

УДК 621.3:621.4

Филиппов Павел Игоревич, студент
(КузГТУ, г. Кемерово)

Бородин Данил Игоревич, студент
(КузГТУ, г. Кемерово)

Елкин Иван Сергеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)

Filipov Pavel Igorevich, student
(KuzSTU, Kemerovo)

Borodin Danil Igorevich, student
(KuzSTU, Kemerovo)

Elkin Ivan Sergeevich, associate professor, candidate of engineering
sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА XXI ВЕКА

FUEL AND ENERGY PROBLEMS OF TRANSPORT IN THE XXI CENTURY

Аннотация

Приводится сравнение эффективностей различных видов силовых установок, используемых для современного автотранспорта, на основе анализа условий технологий добычи и переработки топлива, эффективности его использования в энергетических установках автомобиля.

Annotation

A comparison of the efficiency of different types of power plants used for modern motor vehicles, based on an analysis of the conditions of production and processing technologies of fuel, the efficiency of its use in the power plants of the car, is given.

На сегодняшний день у современного бензинового двигателя КПД может достигать 40 % по данным заявленным компанией Toyota [1]. Для питания системы охлаждения, генератора уходит примерно 2%, тогда КПД подобного двигателя – 38 %. У современных ДВС появились: система дожигания выхлопных газов (часть не сгоревшего топлива попадает обратно в камеру сгорания); электронная система управления работой клапанов, что дает возможность моментального изменения конфигурации ГРМ (газораспределительный механизм), перехода от цикла Отто к циклу Аткинсона и обратно; более эффективный турбонаддув (большая часть энергии отработавших газов создает повышенное давление в камере сгорания, что

повышает КПД двигателя); более низкая масса ДВС (меньше вес – меньше потерь); уменьшены потери на трение (в основном за счет использования новых составов смазочных материалов и использования материалов с меньшим коэффициентом трения). Для дизельного ДВС КПД составляет 50% по данным, представленным компанией Volvo [2], а для электродвигателя – 90–95% [3]. Однако не все так однозначно. Чтобы определить, какой из силовых агрегатов является действительно наиболее эффективным, экономичным, необходимо рассмотреть все технологические аспекты получения топлива и эффективность его использования в энергетических элементах автомобиля.

Для упрощения расчетов рассмотрим КПД получения электроэнергии топлива с момента, когда сырье уже добыто и находится на электростанции, заводе по переработке.

Для электромобилей требуется электроэнергия. В 2021 году доля топлива для выработки электроэнергии выглядит так: нефть – 31%, уголь – 27%, газ – 25%, гидроэнергетика – 6,88%, ядерная энергия – 4%, «зеленая энергия» – 5,12% [4]. КПД ТЭС, где происходит сжигание нефти, угля, газа, 35 – 40%, где для нефти – 35%, для угля – 35%, для газа – 40% [5]. КПД АЭС составляет не более 35% [6]. КПД ГЭС в данном случае можно не учитывать, т.к. на ней топливо не расходуется, это справедливо и для электростанций на ВИЭ. Таким образом, умножив долю каждого вида топлива на КПД электростанции, где оно используется, получаем 44% энергии.

Далее электричество необходимо доставить до потребителя. На рис. 1 представлена классическая схема электропередачи от производителя до потребителя. КПД повышающей подстанции 97%, КПД ЛЭП 93%, КПД понижающей подстанции 97%, КПД низковольтных городских линий 94%. На этом этапе получаем 37% энергии от выработанной на электростанциях [7].

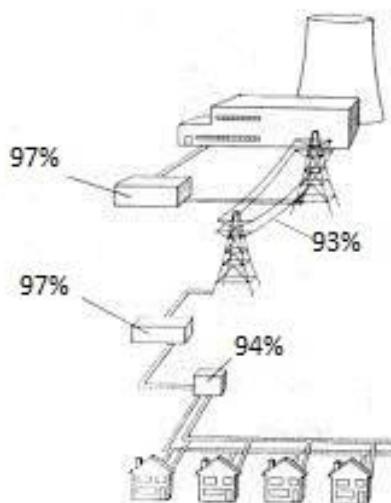


Рис. 1. КПД передачи электроэнергии от электростанции до потребителя

КПД зарядной станции для электромобиля составляет приблизительно 95% по данным, приведенным в [8].

Для автомобилей, оснащенных ДВС, требуется переработанная нефть. В 2020 году глубина переработки нефти (величина, показывающая отношение объема продуктов переработки нефти к общему объему затраченной при переработке нефти) в среднем по миру составляет 85% [9]. Нефть – это смесь углеводородов. На НПЗ происходит расщепление нефти на компоненты в следующей пропорциях. Из одного барреля нефти (159 л) можно получить: 75–102 л бензина, 30–40 л дизельного топлива, 15–25 л авиакеросина, 7–11 л (пропана, бутана), 8–10 л нефтяного кокса, 6–7 л мазута, 5,3 л сырья для асфальта (битум, гудрон и т. д.), 4 л сырья для пластмассы, 1–1,5 л смазочных материалов, 0,7 л бытового керосина, 15 парaffиновых свечей или 120 свечей для торта [10]. Считать, что для получения 10 л бензина необходимо 21,13 л нефти (с учетом глубины переработки), будет неверно, так как помимо 10 л бензина будет произведено еще некоторое количество ценных углеводородов. Автомобилю необходим конкретный углеводород, следовательно, будет правильно рассчитать глубину переработки только для него. Чтобы получить 1 л бензина (9,028 кВт·ч), необходимо сжечь 0,176 л нефти (1,642 кВт·ч или 18%). Доставка от НПЗ до АЗС требует небольших потерь, расход грузовика, 18 т или 21700 л топлива, составит 25,5 л/100 км, при пробеге 1000 км, автоцистерна потратит 255 л дизеля, или 0,01 л дизеля на перевозку 1 л бензина (0,097 кВт·ч/л или 1%). Здесь нами приведена примерная оценка пути, способ доставки с использованием метода Ферми. Здесь приведены подсчеты для самого неэффективного варианта транспортировки топлива.

Для того чтобы перелить топливо из бака АЗС в бак автомобиля, тоже нужна некоторая энергия, но каких-либо данных по этому вопросу не найдено. Однако из практики известно, что бак автомобиля емкостью 50 л заполняется за 1 мин, что соответствует 3000 л/ч. Насос с таким показателем имеет потребляемую мощность примерно 60 Вт, что соответствует 0,02 Вт·ч/л с учетом потерь электроэнергии от сжигания топлива до АЗС – 0,0317 Вт·ч/л или 0,3%. Далее энергия, требуемая для подачи топлива из бака в двигатель, уже входит в его КПД, указанный выше. Получаем, что для 1 л бензина, прошедшего от НПЗ до автомобиля, необходимо затратить 1,77 кВт·ч или 19% от энергии 1 л бензина.

Перейдем к сравнению. Здесь приведем результаты расчетов для 10 л бензина. Для этого нам необходимо потратить 17,7 кВт·ч + 90,28 кВт·ч энергии самого бензина, получим 107,98 кВт·ч энергии, что по энергетической ценности и по пропорциям производства электроэнергии соответствует: 2,98 кг нефти, 3,63 кг угля, 2,88 кг газа, $2,1 \cdot 10^{-7}$ кг урана. Так как ГЭС и электростанции на ВИЭ не используют топливо, то им необходимо выработать 7,42 кВт·ч и 5,52 кВт·ч соответственно. Далее реализуя такой объем топлива на электростанции, произведут 47,32 кВт·ч. После чего идут

потери: 3% – повышающая подстанция, 7% – ЛЭП, 3% – понижающая подстанция, 6% – городские линии, 5% – на зарядной станции, получаем 36,9 кВт·ч – зарядка аккумулятора электромобиля. Для чистоты теоретического эксперимента будем все рассчитывать для автомобиля D класса (полноразмерный автомобиль), в среднем масса таких автомобилей составляет 1300–1800 кг. Возьмем два идентичных автомобиля, но в один установим электромотор и его компоненты, в другой ДВС, бак, автомобильный аккумулятор, трансмиссию. Пусть изначальная масса автомобиля без силовой установки будет 1255 кг, тогда для автомобиля, оснащенного ДВС, финальная масса равна 1255 кг + 180 кг (масса мотора и трансмиссии) + 5 кг (масса бака на 60 л) + 20 кг (масса аккумулятора) + 50 кг (масса коробки передач), что составит 1510 кг. Масса аналогичного по мощности электромобиля равна 1255 кг + 150 кг (электромотор) + 135 кг (инвертор, трансмиссия и т. д.) + 310 кг (75 кВт·ч) составит 1850 кг. Потери в трансмиссии могут отличаться на 5%. Разницу масс можно выразить как $m_{\text{эл}}/m_{\text{двс}} = 1,225$. Какая зависимость необходимой работы для перемещения на одинаковое расстояние тела с большей массой, т.к. работа – это сила, умноженная на расстояние, а сила – это масса, умноженная на ускорение, получим, что при увеличении массы (при равном ускорении) требуемая работа пропорционально увеличивается. Это значит, что при прочих равных электромотору необходимо совершить на 20% больше работы. В баке автомобиля 10 л бензина или 90,28 кВт·ч, в аккумуляторе электромобиля 36,9 кВт·ч с учетом КПД силовых установок: ДВС – 38,8%, трансмиссия – 95%; электродвигатель – 95%, инвертор – 95%. ДВС совершил работу в 33,25 кВт·ч, а электромотор в 33,3 кВт·ч. Теперь выразим это в пройденное расстояние с учетом отношения масс, при прочих равных, получим

$$\frac{A_{\text{двс}} m_{\text{эл}}}{A_{\text{эл}} m_{\text{двс}}} = \frac{S_{\text{двс}}}{S_{\text{эл}}} = 1,22 .$$

Таким образом, затратив одинаковое количество энергии в топливном эквиваленте с учетом того, что топливо (сырье) добыто и доставлено на электростанцию, НПЗ, автомобиль, оснащенный бензиновым ДВС, проедет дальше на 22%. Однако это приведены расчеты в «сферическом вакууме». В реальных эксплуатационных условиях справедливо добавить набор скорости, торможение, остановку на светофоре, энергию на обогрев или кондиционирование, рекуперацию. Разберем каждый из вариантов.

Рекуперация со слов пользователей электромобилей может увеличить пробег до 10% в смешанном цикле при хороших условиях. Учитывая эффективность рекуперативного торможения примерно 50%, получаем, что 20% пути автомобиль проезжает при торможении. Можно предположить, что еще 20% пути автомобиль набирает скорость, а значит лишь 60% пути автомобиль находится в наиболее эффективном режиме. При разгоне электромобиля его эффективность практически не снижается, чего нельзя

сказать о ДВС. Сейчас КПД ДВС при разгоне сильно вырос из-за использования вариатора, который стремится к поддержанию наиболее оптимальных оборотов двигателя, однако КПД при этом не будет равен 38,8%. Методом Ферми удалось приблизительно рассчитать КПД разгона с вариатором – 19%. При торможении в современных ДВС топливо в камеру сгорания не поступает, а значит это + 20% пробега, в электромобилях энергии не только не тратится, но и прибавляется, значит + 30 % пробега. Во время простоя (светофор, пробка) ни в автомобиле с ДВС (благодаря системе «старт-стоп»), ни в электромобиле энергия не расходуется на езду, однако тратится на освещение и множество других дополнительных функций, но так как автомобили идентичны, следовательно, эти расходы сопоставимы.

Обогрев салона автомобиля. Для ДВС тепло – это побочный продукт, однако в электромобилях его необходимо вырабатывать. По данным всемирной организации здравоохранения комфортная температура для человека 21 °C. В мире проживает 7 909 295 000 человек [11]. Все люди расселены неравномерно по планете и находятся в разных климатических условиях. Есть страны, где зима теплая и где она прохладная или где даже летом температура ниже 0 °C. Для простоты расчетов возьмем только процент населения от общего и среднегодовую температуру. Получим, что 52% населения не нуждается в отоплении салона. Эти люди проживают в странах, где среднегодовая температура равна или близка к 21 °C. Но 45% нуждается в поднятии температуры салона автомобиля на то или иное значение. Например, для Китая – 14,05 °C при том, что здесь проживает 18% населения мира, для России – 26,35 °C при 2% населения (рис. 2) по данным отдела исследования климата, расположенного в Университете Восточной Англии в Великобритании [12]. По оси абсцисс необходимая ΔT , °C. По оси ординат процент от мирового населения (см. рис. 2).

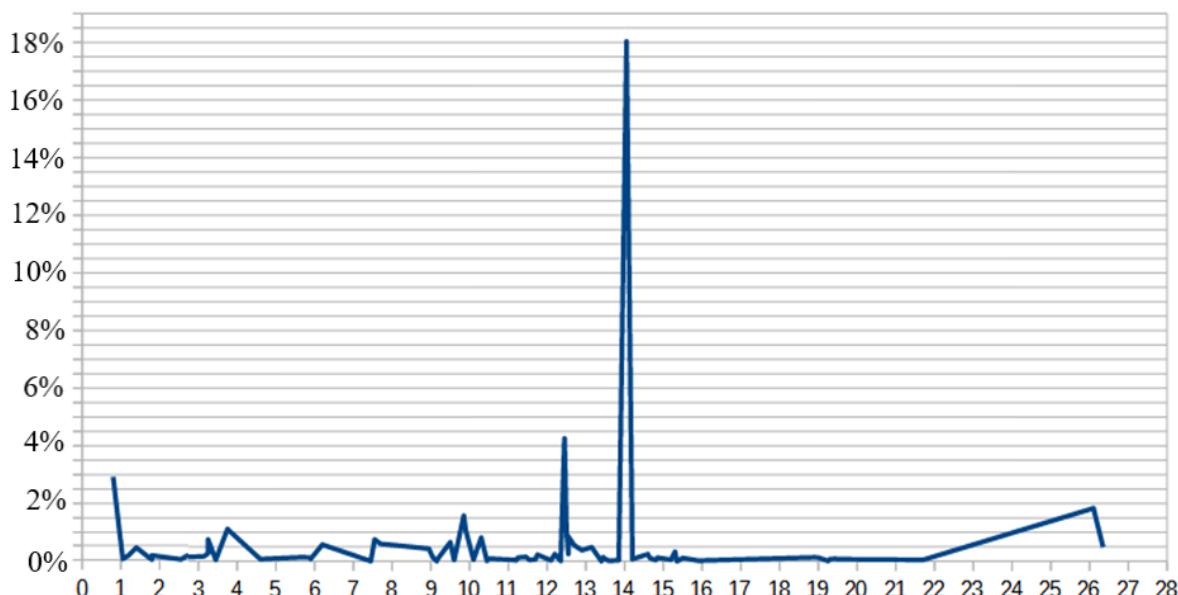


Рис. 2. Процент населения в зависимости от необходимой разницы среднегодовой температуры

Учитывая, что автомобиль D-класса имеет объем салона в среднем 3,11 м³, согласно [13] для нагрева такого объема воздуха необходимо 4085,48 Дж энергии. Проведенные исследования с использованием термопары и секундометра позволили выяснить, что после достижения комфортной температуры салона и отключения обогрева температуры салона и окружающего воздуха сравнялись через 20 с. Значит нагревать такой объем воздуха необходимо примерно каждые 20 с или 180 раз в час, что дает нам потребность энергии в 735386,4 Дж/ ч. Для поддержания температуры на 1 °C КПД электронагревателя стремится к 100%, поэтому он учитываться не будет. Получаем мощность нагревателя 0,204 Вт. При работе электромобиля выделяется тепло из-за потерь, это тепло не может полностью обеспечить обогрев салона, но будем считать, что из-за этого необходимо энергии в 2 раза меньше. Проведя расчеты, получим, что если в пропорциях обеспечить всем людям комфортную температуру, то в среднем электрообогреватель должен иметь мощность 0,535 Вт или + 0,75 кВт·ч/100 км в смешанном цикле.

Итак, подведем итоги:

$$\frac{0,7A_{\text{бензин}}m_{\text{эл}}}{A_{\text{эл}}m_{\text{бензин}}} = \frac{S_{\text{бензин}}}{S_{\text{эл}}} = 0,856.$$

Это нам дает преимущество электромобиля в 14,4%, без учета расхода заряда аккумулятора электромобиля на отопление салона.

Сравнивая дизельный ДВС и электромотор, получим разницу в:

$$\frac{0,7A_{\text{дизель}}m_{\text{эл}}}{A_{\text{эл}}m_{\text{дизель}}} = \frac{S_{\text{дизель}}}{S_{\text{эл}}} = 1,07$$

в пользу дизеля, с учетом того, что дизельный агрегат тяжелее на 50 кг.

Новый вариант гибрида от Honda e-CVT устроен так, что двигатель работает как генератор исключительно в оптимальных оборотах, поэтому КПД передачи мощности с коленчатого вала до колес (трансмиссии) 86% (генератор + инвертор + электромотор). Также гибрид обладает рекуперацией, а его масса больше на 50 кг, чем у обычного автомобиля. Применим

формулу $\frac{0,7A_{\text{гибрид}}m_{\text{эл}}}{A_{\text{эл}}m_{\text{гибрид}}} = \frac{S_{\text{гибрид}}}{S_{\text{эл}}} = 1,07$. Гибрид оказывается экономичнее

на 7%.

Оказывается, что теоретически электромобиль на данный момент все еще не стал более экономичным, чем все вариации автомобилей, оснащенных ДВС. Возьмем данные нескольких автомобилей D-класса и сверим их с полученными теоретическим путем. Данные расчетов, проведенных нами, приведены в табл. 1. Видим расхождение теоретических расчетов с практическим результатом до 3%.

Таблица 1

Сравнение теоретических и практических показателей

Модель	Расход на 100 км	Масса	Отношение масс $m_{\text{тест}} / m_{\text{текущее}}$	Расход с учётом расходления масс на 100 км	Пробег при 10 л или 36,9 кВт·ч	Относительная дальность пробега $S/S_{\text{эл}}$	Приведенная относительная дальность пробега $S/S_{\text{эл}}$
Tesla model 3	15 кВт·ч	1741 кг	1,062	15,93 + 0,75(на обогрев) кВт·ч	221 км	1	1
Skoda Superb 1.4 TSI	5,3 л	1475 кг	1,023	5,4 л	185 км	0,84	0,85
Mazda 5 2.2 МТ 2015	3,9 л	1480 кг	1,054	4,1 л	243 км	1,1	1,07
Honda accord 2.0 e-CVT 2022	4,1 л	1515 кг	1,029	4,22 л	236 км	1,07	1,07

Таким образом, можно сделать вывод, что относительно эффективности автомобили с разными силовыми установками могут быть конкурентоспособными. Однако помимо эффективности есть ряд других параметров, среди которых, например, электромобили обладают большей мощностью, чем автомобили с ДВС или с гибридными силовыми установками, но при этом обладают меньшим запасом хода, приблизительно в 2 раза. Также аккумуляторы электромобилей подвержены деградации, а их способность отдавать накопленную энергию снижается по мере снижения температуры, что делает электромобили неконкурентоспособными в холодных регионах.

Список литературы

1. <https://global.toyota/en/mobility/tnga/powertrain2018/engine/>.
2. <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2018/fuel-use-how-low-can-you-go/>.
3. Электромобиль на алюминиевом топливе [Текст] / А. З. Жук, Б. В. Клейменов, В. Е. Фортов, А. Е. Шейндлин ; под ред. А. Е. Шейндлина ; Российская акад. Наук ; Объединенный ин-т высоких температур. – Москва : Наука, 2012. – 170 с. : ил., табл.; 22 см; ISBN 978-5-02-037984-8 (в пер.).
4. <https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-source-bar?country>.

5. Институт статистических исследований и экономики знаний: эффективные технологии для тепловой энергетики.
<https://issek.hse.ru/trendletter/news/141133080.html>.
6. Маргурова, Т. Х. Атомные электрические станции : [Учеб. для вузов по спец. «Атом. электростанции и установки», «Пр-во и монтаж оборуд. АЭС», «Автоматизация теплоэнерг. Процессов】 / Т. Х. Маргурова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1984. – 304 с.
7. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск : Издательство ТПУ, 2015. – 128 с.
8. Electric Vehicle Fast Charging Challenges, 2019. Infineon. / https://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2019/08/power-elec-mag-feb-2019_article.pdf.
9. ЦДУ ТЭК: Тенденции российской нефтеперерабатывающей отрасли.
https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2019/1/556.
10. Кирсанов, Ю. Г. Анализ нефти и нефтепродуктов [Текст] : учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 18.03.01, 18.04.01 «Химическая технология» / Ю. Г. Кирсанов, М. Г. Шишов, А. П. Коняева. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2016. – 85 с. : ил.; 20 см.; ISBN 978-5-7996-1675-5.
11. Рейтинг стран мира по численности населения / Департамент организации объединенных наций по экономическим и социальным вопросам (ДЭСВ ООН) / <https://gtmarket.ru/ratings/world-population>.
12. <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data//hrg/timm/data/index-table.html>.
13. Protection of Environment, Section 600.315-82. Classes of comparable automobiles U.S. Government. / <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2011-title40-vol30/CFR-2011-title40-vol30-sec600-315-82/context>.