементы — водород и кислород — с помощью электрического тока. Однако для реализации этого процесса кроме электроэнергии необходима вода, причем очищенная. Например, для получения 1 т водорода путем электролиза требуется в среднем 9 т очищенной воды, а для получения 1 т очищенной воды необходимо 2 т исходной (неочищенной). Таким образом, для получения 1 т водорода необходимо 18 т воды, а с учётом различных потерь — это будет 20 т [15].

В настоящее время производство водорода из невозобновляемых ресурсов, таких как уголь и природный газ, является доминирующим в мире [16]. Около 95% производимого водорода производится методами, основанными на ископаемом топливе, а производство водорода из воды с использованием электричества и биомассы составляет всего 4% и 1%

соответственно. Около половины всего производимого водорода получается в результате газификации и термокаталитических процессов природного газа (ПГ), за которыми следуют тяжелые масла, нефть и уголь. Реакция между ПГ и паром в каталитическом конвертере отщепляет атомы водорода, и в качестве побочного продукта образуется диоксид углерода. Применение ископаемого топлива для производства водорода должно быть связано с системами улавливания углерода. Водород также может быть получен из метанола или бензина, хотя CO₂ снова является нежелательным побочным продуктом. Производство водорода из источников энергии с низким и нулевым содержанием углерода, включая возобновляемую электроэнергию, биомассу и ядерную энергию, может стать долгосрочной целью водородной утопии [17].

ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СТАНЦИЯХ

В структуре производства электроэнергии во всех регионах мира лидируют тепловые электростанции. Исключение составляет Латинская Америка, где преимущество отдаётся гидроэлектростанциям, что связано с природными условиями этого региона. Крупнейшие производители электроэнергии: Китай — 29,0% общемировой выработки, США — 16,0%, Индия — 5,8%, Россия — 3,9%, Япония — 3,7% и остальные страны мира — 41,5%. При этом для разных регионов мира источником генерации электроэнергии являются станции различного способа действия, и эти цифры существенно различаются (табл.1) [16, 17].

Таблица 1. Структура генерации электроэнергии, %

Table 1. Structure of electricity generation, %

Источник	Регион (2020 г.)				Мировое производство (2023 г. / 2024 г.)
	Россия	США	Европа	Азия	
Уголь	14,0	17,1	14,8	57,2	35 / 35
Природный газ	44,7	38,0	19,6	11,3	23 / 20
Возобновляемые (без ГЭС)	0,3	12,2	23,8	10,2	16,2 / 18,0
Гидроэлектростанции (ГЭС)	19,6	13,4	16,9	14,2	14 / 14
Атомная энергетика	19,9	17,9	21,6	5,1	9,1 / 9,0
Прочие	1,5	1,4	3,2	2,0	2,7 / 4,0

<https://dieselnet.com/news/2025/03iea.php> 02.04.2025

В 2024 г. вырос спрос на все виды ископаемого топлива: на природный газ на 2,7% (основной прирост — за счёт Китая), на уголь на 1,0% (основной потребитель — Китай 58%), на нефть на 0,8% (основные потребители — авиация и нефтехимия). Причём рост потребности обусловлен увеличением потребности на электроэнергию. Однако рост потребности (за 2024 года по сравнению с 2023 г.) в электроэнергии в основном отмечен в Китае (+2,9%), Индии (+4,9%), в США (+1,7%), в Юго-Восточной Азии (+4,2%), на Ближнем Востоке (2,2%), в Европе (+0,5%), а в Японии — снижение (на 1,2%).

С учётом объёма выработки электроэнергии, следует вывод, что 1) электроэнергия, основном, вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС) и 2) главными источниками является сжигание угля (за счёт Китая) и природного газа (за счёт США); доля России в отношении использования природного газа невелика, поскольку вклад России в общемировую выработку электроэнергии в 7 раз меньше, чем вклад Китая, и в 4 раза меньше, чем вклад США. Что касается ориентации на ВИЭ, то коэффициент использования установленных мощностей, например, ветрогенераторов всего 25%, что связано с незащищённостью этих видов электрогенерации от природных катаклизмов [18].

Таким образом, в настоящее время выработка электроэнергии на станциях сопровождается большим выбросом в атмосферу продуктов сгорания углеводородных топлив: угля и природного газа.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

Парниковый эффект — явление вторичного нагрева атмосферы длинноволновым (инфракрасным) излучением от поверхности планеты, возвращаемым обратно к поверхности некоторыми газами, находящимися в атмосфере. Парниковый эффект определяется разностью между средней температурой поверхности планеты (+15 °C) и её радиационной температурой в космосе (-18 °C). Соответственно парниковый эффект равен +33 °C. При усилении парникового эффекта температура поверхности растёт при сохранении постоянной радиационной температуры. Данный эффект вызывается наличием в атмосфере так называемых «парниковых газов» (ПГ): диоксида углерода CO₂, метана CH₄,

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

закиси азота N_2O , гидрофторуглеродов HFC, перфторуглеродов PFC и гексафторидов серы SF_4 [19]. Несмотря на наименьшую парниковую активность, наибольшее влияние на создание парникового эффекта оказывает диоксид углерода, массовый выброс которого в атмосферу наибольший — 68% суммарного выброса всех ПГ, поэтому и считают, что CO_2 имеет наибольшую «парниковую активность». И именно по количеству образующихся CO_2 классифицируют технологии получения водорода. На втором месте по парниковой активности стоит метан.

Однако в число ПГ не был включён водяной пар (трудно сказать почему), хотя водяной пар обладает существенно большей парниковой активностью по сравнению с CO_2 : парниковый эффект до 78% обусловлен парами воды и только на 22% диоксидом углерода, вклад других газов существенно меньше [20, 21]. При этом относительное содержание водяного пара в атмосфере составляет 0,2-2,5%, а диоксида углерода 0,03-0,05%; относительное содержание остальных парниковых газов не превышает $3 \cdot 10^{-4}\%$ [22, 23].

Выработка электроэнергии в мире, в основном, обеспечивается за счёт сжигания угля и природного газа. В результате чего в атмосферу выделяются и продукты неполного сгорания (частично окислившиеся углеводороды и метан в исходном виде, а также уголь в виде сажи), и продукты полного сгорания (CO_2 и H_2O). Хотя метан разлагается в атмосфере гораздо быстрее, чем CO_2 , но в первые 10 лет после выброса CH_4 его парниковая активность примерно в 80 раз сильнее, чем у CO_2 [23].

При выработке электроэнергии на атомных электростанциях, которая составляет заметную долю в масштабах таких регионов как США, Россия и Европа, то и в этом случае происходит большой выброс паров воды H_2O на градирнях в ходе охлаждения воды, используемой для охлаждения реакторов. При этом следует отметить, что каждая тонна пара, выброшенная из градирни в приземный слой атмосферы, где и образуется «парниковый эффект», эквивалентна по «парниковому эффекту» 360 кг углекислого газа. Соответственно, на каждый выработанный на атомных электростанциях кВт·ч электроэнергии в приземный слой атмосферы выбрасывается 3,6 кг водяного пара. [24].

Таким образом, если на ТЭС вместо углеводородного топлива будет сжигаться водород, то имеет место поступление в атмосферу паров воды — вещества, усиливающего «парниковый эффект». И хотя выброс продуктов сгорания и углеводородного топлива происходит в удалении от мест преимущественного проживания населения, но за счёт трансграничного перемещения воздушных масс все эти выбросы как в исходном виде, так и в виде кислот будут оказывать воздействие как на населённые пункты, так и на лесные угодья и сельскохозяйственные поля.

ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

На транспортных средствах для привода электродвигателя реализуется три способа: 1) применение гибридных моторных установок (ГМУ), когда ДВС, обеспечивает подзарядку ТАБ с помощью генератора, 2) подзарядка ТАБ от внешнего источника и 3) подзарядка ТАБ от топливных элементов [25]. Электромобили обычно обеспечивают плавную работу, хорошее ускорение при старте с места и требуют меньшего обслуживания, чем автомобили с ДВС. Однако у электромобилей есть три проблемы по сравнению с автомобилями: пробег на одной зарядке, инфраструктура и время подзарядки.

В случае применения ГМУ естественна эмиссия продуктов сгорания в атмосферу. Для снижения загрязнения атмосферы в этом случае возможно применение водорода в качестве альтернативного топлива. Организация рабочего процесса при этом обеспечивается посредством введения водорода во впускной коллектор, где он будет смешиваться с воздухом, и уже в виде водородо-воздушной смеси поступать в цилиндры двигателя. А дальнейшее протекание процесса воспламенения и сгорания будет зависеть от способа воспламенения: либо от свечи зажигания, либо вследствие сжатия смеси поршнем — в этом случае реализуется HCCI-процесс (Homogeneous Charge Compression Ignition) [25]. Но при реализации HCCI-процесса стабильность работы двигателя низкая [26, 27]. Однако в отработавших газах двигателя всё равно присутствуют вредные вещества (оксид углерода, дисперсные частицы, частично окислившиеся углеводороды) как результат сгорания смазочного масла, попадающего в камеру сгорания. Также в отработавших газах присутствуют оксиды азота: результат окисления азота кислородом (оба компонента присутствуют в воздухе) под воздействием высокой температуры в ходе процесса сгорания водорода.

Пробег на одной зарядке электромобиля определяется двумя факторами: емкостью полностью заряженного аккумуляторного блока и эффективностью его электрической трансмиссии. Для большинства электромобилей справедливо отношение: 3,0-6,0 км/(кВт·ч) за счёт ТАБ. При этом расход энергии зависит от таких факторов как температура ТАБ (желательно поддерживать постоянство температуры), поддержание климата в салоне (расход на подогрев или охлаждение салона в зависимости от внешних условий), стиль вождения (у каждого водителя свой стиль: у кого спокойный, у кого агрессивный), условия эксплуатации (электромобили имеют преимущество в условиях городского движения с частыми притормаживаниями и остановками, когда благодаря рекуперативному торможению происходит подзарядка ТАБ).

Подзарядка. Большинство электромобилей можно заряжать от сети переменного тока от розетки (120 В или 240 В), а некоторые — постоянным током. Однако, поскольку аккумуляторы могут хранить только постоянный ток, переменный ток необходимо преобразовать в постоянный, прежде чем его можно будет использовать для зарядки электромобиля с помощью бортового зарядного устройства. При напряжении в сети 110-120 В за 8-13 ч можно обеспечить зарядку аккумулятора для обеспечения пробега около 60 км. Скорость зарядки в этом случае ограничена количеством электроэнергии, доступной в розетке, а не емкостью бортового зарядного устройства электромобиля. Однако более высокие уровни разряда аккумулятора требуют пропорционально более длительного времени зарядки. При напряжении в сети 220-240 В и увеличивая силы тока до 80 А (в зависимости от транспортного средства), время зарядки может быть сокращено в 10 раз. Однако эта максимальная скорость зарядки редко достигается, поскольку способность преобразования переменного тока в постоянный становится ограничивающим фактором [28].

Таким образом, подзарядка ТАБ от внешних источников требует наличия развитой инфраструктуры зарядных станций и самих ТАБ, способных обеспечивать зарядку в короткое время и иметь высокую ёмкость. В противном случае использование электромобилей будет ограничено одним населённым пунктом и будет требовать больших затрат времени. Подзарядка же в ночное время от домашней электросети возможна только в частных домах — как это реализовать во многоэтажных домах представляется с трудом.

Учитывая размеры крупных городов, самым «зеленым» моторизованным видом транспорта в настоящее время является общественный электрический транспорт: трамваи, троллейбусы, метро, электробусы. Чем больше людей будет регулярно пользоваться общественным, а не личным моторизованным транспортом, тем меньше будет удельный выброс загрязняющих веществ на человека в городе, и по мере развития технологий более широкое применение найдут также различные виды шерингового транспорта, то есть совместно используемого по требованию [29].

Топливные элементы (ТЭ) представляют собой устройства для преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию, они обеспечивают выработку электроэнергии вследствие окислительно-восстановительных превращений реагентов, поступающих извне, вследствие чего происходит подзарядка аккумуляторов. В качестве реагентов используется водород и воздух (последний — как источник кислорода, что дешевле, чем применение чистого кислорода). В отличие от батареи, которая разряжается, пока она используется для питания электрических компонентов, ТЭ действуют как постоянно работающие источники энергии, пока им подается топливо. Ожидается, что водородный топливный элемент сможет преодолеть недостатки электромобилей, сделав водород транспортным топливом будущего.

Основные проблемы автомобилей с ТЭ, связаны с большими производственными и эксплуатационными затратами, с недостатком электрических мощностей для производства водорода и безопасностью его применения [23]. Совершенствование самого ТЭ и элементов инфраструктуры являются решающими факторами для коммерциализации водорода как моторного топлива на автотранспорте.

Транспортирование водорода на транспортном средстве возможно в топливной ёмкости. Однако низкая объемная плотность энергии водорода в условиях окружающей среды требует его хранения в баллонах высокого давления с рабочим давлением до 20,0-70,0 МПа, но даже при наибольшем давлении энергетическая плотность водорода составляет всего 4,4 МДж/л против 31,6 МДж/л для бензина. При использовании сжиженного водорода (охлаждённого до «минус» 253 °С) его энергетическая плотность увеличивается до

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

8,0 МДж/л. Однако сами процессы сжатия и сжижения требуют затрат энергии: при сжижении расход энергии составляет от 25 до 45% энергии сжижаемого водорода [30], что обуславливает дополнительный расход водорода и, соответственно, природных ресурсов на его выработку, а также выброс вредных веществ и «парниковых» газов в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной источник загрязнения атмосферы населенных мест, и особенно крупных городов, — это транспорт, численность которого в мире в настоящее время достигла почти 1,5 млрд единиц. Практически весь транспорт оснащён двигателями внутреннего сгорания (ДВС), в которых в качестве топлива используется углеводородное топливо: дизельное, бензин, а также природный и нефтяной газ. В процессе сгорания этих топлив образуются как вредные вещества, «парниковые» газы (в основном, диоксид углерода и метан), которые с потоком отработавших газов выбрасываются в атмосферу.

Применение на автомобилях гибридных моторных установок (ГМУ), представляющих собой сочетание ДВС и электродвигателя, позволит сократить эмиссию вредных веществ и «парниковых» газов в окружающую среду. Использование в ДВС в качестве топлива водорода позволит дополнительно сократить эмиссию вредных веществ, но увеличит эмиссию паров воды, которые по своей парниковой активности в три раза превосходят диоксид углерода. При этом переход полностью на электродвигатели позволит полностью исключить подобную эмиссию.

Однако водород в свободном виде в природе, аналогично, например, природному газу, практически не существует, и выработка водорода обеспечивается за счёт переработки углеводородных топлив, причём более чем на 90% — природного газа. В результате чего происходит образование как вредных веществ, так и «парниковых» газов, которые поступают в атмосферу и за счёт трансграничных потоков воздушных масс распространяются на многие сотни и тысячи километров, загрязняя огромные территории.

Работа электродвигателей обеспечивается посредством подзарядки тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ). При этом подзарядка ТАБ возможна за счёт работы ДВС (в составе ГМУ), от внешних электросетей, от топливных элементов (установленных на электромобиле). Наличие ДВС обуславливает эмиссию в атмосферу вредных веществ и «парниковых» газов, в том числе и в случае использования в качестве топлива водорода. Работа топливных элементов, использующих в качестве топлива водород, является экологически чистой. Однако в случае утечек водорода из топливной ёмкости (находящейся на борту транспортного средства) при взаимодействии с солнечным ультрафиолетовым излучением могут образовываться свободные радикалы водорода, что приводит к истощению озонового слоя. В связи с низкой объёмной энергетической плотностью водорода, его транспортировка возможна в сжатом (до 70,0 МПа) или сжиженном (охлаждённом до «минус» 253 °С) виде, что требует соответствующих затрат энергии: при сжижении расход энергии составляет от 25 до 45% энергии сжижаемого водорода. В случае транспортировании водорода в химически связанном виде в составе жидких гидридов (в основном, аммиака и метанола) требуются обеспечить транспортировку гидридного носителя к конечным потребителям с последующим возвратом дегидрированного носителя обратно на химический завод для загрузки водородом. И в случае транспортирования, и при использовании носителей они могут поступать в атмосферу.

Электрогенерация на станциях по выработке электроэнергии в мире в настоящее время обеспечивается (почти на 60%) за счёт сжигания угля и природного газа, сопровождающихся образованием вредных веществ и «парниковых» газов. При выработке электроэнергии на атомных электростанциях (около 10%) происходит выброс в атмосферу больших объёмов водяного пара (вследствие охлаждения охлаждающей реакторы воды в градирнях). Выработка электроэнергии с использованием солнечных батарей и ветрогенераторов (около 16%) зависит от природных условий и отличается высоким уровнем нестабильности, что позволяет использовать их установленные мощности не более, чем на 25%.

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что целесообразность применения водорода как энергоносителя для генерации электроэнергии сомнительна, поскольку суммарные затраты энергии для получения водорода и его последующего использования для выработки электроэнергии непропорционально велики по сравнению с его

энергосодержанием. При этом процессы получения, преобразования, транспортирования и использования водорода на транспорте сопровождаются эмиссией как вредных веществ, так и «парниковых газов».

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор одобрил рукопись (версию для публикации), а также согласился нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Автор заявляет об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы автор не использовал ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution: The author approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The author has no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Shchetina VA, Morgovsky YuYa, Center BI, Bogomazov VA. *Electric car: Technology and economics*. Leningrad: Mashinostroenie; 1987. (In Russ.)
2. When did the first electric cars appear. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://hi-news.ru/technology/kogda-poyavilis-pervye-elektromobili-istoriya-evolyuci.html>
3. The first electric tram. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://transsibinfo.com/news/2022-08-19/pervyy-elektricheskiy-tramvay-triumf-i-porazhenie-pirotskogo-1230761>
4. Clean Air Act (CAA) and Federal Facilities. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://www.epa.gov/enforcement/clean-air-act-caa-and-federal-facilities>

5. How many cars are there worldwide in 2024. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://daily-motor.ru/autonews/129744>
6. Grib N. Hydrogen energy: myths and reality. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://ngv.ru/upload/iblock/224/224b8a5647503ebe18e4180a43431d41.pdf> (In Russ.)
7. The EU hydrogen strategy has been published — details. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://renen.ru/opublikovana-vodorodnaya-strategiya-es-detali>
8. How hydrogen fuel will save the planet from global warming. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://plus-one.vedomosti.ru/blog/zelenaya-energiya-dlya-megapolisa>
9. Zeldovich YaB, Sadovnikov PYa, Frank-Kamenetsky DA. *Nitrogen oxidation during combustion*. Moscow, Leningrad: AN SSSR; 1947. (In Russ.)
10. The unflattering truth of blue hydrogen: analysis of CO₂ and CH₄ emissions of the "fuel of the future". [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://habr.com/ru/companies/ua-hosting/articles/573294>
11. Carcinogens: properties and danger of benzopyrene. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: https://medaboutme.ru/articles/kanserogeny_svoystva_i_opasnost_benzapirena
12. Sinyak YuV, Petrov VYu. Assessment of the impact of damage from environmental pollution on the competitiveness of hydrogen as a motor fuel, 2008. [Accessed: 30.08.2024] Available at: <http://library.vssc.ac.ru/Files/articles/124083314763-77.PDF>
13. Hydrogen classification by color. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/?ysclid=lu7v9u3eqv644594181> (In Russ.)
14. Hosseini SE, Wahid MA. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;57:850–866. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.112
15. The Green Hydrogen Problem No One Is Talking About. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: https://www.ruscable.ru/article/problema_zelenogo_vodoroda_o_kotoroj_nik/
16. Global Electric Power Industry Review 2024. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://aenert.com/ru/novosti-i-sobytiya/monitoring-novostei-ehnergetiki/n/globalnyi-obzor-ehlektroehnergetiki-2024-rekordnye-30-vozobnovljaemykh-istochnikov-ehnergii-v-mirovom-p/>
17. Electric Power Industry of the World. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: https://foxford.ru/wiki/geografiya/elektroenergetika-mira?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F
18. How Europe is freezing, abandoned to its fate by alternative energy. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://zen.yandex.ru/media/dbk/kak-zamerzaet-evropa-broshennaia-na-proizvol-sudby-alternativnoi-energetikoi-60265fab331cb7635255542e>
19. United Nations. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
20. Flint RF. *History of the Earth*. Moscow: Progress; 1978. (In Russ.)
21. Danilov-Danilyan VI, Losev KS. *Environmental challenge and sustainable development*. Moscow: Progress-Tradition; 2000. (In Russ.)
22. Mar KA, Unger C, Walderdorff L, Butler T. Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. doi: 10.1016/j.envsci.2022.03.027
23. Water vapor and the "greenhouse effect". [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://regnum.ru/news/innovatio/2086744.html>
24. Anisimov VR, Klimov AV. History of scientific research on vehicles with hydrogen power plants. *Izvestia MGTU "MAMI"*. 2023;17(2):127–135. doi: 10.17816/2074-0530-139224 (In Russ.)
25. *HCCI and CAI engines for the automotive industry*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2007.
26. Kavtaradze RZ. *Thermophysical processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen*. Moscow: MGTU im NE Bauman; 2011. (In Russ.)

27. Fomin VM. *Hydrogen energy of automobile transport*. Moscow: MGTU im NE Baumana; 2006. (In Russ.)
28. *AAA Electric Vehicle Range Testing*. New York: American Automobile Association; 2019.
29. Trofimenko Yu. "We do not expect a mass abandonment of offices and relocation to the countryside." [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://plus-one.vedomosti.ru/my-ne-ozhidaem-massovogo-otkaza-ot-ofisov-i-pereezda-za-gorod> (In Russ.)
30. Problems of hydrogen energy. [internet] [Accessed: 22.08.2024]. Available from: <https://dzen.ru/a/Xu4u4PHUUUhvLRIR> (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ / AUTHOR'S INFO

Кульчицкий Алексей Рэмович,
д-р техн. наук, заслуженный машиностроитель
РФ, доцент, старший научный сотрудник,
специалист по сертификации
конструкторского подразделения;
адрес: Россия, 600005, Владимир, ул.
Студенческая, д. 3/12;
ORCID: 0000-0001-9609-0829;
eLibrary SPIN: 6807-8316;
e-mail: ark6975@mail.ru

Alexey R. Kulchitskiy,
Dr. Sci. (Engineering), Honored Mechanical
Engineer of the Russian Federation, Assistant
Professor, senior research associate,
certification specialist of the Design Department;
address: 3/12 Studencheskaya st, Vladimir,
Russia, 600005;
ORCID: 0000-0001-9609-0829;
eLibrary SPIN: 6807-8316;
e-mail: ark6975@mail.ru