

УДК 629.33

DOI:10.46960/62045_2021_1_33

А.Д. Блинов, О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров
СРАВНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ТЕХНОЛОГИЙ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

Рассмотрены три альтернативные энергетические технологии применительно к автомобилю LADA Веста – две с традиционным двигателем внутреннего сгорания, работающие на стандартном бензине и сжатом природном газе (CNG), и одна, использующая батарею водородных топливных элементов. Каждый вариант моделируется для расчета мощности и затрат энергии, необходимых для нового городского цикла WLTC. В качестве критериев сравнения используются потребление первичной энергии (МДж/км) и выбросы углекислого газа (г/км). Также включается энергия, необходимая для добычи и переработки топлива.

Ключевые слова: автомобиль, природный газ, топливный элемент, водород, коэффициент полезного действия, энергия, парниковые газы.

Парижское соглашение с его глобальными амбициями и механизмом наращивания национальных вкладов решительно заявило: мир будет сопротивляться изменениям климата. Быстрый рост возобновляемых источников энергии наряду с сокращением доли угля лишь частично компенсировал растущий спрос на электроэнергию. Как потребность в энергии, так и выбросы углерода в последние годы растут самыми быстрыми темпами, а фактические темпы снижения парниковых газов значительно отстают от тех, которые предусмотрены Парижскими климатическими соглашениями. Возобновляемые источники энергии пока составляют относительно небольшую долю в производстве электроэнергии. Поэтому тот же результат по сокращению выбросов углерода можно было бы достичь, заменив около 10 % угля в энергетическом секторе природным газом. Сопоставим с генерацией электроэнергии и вклад транспортного сектора 27 % [1]. Можно ли здесь рассчитывать на улучшение за счет перехода на альтернативное топливо? Внедрение альтернативных видов топлива, таких как сжатый природный газ, можно рассматривать в качестве будущего транспортного топлива. Однако было бы неверно останавливаться только на углеводородных источниках, желателен поиск иных возможных альтернатив. Под такой альтернативой все чаще рассматривается водород, экологически чистый вторичный источник энергии, который формально можно получать исключительно из возобновляемого сырья. В транспортных средствах водород рассматривается не как топливо для двигателей внутреннего сгорания, а как топливо для прямого преобразования его энергии в электрическую с использованием топливных элементов.

В настоящей работе проводится многокритериальное сравнение трех различных технологий транспортных средств (табл. 1), прежде всего, для городской эксплуатации. Анализ позволил в той или иной степени определить условия, при которых будут жизнеспособны транспортные средства на топливных элементах; в том числе, с учетом метода производства водорода на выбросы CO₂.

В качестве базового транспортного средства (авто I) выбран стандартный автомобиль LADA Vesta, с двигателем внутреннего сгорания мощностью 78 кВт при 5800 мин⁻¹, работающий на бензине [2]. Средний пробег за год примем 15 000 км, срок службы ограничим до 10 лет (при большем пробеге пришлось бы учитывать, что топливный элемент по истечении 150 000 км пробега выработает ресурс и потребует замены).

Таблица 1.
Характеристики сравниваемых технологий

Тип	Источник энергии	Топливо	Хранение
авто I	ДВС	бензин	жидкий
авто II	ДВС	природный газ	сжатый
авто III	топливный элемент	водород	сжатый

Вариант II копирует автомобиль *LADA Vesta CNG*, который выпускается серийно и является двухтопливным автомобилем, способным передвигаться как на бензине, так и газе [2]. Он оснащен газоподающей системой с электронным управлением, обеспечивающей работу двигателя на сжатом природном газе (КПГ или *CNG*). Баллон объемом 90 л закреплен за спинкой второго ряда сидений и при полной заправке находится под рабочим давлением 20 МПа. На прототипе, *LADA Vesta CNG*, блок управления в зависимости от нагрузки на двигатель вместе с газом в небольших количествах (в среднем 1:4 по массе) подает бензин. В расчетах предполагается, что авто II движется исключительно на газе.

Вариант III предполагает в качестве силовой установки батарею топливных элементов, работающих на водороде. Самыми распространенными являются топливные элементы с протонообменной мембраной. Водород в ячейках окисляется кислородом воздуха, подаваемым отдельным компрессором, с выделением электронов. Продуктом реакции является вода, что позволяет считать выбросы от таких установок полностью нулевыми. Электроны, идущие по внешней цепи, формируют электрический ток, подаваемый на тяговые электродвигатели автомобиля.

Для хранения водорода может использоваться та же конструкция газового баллона, что и для КПГ, тогда при давлении 20 МПа в нем может храниться 1,62 кг водорода. Плотность водорода очень мала, и для повышения запаса топлива на борту в мире практикуется использование для водорода специальных баллонов с давлением 35 или даже 70 МПа [3]. Специально созданная комиссия при департаменте энергетики США с некоторым сомнением рассматривает перспективность таких систем хранения [4] поскольку доля водорода от массы баллона едва приближается к отметке 5,5 %. Однако, даже несмотря на высокую теплопроводность водорода, 1,62 кг – немного. Поэтому в расчете примем баллон с рабочим давлением 35 МПа массой 90 кг, в котором можно разместить 2,83 кг водорода. Энергопотребление автомобилей оценивалось из предположения, что транспортное средство движется по определенному циклу. Долгое время основным являлся новый европейский ездовой цикл *NEDC* имитирующий движение как в городе, так и за городом. Однако, созданный более полувека назад, он стал совершенно нетипичен для современных условий движения. В качестве альтернативы экспертами стран ЕС, Японии и Индии разработана новая процедура испытаний *WLTP* (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*) [5]. Она предполагает три возможных класса испытаний с соответствующими циклами испытаний *WLTC* в зависимости от энерговооруженности автомобиля. В качестве критерия выбрано отношение номинальной мощности двигателя к снаряженной массе транспортного средства – *PWR*. Так, энерговооруженность автомобиля *LADA Vesta* с бензиновым двигателем составляет 61 кВт/т. Как и наибольшее число современных ТС с ДВС, они попадают в третий класс с удельной мощностью $PWR > 34$ кВт/т. Цикл движения *WLTC* класса 3 характеризуется средней скоростью 46,8 км/ч, максимальной скоростью 130 км/ч и ускорениями до $1,8 \text{ м/с}^2$. Его протяженность 23,4 км, а длительность 1800 с (рис. 1). Расчетная полная масса автомобилей m_{total} принимается в зависимости от типа авто. Она включает в себя массу автомобиля без силовой установки и трансмиссии, массу энергоустановки (ДВС и КПГ в случае авто I и II; батареи топливных элементов, электромотора, тягового аккумулятора и инверторов для авто III), массу бака с топливом (для авто I) или баллона с газом (для авто II и III), массу водителя и одного пассажира.

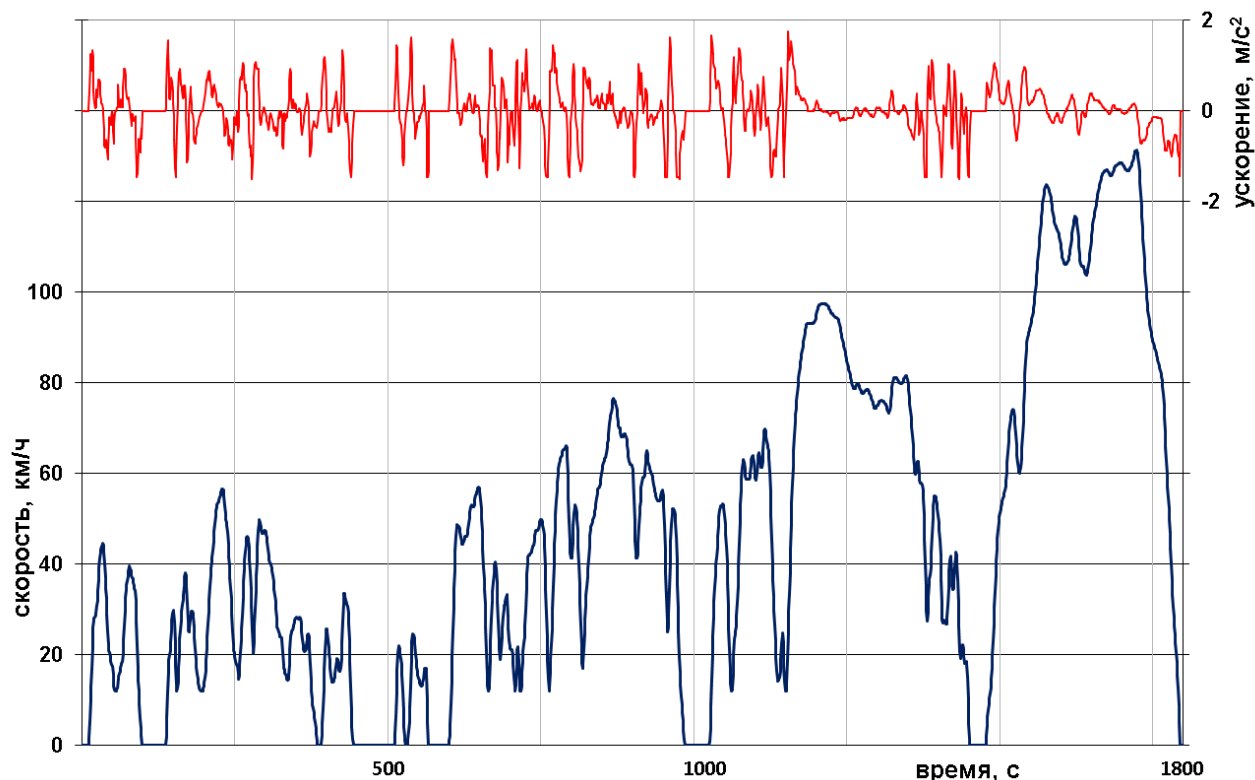


Рис. 1. Цикл испытаний WLTC класс 3 для ТС с удельной мощностью $PWR > 34$ кВт/т

Коэффициенты сопротивления качению, аэродинамического сопротивления, фронтальная площадь транспортного средства принимаются одинаковыми для всех авто. Считаем, что транспортное средство движется по дороге с нулевым уклоном, а в случае ТС на топливных элементах рекуперативное торможение не используется.

В этом случае на автомобиль будут действовать три силы:

- 1) сопротивление трению качения $F_{frict} = m_{total} g C_r$;
- 2) аэродинамическое сопротивление, рассчитываемое как $F_{drag} = 0.5 \rho A v(t)^2 c_x$;
- 3) инерционная сила $F_{inert} = m_{total} a$, где ускорение определяется как $a = \frac{d(v(t))}{dt}$.

Результирующая сила, действующая на транспортное средство, является суммой всех вышеуказанных сил $F_{total} = F_{drag} + F_{frict} + F_{inert}$. Требуемая мощность на колесах рассчитывается как $P_{wheel}(t) = F_{total}(t) \times v(t)$.

Данные, использованные для расчета мощности на колесах, приведены в табл. 2. Изменение мощности на колесах для авто I при движении по циклу показано на рис. 2. Расход энергии топлива рассчитывается исходя из потребной мощности на колесах с учетом КПД двигателя и трансмиссии. Изменение КПД двигателя внутреннего сгорания, работающего под нагрузкой, было усреднено для условий ездового цикла, и показано на рис. 3. Принято, что для двигателя, работающего на природном газе, зависимость КПД от нагрузки осталась той же. Теплотворность бензина принята 43 МДж/кг, природного газа – 48 МДж/кг. Данные об эффективности топливного элемента взяты из базы данных ADVISOR [6] и скорректированы по результатам собственных исследований [7] (рис. 3). Теплотворность водорода принята 120 МДж/кг.

Для авто III трансмиссия одноступенчатая с КПД=0,94. Электродвигатель (45 кВт, массой 45 кг) имеет очень «ровную» характеристику КПД, что позволяет принять его равным 0,9. Предусмотрен форсированный режим, кратковременно допускающий мощность

электродвигателя до 75 кВт, что необходимо для придания автомобилю требуемой динамики. Мощность топливного элемента можно сократить до 50 кВт для снижения массы, а недостающую мощность можно брать из накопительных аккумуляторов относительно небольшой емкости. Они заряжаются при торможении транспортного средства, а расходуются только при разгонах с максимальными мощностями, т.е. относительно редко и недолго. Их массы (топливный элемент 150 кг, аккумуляторы и инверторы 35 кг) получены из базы данных *ADVISOR* [6].

Таблица 2.
Данные для расчета потребной мощности

Параметр	Авто I	Авто II	Авто III
Плотность воздуха ρ (кг/м ³)	1,2	1,2	1,2
Коэффициент сопротивления c_x	0,38	0,38	0,38
Коэффициент сопротивления качению c_r	0,011	0,011	0,011
Фронтальная площадь A (м ²)	2,11	2,11	2,11
КПД трансмиссии	0,92	0,92	0,94
Масса без двигателя и трансмиссии (кг)	1000	1000	1000
Масса силового агрегата и трансмиссии (кг)	140	140	230
Масса пассажиров (кг)	160	160	160
Масса баллонов (бака) + топливо (кг)	10+40	73+12	90+2,83
Масса полная m_{total} (кг)	1350	1385	1483

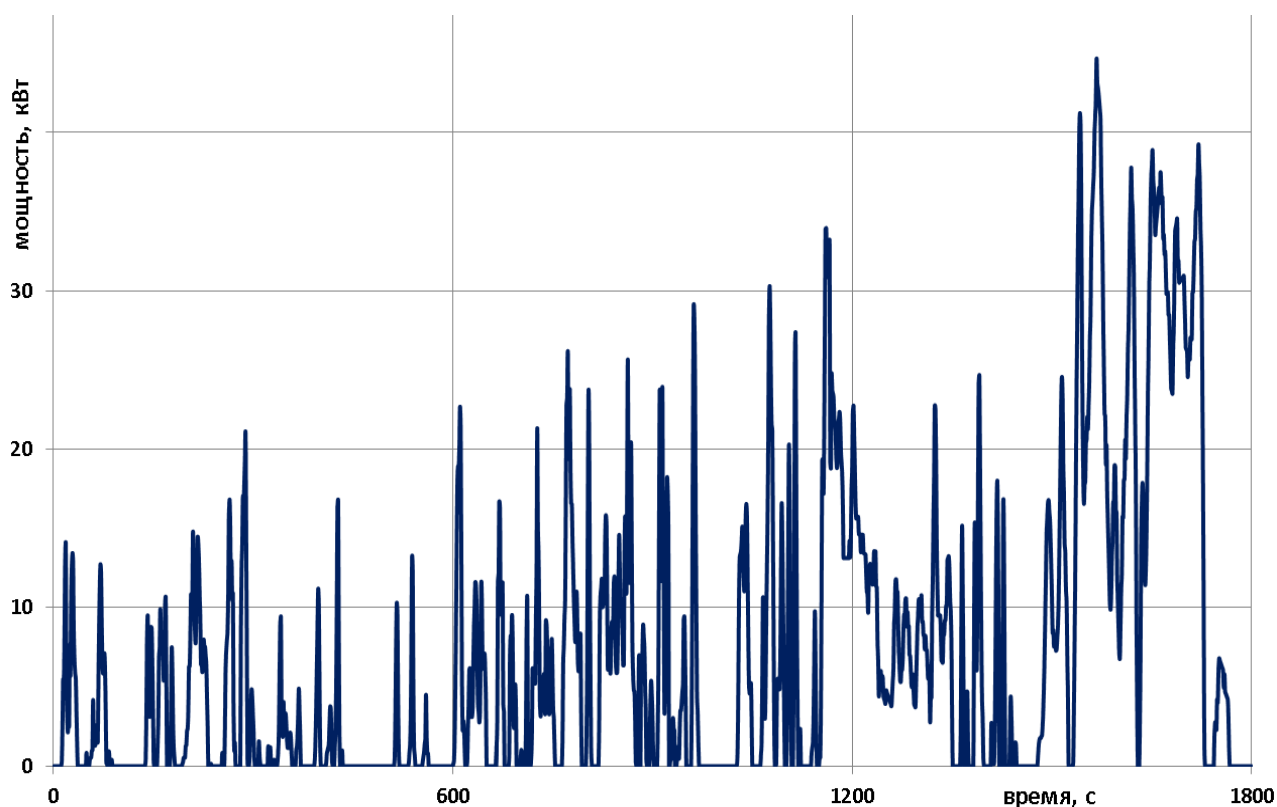


Рис. 2. Мощность на колесах при движении по циклу авто I

Результаты энергетического анализа для всех вариантов транспортных средств сведены в табл. 3.

Таблица 3.
Результаты энергетического анализа движения транспортных средств

Параметр	Авто I	Авто II	Авто III
Полная масса m_{total} (кг)	1350	1385	1483
Расход энергии топлива на цикл движения WLTC3 (МДж)	62,056	62,700	39,259
Потребление энергии в движении (МДж/км)	2,652	2,679	1,677
Дальность движения на баке (км)	650	215	202
Расход топлива (г/км)	61,5	55,8	13,99

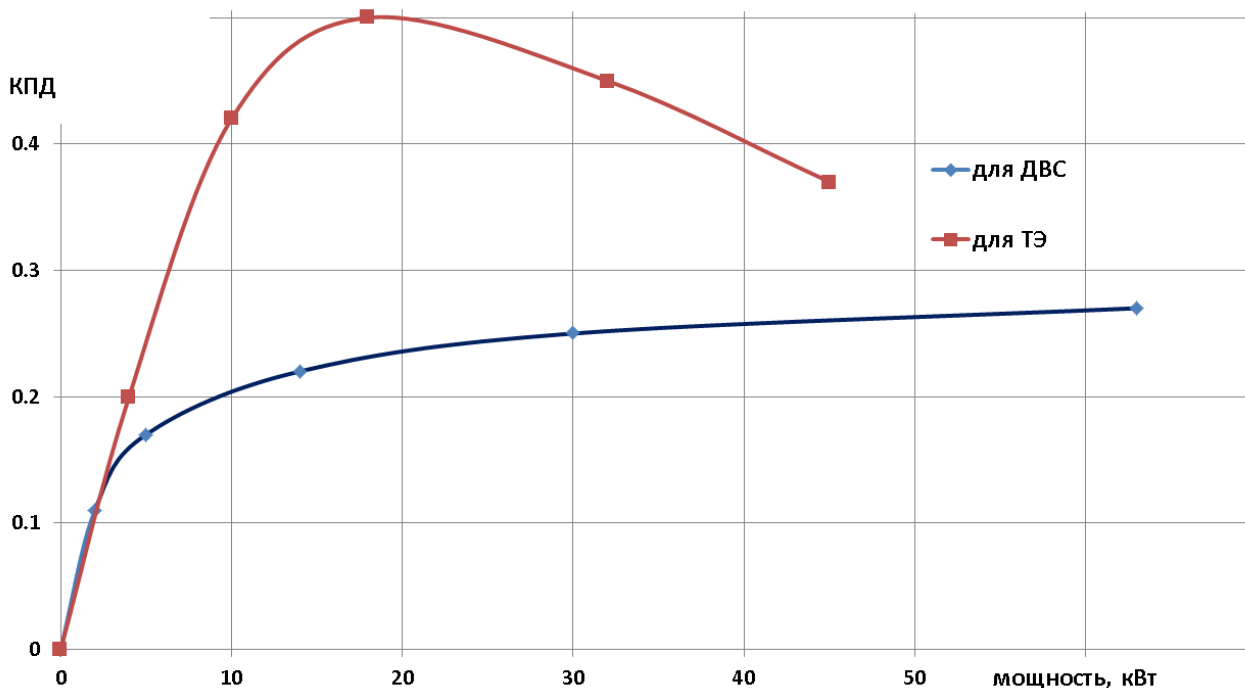


Рис. 3. Кривая усредненной эффективности в зависимости от отбираемой мощности для двигателя ВАЗ 21129 и водородного топливного элемента

Для определения полных затрат к энергии топлива, полученной выше, добавлены затраты энергии на производство самого автомобиля и его основных компонентов. При производстве самого автомобиля, его экипажной части, энергия затрачивается на производство материалов, механическую обработку, сборку, отопление цехов. Чем проще конструкция, чем более технологичны примененные материалы (например, кузов из стали по сравнению с алюминиевыми сплавами) тем меньше затраты энергии на производство и меньше выбросы CO_2 . Для автомобиля с бензиновым двигателем, и с электроприводом эти затраты очень близки. Результаты последнего исследования, проведенного в 2010 г. в Арагонской национальной лаборатории США, таковы: затраты энергии на полный цикл производства автомобиля с двигателем внутреннего сгорания составляют 33,92 ГДж [8]. Считаем эти затраты одинаковыми для всех трех автомобилей.

Отдельно считаем затраты на изготовление топливных элементов. Их производство сопряжено с большим числом высокотехнологичных операций и дорогостоящих материалов. По данным [9], потребление первичной энергии для производства топливного элемента составляет 1446 МДж на кВт установленной мощности. На производство самого топлива, его доставку до заправочного пистолета также затрачивается энергия. Дешевле всего обходится природный газ, который почти не требует технологических операций кроме добычи и транспортировки по трубам. Здесь расходуется электроэнергия ($3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/1000 \text{ м}^3$) и тепловая энер-

гия, полученная от сжигания самого газа (504 Мкал/1000 м³). Кроме этого 2,73 % газа расходуется на собственные нужды станций [10]. В сумме это представляет 3,12 МДж энергии, затраченной на 1 кг природного газа, что эквивалентно выбросам 180 г СО₂ на 1 кг газа.

Производство бензина более затратное. На один килограмм конечного продукта на этапах добычи, транспортировки нефти, технологических процессов разгонки на НПЗ расходуется в среднем 6,81 МДж тепловой и электрической энергии. В пересчете это соответствует выбросам 757 г СО₂ на 1 кг бензина. Лидирует по затратам энергии водород, основная масса которого в мире производится методом паровой конверсии метана (SMP). Эффективность самой технологии можно принять равной 68 % [11]. Энергетические затраты соответствуют 188 МДж/кг Н₂ или 11,9 кг СО₂/кг Н₂. У транспортных средств, работающих на газообразном топливе, есть еще одна статья расхода энергии – работа на закачку газа в баллоны. Работа компрессоров рассчитывается исходя из 65% эффективности процесса. Чем выше давление в баллонах, тем больше затраты энергии на сжатие.

В результате энергетического анализа различных транспортных технологий (табл. 4) видно, что транспортные средства на топливных элементах (авто III) имеют более низкое потребление первичной энергии на движение (1,677 МДж/км), что объясняется более высокой эффективностью топливных элементов при преобразовании энергии водорода в электрическую. Наибольшее потребление первичной энергии имеет авто II из-за большой массы баллона для КПП. Однако при учете всех затрат на производство автомобиля, его компонентов, топлива и собственно движение, автомобиль на природном газе (авто II) является лидером, бензиновый (авто I) отстает на 4,5 %, а автомобиль на топливных элементах (авто III) – на 38 %.

Таблица 4.
Энергетический анализ различных транспортных технологий

Параметр	Авто I	Авто II	Авто III
Топливо	бензин	КПП	водород
Запас топлива (кг)	40	12	2,83
Дальность движения (км)	650	215	202
Потребление энергии в движении (МДж/км)	2,652	2,679	1,677
Затраты энергии при изготовлении автомобиля (МДж/км)	0,23	0,23	0,23
Затраты энергии при изготовлении топливных элементов (МДж/км)	-	-	0,482
Затраты энергии на получение топлива (МДж/кг)	6,81	3,12	188
Затраты энергии на получение топлива (МДж/км)	0,42	0,174	2,58
Затраты энергии на сжатие газа (МДж/км)	-	0,07	0,15
Суммарные затраты энергии (МДж/км)	3,302	3,153	5,119

Что касается выбросов СО₂ в атмосферу, то понятно, что автомобиль с топливными элементами не выбрасывает СО₂ в движении. Природный газ в основном состоит из метана, имеющего самую низкую долю углерода – 0,75 по массе (против 0,85 у бензина). Это дает ему перед бензином неоспоримое преимущество.

Иная картина на этапе производства. В табл. 5 приведены выбросы от различных технологических процессов. В тех из них, где расходуется электроэнергия, а это практически все процессы машиностроения, принята «смесь» первичных источников, характерная для России. В производстве электроэнергии доминируют тепловые электростанции – 68 % выработки, на втором месте атомные – 17 %, на третьем ГЭС – 15 %. Электростанций, работающих на возобновляемых источниках, у нас нет. Среди ТЭС доля работающих на природном газе 71 %, на угле 27 %, остальные на мазуте. Средний выброс углекислого газа составляет 400 г/кВт*ч. Средняя эффективность преобразования первичной энергии сжигаемых топлив в электрическую равна 35 %. Результат приведен в табл. 6.

В качестве заключения можно подчеркнуть, что водород – не источник энергии, это промежуточный продукт преобразования других источников энергии в химическую энергию. Водород нужно производить и преобразовывать, и то и другое требует затрат. Главным образом от сжигания ископаемых топлив. Есть и иные способы получения водорода. Так 4 % водорода получают из воды посредством электролиза. Однако себестоимость производства водорода из воды (различные виды электролиза) в 3...6 раз выше, чем получение водорода из природного газа. Этот метод используют лишь тогда, когда необходимо получить особо чистый водород.

Таблица 5.
Выбросы CO₂ от различных технологических процессов

Источник	Значение	Единица измерения
Добыча природного газа	180	г/кг CH ₄
Выработка электроэнергии	400	г/кВт*ч
Получение бензина	757	г/кг бензина
Получение водорода методом <i>SMP</i>	11900	г/кг H ₂
Изготовление топливных элементов	161000	г/кВт
Изготовление автомобиля	3000000	г/шт

Таблица 6.
Суммарные выбросы CO₂ от различных транспортных технологий (г/км)

	Сжигание топлива в движении	Производство топлива	Изготовление автомобиля	Изготовление топливных элементов	Закачка газа в баллон	Общее количество выбросов CO ₂
Авто I						
Авто II	191,5	46,5	20	-	-	258
Авто III	153,3	10,0	20	-	7,8	191,1
	-	163,4	20	53,5	16,7	253,6

Многие рассчитывают на получение дополнительного эффекта от применения водородных технологий, в частности, в том, чтобы использовать возобновляемую энергию, ветра или солнца, и с ее помощью получать водород из воды посредством электролиза. Эффективность ветровой турбины может составлять 30...40 %, достигая КПД производства водорода 25 % в полном цикле. Другими словами, надо затратить 3 единицы энергии ветра, чтобы получить 1 единицу водородной энергии. Лучшие промышленные солнечные батареи имеют КПД 10 %, что соответствует затратам 9 единиц солнечной энергии на получение 1 единицы водородной энергии. Если использовать морские водоросли, которые синтезируют водород как побочный продукт, КПД равен примерно 1 %. Таким образом, производство водорода из воды – чистая потеря энергии. Конечно, нам возразят, что энергия солнца даровая. Но не будет ли эффективнее использовать солнце в качестве нагревателя, например, для двигателя Стирлинга, приводящего обычный электрогенератор и имеющего КПД около 30 %? Следует вспомнить и Менделеева, который говорил: «...топить можно и ассигнациями...» и признать, что природный газ также слишком ценное сырье, чтобы делать из него водород.

Самый сложный вопрос подобного анализа – стоимость проектов. Много информации все еще скрыто от рядовых потребителей. Понятно, что производство новых технологий стоит несравнимо дороже, чем традиционных ДВС или электрогенераторов. В этой связи производство автомобиля, работающего на природном газе, не настолько затратное, чтобы его нельзя было признать конкурентным по отношению к традиционному бензиновому. Этого нельзя сказать про автомобили на водороде [12-14]. Есть целый ряд зарубежных обзоров, в которых проводится сравнение стоимостей. Даже те, которые откровенно выглядят предвзя-

тыми, признают, что стоимость 1 км пробега автомобиля с топливными элементами на борту выше в 5 раз относительно бензина и в 10 раз относительно природного газа.

Заключая, отметим, что пока выпуск очень дорогих и не очень функциональных транспортных средств, рентабельных только за счет субсидий, выглядит исключительно как способ вынести загрязнения из мегаполисов. Никто не будет обманут официальными цифрами официальных производителей. Один из них, Генеральный директор *Fiat Chrysler*, об электрическом хэтчбек *Fiat 500e* прямо сказал: «Надеюсь, вы не купите его, потому что каждый раз, когда я его продаю, это обходится мне в 14 000 долларов» [15]. При этом добавил: «Я достаточно честен, говоря это вам».

Библиографический список

1. CO2 EMISSIONS FROM CARS: the facts [Электронный документ]. Режим доступа: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_04_CO2_emissions_cars_The_facts_report_final_0_0.pdf (дата обращения 5.02.2021).
2. LADA VESTA СЕДАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lada.ru/cars/vesta/sedan/manual.html> (дата обращения 15.02 2021).
3. Energy Efficiency Renewable Energy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/XDfDo> (дата обращения 15.02 2021).
4. U.S. department of energy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clck.ru/XDetj> (дата обращения 15.02 2021).
5. DRIVE CYCLES AND SHIFTING PROCEDURES [Электронный документ] Режим доступа: <https://clck.ru/XDeV8>. (дата обращения 15.02 2021).
6. NREL, Vehicle system analysis homepage- Advisor, website, [Электронный документ] // Режим доступа: <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/advisor.html>, Site visited (дата обращения 15.02. 2021).
7. ПНИЭР: «Разработка научно-технических решений в области создания перспективной линейки электроплатформ для коммерческих автомобилей с автономными источниками энергии, адаптированных для применения систем беспилотного управления», Соглашение № 14.577.21.0268
8. Миловидов, В. Далеко ли уедет элетромобиль? [Электронный документ]/ В. Миловидов Режим доступа: <https://www.if24.ru/daleko-li-uedet-elektromobil/> (дата обращения 15.02.2021).
9. Pehnt, M., Life cycle analysis of fuel cell stacks [Текст] / М. Pehnt // International Journal of Hydrogen Energy. 2001. № 26. P. 91-101.
10. Важенина, Л.В. Оценка эффективности стратегий в энергетическом секторе России / [Текст] / Л.В. Важенина, Е.М. Глухова, М.В. Дубровина // Проблемы формирования единого пространства экономического и социального развития стран СНГ (СНГ-2016). Материалы международной научно-практической конференции. – Тюмень: Изд-во ТИУ, 2016. С. 79-84.
11. Rosen, M.A. Thermodynamic investigation of hydrogen production by steam-methane reforming [Текст] / М.А. Rosen // International Journal of Hydrogen Energy. 1991. № 16. P. 207-217.
12. Полякова, Т. В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики [Текст] / Т.В. Полякова // Вестник МГИМО Университета. 2012. № 1 (22). С. 156-164.
13. Тихомирова О.Б. Энергетическая эффективность электротранспорта [Текст] / О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров // Транспортные системы. 2018. № 1 (7). С. 7-14.
14. Тихомиров, А.Н. Вопросы выбора мощности вспомогательной энергоустановки транспортной электроплатформы [Текст] / А.Н. Тихомиров, В.В. Щербаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2018. № 2 (121). С. 196-201.
15. Car and driver magazine [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.caranddriver.com/fiat-chrysler-ceo-sergio-marchionne-on-fiat-500e-ev-dont-buy-it/> (дата обращения 15.02.2021).