



• © С.П. Пожидаев, канд. техн. наук, доцент (НУБиП Украины)

О ПОЛЕЗНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ РАБОТЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КПД АВТОМОБИЛЯ

Аннотация. Для определения понятия “полезная механическая работа автомобиля” применён аксиоматический метод. В его основу положено общепринятое в механике определение энергетического КПД и понятие об идеальном транспортном средстве. Как логическое следствие получено, что полезной механической работой автомобиля является сумма приращений его полной энергии в поступательном движении.

Ключевые слова: механическая работа, энергетический КПД автомобиля, идеальное транспортное средство, энергия полная, кинетическая, потенциальная.

Анотація. Для визначення поняття “корисна механічна робота автомобіля” застосований аксіоматичний метод. У його основу покладено загальноприйняте в механіці визначення енергетичного ККД і поняття про ідеальний транспортний засіб. Як логічний наслідок отримано, що корисною механічною роботою автомобіля є сума прирощень його повної енергії в поступальному русі.

Ключові слова: механічна робота, енергетичний ККД автомобіля, ідеальний транспортний засіб, енергія повна, кінетична, потенційна.

Abstract. For the definition of “useful mechanical work vehicle” used the axiomatic method. It is based on the generally accepted definition of the mechanics of energy efficiency and the concept of the perfect vehicle. As a logical consequence found that useful mechanical work of the car is the sum of the increments of its total energy in the forward movement.

Keywords: mechanical work, energy efficiency of the car, the perfect vehicle, the total energy, kinetic, potential.

Вступление

С точки зрения классической механики автомобиль представляет собой устройство, на вход которого от двигателя поступает механическая энергия $A_{\text{общ}}$, часть которой безвозвратно теряется на преодоление вредных сопротивлений, а оставшаяся часть $A_{\text{пол}}$ выполняет полезную механическую работу. Отношение количества последней к общей механической энергии представляет собой энергетический коэффициент полезного действия (КПД) автомобиля как обычного технического устройства [1, с. 237]:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{общ}}}. \quad (1)$$

Такой показатель уже более полувека обсуждается специалистами [2 – 8] и др., но не находит применения в научно-практической и учебной деятельности. Причиной этого является отсутствие единого мнения о том, что же считать полезной механической работой при движении автомобиля $A_{\text{пол}}$. Каждый из специалистов, принимавших участие в дискуссии, предлагал собственное субъективное видение полезной работы, не выводя его формально-математическим путём из общих и объективных законов классической механики.

Вследствие этого все известные определения полезной механической работы автомобиля оказывались уязвимыми и точно так же субъективно, без веских оснований, отменялись другими участниками дискуссии. Например, В.И. Коптилов в цикле работ [8] отверг все известные определения данного понятия и предложил своё: это работа, выполняемая автомобилем в процессе преодоления им той части силы сопротивления качению и воздуха, которая обусловлена массой и размерами груза.

Однако такое определение противоречит фундаментальным положениям классической механики, в соответствии с которой силы сопротивления качению и воздуха относятся к диссипативным, связанным с рассеиванием энергии в мировом пространстве, т.е. к бесполезным её потерям [9]. Это неопровержимо свидетельствует об ошибочности данного предложения: никакой частный случай законов природы (к которым относится механика автомобиля) не может входить в противоречие с более общими её законами, в данном случае с законами классической механики.

Кроме того, данное предложение В.И. Коптилова не выдерживает проверку на граничные условия, заключающуюся в том, что любое корректное построение должно давать правильные результаты в условиях, когда входные переменные приближаются к крайним допустимым для них значениям. В данном случае, предполагая значения сил сопротивления качению и воздуха стремящимися к нулю (что во все времена являлось хоть и недостижимой, но непреложной целью конструкторов и эксплуатационников) получаем, что к нулю будет стремиться и полезная механическая работа $A_{\text{пол}}$ автомобиля. Это противоречит здравому смыслу.

Цель статьи – обоснование того, что следует считать полезной механической работой автомобиля.

Основная часть

Не распыляясь на критику множества известных работ на данную тему, определение искомого понятия было проведено “с чистого листа”. При этом был применён аксиоматический метод, в основу которого (как аксиома) положено общее для всех технических устройств соотношение (1). В соответствии с принципом



граничных условий оно должно давать правильные результаты и в том случае, когда входная переменная $A_{\text{пол}}$ неограниченно приближается к максимально возможному её значению, равному $A_{\text{общ}}$. Этот случай соответствует работе гипотетического идеального транспортного средства (далее – идеального ТС, ИТС), энергетический КПД которого равен единице: $\eta = 1,0$. Из этого факта логически следует вывод о том, что полезная механическая работа автомобиля $A_{\text{пол}}$ тождественна общей механической энергии $A_{\text{общ.итс}}$, необходимой для функционирования идеального ТС:

$$A_{\text{пол}} = A_{\text{общ.итс}} \quad (2)$$

Чтобы выяснить содержание понятия “общая механическая энергия идеального ТС”, необходимо из всех затрат энергии, наблюдающихся в реальных ТС, исключить те, которые должны отсутствовать в гипотетическом идеальном ТС. Оставшиеся виды затрат будут представлять собой объективно необходимые для функционирования ТС затраты энергии, без которых выполнение ТС своих функций будет **принципиально невозможным**.

Например, в колёсных ТС существует сила сопротивления качению. В классической механике она относится к диссипативным силам и уже одно это является достаточным основанием для исключения её из рассмотрения в ИТС. Но к этому выводу можно придти и иначе. А именно, сила сопротивления качению в принципе подвластна человеку, ею можно управлять путём изменения конструкции и свойств ходовой системы ТС. В железнодорожных ТС она на порядок меньше, чем в автомобильных. А в ТС на магнитной подвеске или воздушной подушке она вообще отсутствует, что ни в коей мере не препятствует выполнению ими своих функций. Следовательно, потери энергии на преодоление силы сопротивления качению колёс необходимо относить к непроизводительным, они не должны присутствовать в ИТС.

Причем отмахиваться от такого образа идеального ТС ввиду его якобы нереальности или надуманности (как сделано в работе [8]) некорректно. Ведь задача заключается не в том, чтобы воспроизвести идеальное ТС, а в том, чтобы создать объективную систему координат для оценки энергетической эффективности реальных ТС. Идеальный цикл Карно неосуществим, но только он позволяет определять теоретически возможное максимальное значение термического КПД теплового двигателя. Нереальны, но необходимы (а не надуманы) абсолютно чёрное тело в физике, абсолютно твёрдое тело в механике, идеальный газ в физике, идеальная жидкость в гидромеханике, идеальный пропеллер в аэродинамике. Недостижимы, но необходимы в науке абсолютный нуль температуры и скорость света.

Аналогичным образом исключаем из образа ИТС диссипативную силу сопротивления воздуха (кроме того, движение может осуществляться по поверхности космических тел, не имеющих атмосферы); диссипативные силы трения в трансмиссии (последняя в её нынешнем виде в ИТС может отсутствовать); диссипативное явление буксования движителей (возможна

канатная тяга); моменты инерции вращающихся масс (отсутствие вращающихся деталей ТС не будет препятствовать выполнению его функций).

Сила инерции в поступательном движении ТС неподвластна человеку. Преодолевая её, внешние силы выполняют работу, которая преобразуется в кинетическую энергию ТС. Отсутствие этой силы возможно только в состоянии покоя или непрерывного равномерного движения, что неприемлемо для автотранспортных средств. Следовательно, отсутствие силы инерции сделает невозможным выполнение этими средствами своих функций. В ИТС эта сила должна присутствовать.

Сила сопротивления подъёму также неподвластна человеку. Преодолевая её, внешние силы выполняют работу по изменению потенциальной энергии ТС, поэтому в ИТС она также должна присутствовать.

Таким образом, в ИТС будут действовать всего две последние силы. Они не являются диссипативными, вследствие чего не противоречат канонам классической механики. Эти две силы определяют энергетическое состояние ТС, характеризуемое суммой потенциальной энергии U и кинетической энергии в поступательном движении T . В классической механике [9] упомянутую сумму называют **полной энергией** E , текущее значение которой в любой точке маршрута движения автомобиля равно, Дж:

$$E = U + T = m(gH + 0,5v^2), \quad (3)$$

где m – полная масса ТС (масса брутто) или масса только полезного груза (будем полагать её массой нетто), кг; g – ускорение земного притяжения, м/с²; H – текущее значение географической высоты, например, относительно уровня моря, м; v – текущее значение скорости движения автомобиля, м/с.

При отсутствии внешних воздействий полная энергия E является постоянной величиной, а при их наличии она изменяется.

Функционирование ИТС происходит следующим образом. При разгоне на горизонтальной дороге его двигатель выполняет механическую работу, которая расходуется только на накопление кинетической энергии ИТС. При достижении заданной скорости движения двигатель прекращает работу, а ИТС продолжает движение по инерции. Поскольку все силы сопротивления движению отсутствуют, то движение может продолжаться неограниченно долго (сравните с движущимся по орбите космическим кораблем). При увеличении географической высоты маршрута для увеличения потенциальной энергии ИТС потребуются по крайней мере одно из двух: или дополнительная работа двигателя (полная энергия E при этом будет возрастать) или соответствующее уменьшение кинетической энергии (полная энергия E может оставаться на прежнем уровне). При уменьшении высоты маршрута возможно снижение полной энергии E (если применяется торможение) или сохранение её на прежнем уровне (при преобразовании высвобождающейся части потенциальной энергии в кинетическую). В конечном пункте ИТС останавливают, полностью отбирая его кинетическую энергию. Если необходимы



промежуточные остановки, то двигатель должен обеспечивать повторное накопление кинетической энергии после каждой из них.

Пример возможной функциональной зависимости полной энергии E транспортного средства от пути S представлен на рисунке.

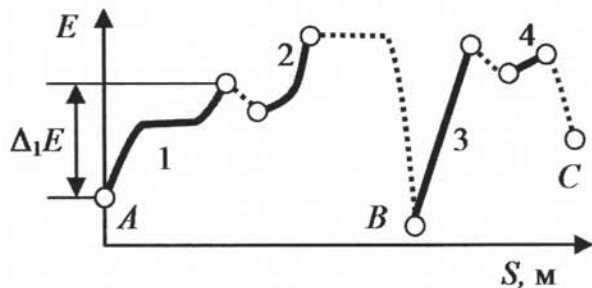


Рис. 1. Пример возможной функциональной зависимости полной энергии E транспортного средства от пути S

Начальной точкой маршрута является т. A . На отрезке 1 (жирная линия) функциональной зависимости $E=f(S)$ полная энергия E увеличивается на некоторую величину $\Delta_1 E$. После некоторого её уменьшения полная энергия увеличивается на отрезке 2. Затем некоторое время она удерживается на постоянном уровне – в это время может происходить равномерное движение ТС по горизонтальной поверхности или обмен между кинетической и потенциальной энергиями. В точке B транспортное средство делает промежуточную остановку. Полная энергия E увеличивается также на отрезках 3 и 4. Точка C маршрута является конечной. Поскольку в точках A , B и C пути транспортное средство неподвижно, то в них оно имеет только потенциальную энергию, обусловленную географической высотой этих точек.

Сумма всех приращений $\Delta_i E$ полной энергии на отрезках 1-4 характеризует общие энергетические затраты ИТС на данном маршруте:

$$A_{\text{общ,итс}} = \sum_{i=1}^n (\Delta_i E), \quad (4)$$

где n – количество отрезков пути, на которых происходит увеличение полной энергии E транспортного средства, в них допускаются участки с неизменным уровнем полной энергии – см. на рис. 1 такой участок внутри отрезка 1.

Приращение полной энергии E на каждом отдельном i -м участке определяется по соотношению:

$$\Delta_i E = m(g(H_{ki} - H_{ni}) + 0,5(v_{ki}^2 - v_{ni}^2)), \quad (5)$$

где H_{ki} и H_{ni} – географическая высота соответственно конечной и начальной точек i -го отрезка, м; v_{ki} и v_{ni} – скорость движения ИТС соответственно в конечной и начальной точках i -го отрезка, м/с.

Подставив соотношения (4) и (5) в равенство (2), получаем объективный ответ на вопрос о том, что же является полезной механической работой автомобиля $A_{\text{пол}}$:

$$A_{\text{пол}} = m \sum_{i=1}^n (g(H_{ki} - H_{ni}) + 0,5(v_{ki}^2 - v_{ni}^2)). \quad (6)$$

Следовательно, этой работой является сумма приращений полной энергии автомобиля в его поступательном движении. В соответствии с этим общепринятое соотношение (1) для вычисления энергетического КПД принимает вид:

$$\eta = \frac{m \sum_{i=1}^n (g(H_{ki} - H_{ni}) + 0,5(v_{ki}^2 - v_{ni}^2))}{A_{\text{общ}}}. \quad (7)$$

Определение входящих в него общих энергетических затрат $A_{\text{общ}}$ не является проблемой. Это может быть количество энергии, полученной от полного сгорания топлива на маршруте, в этом случае формула (7) будет предоставлять значение топливно-механического КПД автомобиля на маршруте (нетто или брутто – в зависимости от принятой в соотношении (7) массы m). Это может быть и интеграл по времени от фактической эффективной мощности двигателя во время движения автомобиля на маршруте, в этом случае будет получено значение механического КПД (тоже нетто или брутто).

Поскольку общие затраты энергии реальных автомобилей $A_{\text{общ}}$ зависят от длины маршрута, то сравнительную оценку их энергетической эффективности следует проводить на некоторой фиксированной длине пути, равной, например, 1000 м [3] или принятой в стандартных ездовых циклах. При этом могут быть учтены все конкретные особенности организации транспортного процесса или дорожного движения.

Соотношение (7) выдерживает проверку на граничные условия:

- у буксующего на месте автомобиля отсутствуют изменения потенциальной и кинетической (в поступательном движении) энергий. Это приводит к нулевым значениям числителя и всего соотношения (7), что соответствует физическому смыслу энергетического КПД в классической механике;

- у гипотетического идеального ТС вся механическая работа $A_{\text{общ}}$, выполненная двигателем, преобразуется в кинетическую и/или потенциальную энергию. Вследствие этого значения числителя и знаменателя соотношения (7) будут одинаковы, что приводит к значению $\eta = 1,0$, которое также соответствует физическому смыслу энергетического КПД.

Построенное в данной работе соотношение (6) является достаточным основанием для утверждения о необоснованности иных точек зрения на содержание понятия “полезная механическая работа автомобиля”. Вместе с тем известны предложения некоторых авторов, весьма близкие к полученным в данной работе.



Например, Э.И. Наркевич и А.А. Токарев предлагали аналогичное решение для определения “эталонной” работы ТС (под которой подразумевали изменение полной энергии полезного груза) и “коэффициента эффективности работы автомобиля” [3]. В работе [4] А.А. Токарева рассматривался частный случай этого решения – без учёта потенциальной энергии ТС, что соответствует движению последнего по горизонтальной поверхности.

Близким к формуле (7) является расчётное соотношение, предложенное в работе [6]. Однако, по нашему мнению, знак суммирования в нём необходимо вынести за фигурные скобки, что позволит учитывать возможный обмен между потенциальной и кинетической энергиями автомобиля на каждом из отрезков пути.

Однако упомянутые работы подвергались критическим замечаниям в печати. Например, А.А. Токарев утверждал, что энергетический КПД автомобиля должен существовать во всех фазах движения автомобиля, а не только в фазе разгона, в связи с чем избегал такого термина, заменяя его термином “КПД” [5] или “коэффициент эффективности работы” [4, С. 68]. Однако с таким утверждением согласиться нельзя. Понятие КПД применимо к каждой отдельной фазе движения ТС, но это не означает, что в каждой из фаз значение КПД должно быть больше нуля. Ситуация аналогична работе двигателя внутреннего сгорания: его КПД тоже можно вычислять для каждого из рабочих процессов отдельно – сгорания, расширения, выпуска, наполнения, сжатия. Но в трёх последних процессах КПД двигателя равен нулю, т.к. он только потребляет энергию.

Другие оппоненты [7] задают Э.И. Наркевичу риторический вопрос: почему в соответствии с его формулой автомобиль, перевозящий груз по горизонтальной дороге с установившейся скоростью, не выполняет полезную работу? Ответ прост: автомобиль всю полезную механическую работу выполнил при разгоне, а при последующем равномерном движении его механическая работа расходуется только на преодоление диссипативных сил сопротивления – качения, воздуха и сил трения в трансмиссии. Эта работа не является необходимой для выполнения транспортного процесса. Если бы её удалось полностью ликвидировать, то это только улучшило бы эксплуатационные показатели работы автомобиля до максимально возможных значений. Поэтому отношение к ней как к полезной работе является заблуждением. В этом смысле автомобиль ничем не отличается от космического корабля, перемещающегося с выключенными двигателями по орбите. Транспортную работу (измеряемую в т·км) он выполняет, а механическую – не выполняет, она была выполнена ранее, в фазе выхода на орбиту, движение по которой осуществляется за счёт накопленных ранее кинетической и потенциальной энергий. Этот пример демонстрирует поразительную аналогичность при-

нципа работы всех устройств для перемещения грузов в пространстве – от детской рогатки до космического корабля.

В.И. Коптилов заявляет, что предложения, изложенные в работах [3; 4], надуманы, составлены интуитивно и не имеют не только никакого теоретического обоснования, но и ясного физического смысла [8]. Однако интуитивный подход и отсутствие должного теоретического обоснования не являются свидетельством ошибочности получаемых при этом результатов. Как следует из данной работы, результаты не В.И. Коптилова, а Э.И. Наркевича и А.А. Токарева оказались в принципе верными. Что касается показателя эффективности, предложенного в их работах, то он опирается на правильно понимаемое понятие полезной механической работы (6), вследствие чего имеет абсолютно ясный физический смысл, полностью соответствующий смыслу общепринятого энергетического КПД [1, С. 237].

Выводы

Установлена справедливость предложенного ранее в работах Э.И. Наркевича и А.А. Токарева применения приращения полной энергии автомобиля в качестве меры выполняемой им полезной механической работы. Только это обеспечит возможность получения однозначной количественной оценки энергетической эффективности автомобилей, соответствующей общепринятому смыслу энергетического КПД любых технических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Политехнический словарь.** – М. Советская энциклопедия, 1976. – 608 с.
2. **Погосбеков М.И.** КПД автомобиля // Автомобильная промышленность. – 1962. – №9. – С. 21-23.
3. **Наркевич Э.И., Токарев А.А.** К оценке эффективности использования энергии автомобилем // Автомобильная промышленность. – 1978. – №5. – С. 16-17.
4. **Токарев А.А.** Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
5. **Токарев А.А.** Еще раз о КПД автомобиля // Автомобильная промышленность. – 1997. – №9. – С. 21-23.
6. **Наркевич Э.И.** Определение среднего КПД автомобиля на маршруте // Автомобильная промышленность. – 1998. – №10. – С. 20-23.
7. **Карабцев В.С., Валеев Д.Х.** О КПД и коэффициенте эффективности транспортного средства // Автомобильная промышленность. – 2002. – №10. С. 16-19.
8. **Коптилов В.И.** О комплексных показателях топливно-энергетической эффективности автомобиля // Автомобильная промышленность. – 2012. – №5. С. 15-17; №6. С. 7-10; №7. С. 15-18.
9. **Иродов И.Е.** Основные законы механики. – М.: Высшая школа, 1978. – 240 с.