УДК 629.33.01

Н. М. Филькин, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

К ПРОБЛЕМЕ ОБОСНОВАНИЯ ПОНЯТИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Рассмотрены актуальные вопросы, связанные с введением понятия КПД автотранспортного средства (АТС), которые не решены в автомобилестроении до настоящего времени. Проведено обоснование неперспективности введения и рассмотрения КПД АТС при движении АТС с постоянной скоростью и о необходимости рассмотрения КПД лишь для режима разгона АТС.

В настоящее время разработано большое количество показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности для различных режимов движения и условий эксплуатации автотранспортных средств (АТС): время разгона в заданных интервалах скоростей движения и на заданных мерных участках пути разгона, средняя скорость движения в заданных условиях эксплуатации, расход топлива при установившихся скоростях движения и в различных городских и магистральных ездовых циклах и ряд других. Каждый показатель в той или иной степени характеризует эффективность АТС. Из-за большого числа показателей проблемы повышения тягово-скоростных свойств и топливной экономичности вновь разрабатываемых и модернизируемых АТС приходится на практике рассматривать как сложные задачи многокритериальной оптимизации. Поэтому естественно желание разработать один универсальный показатель эффективности АТС, например, коэффициент полезного действия (КПД).

В классическом понимании КПД – характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии, т. е. КПД η определяется отношением полезно используемой (переданной) энергии W_0 к суммарному количеству преобразованной (передаваемой) энергии W, т. е. $\eta = W_0 / W$.

Любую машину схематично можно разделить на три функциональные части: энергетическая (преобразовывает какой-либо вид энергии в механическую, например, для тепловых двигателей преобразование тепловой энергии); механическая (передает энергию к исполнительным органам, т. е. к движителю для АТС); исполнительные органы (выполняют рабочие процессы, например, технологические, транспортные и др.). При определении КПД для энергетической или (и) механической частей АТС проблем с расчетом КПД практически нет.

Действительно, суммарная преобразованная энергия $W^э$ для энергетической части, например, состоящей из теплового двигателя, – это энергия израсходованного топлива, а полезно используемая энергия $W_0^э$ – механическая энергия на выходном валу энергетической части, которая обычно определяется экспериментально при испытании, например, теплового двигателя на стенде в зависимости от частоты вращения вала двигателя и нагрузки (семейство скоростных характеристик). Таким образом, для энергетической части $\eta^э = W_0^э / W^э$.

© Филькин Н. М., 2008

Суммарной передаваемой энергией для механической части АТС является выходная энергия энергетической части, т. е. $W^{м} = W_0^{э}$. Механической частью АТС обычно является трансмиссия. Поэтому энергия $W_0^{м}$ равна $W^{м}$ за вычетом потерь в трансмиссии, определяемых для различных нагрузочных и скоростных режимов движения АТС расчетным методом или экспериментально. Следовательно, КПД для механической части $\eta^{м} = W_0^{м} / W^{м} = W_0^{м} / W_0^{э}$, а общий КПД энергетической и механической частей АТС $\eta^{э+м} = \eta^{э}\eta^{м} = W_0^{м} / W^{э}$.

Суммарная преобразованная энергия в движителе АТС $W^{и}$ равна переданной на движитель энергии от механической части, т. е. $W^{и} = W_0^{м}$. Чему равна полезно используемая энергия в движителе $= W_0^{и}$? Это основной и самый трудный вопрос введения понятия КПД АТС. В работе [1] М. И. Погосбеков предлагал при определении КПД автомобиля в качестве полезной силы, совершающей полезную работу, брать силу $P_f = fG_{г}$, где f – коэффициент сопротивления качению; $G_{г}$ – вес полезного груза или пассажиров. Такой подход к определению КПД автомобиля при установившихся скоростях движения был подвергнут обоснованной критике, так как в этом случае чем выше потери на сопротивление качению, тем выше КПД автомобиля. Основное отличие предложений в статье [2] от вышеупомянутой работы [1] заключается в замене коэффициента сопротивления качению f на некоторое его эталонное значение $f_{э}$. Однако это мало что изменяет, снова – чем больше искусственно введенное значение $f_{э}$, тем выше КПД. Если $f_{э}$ задавать на основе статистических данных различных дорожных условий эксплуатации и конструкций движителей АТС, то улучшение дорожных условий движения в целом в стране и переход на движители с меньшими коэффициентами сопротивления качению потребуют коррекции $f_{э}$ в меньшую сторону, что, естественно, приведет к ухудшению КПД. Очевидно противоречие.

Дискуссия по обоснованному расчету КПД АТС еще далека от своего завершения. После опубликования работы [2] в этом же журнале под таким же названием опубликована работа [3], в которой А. А. Токарев подверг критике предлагаемые М. И. Погосбековым формулы расчета КПД. При расчете КПД А. А. Токарев в качестве полезной мощности принимает ее часть, затрачиваемую на перемещение полезного груза m со скоростью v по дороге с некоторым суммарным коэффициентом сопротивления $\psi = \psi(v)$, т. е. в числителе КПД стоит произведение $mv\psi(v)$, а в знаменателе – суммарная тепловая энергия, выделяемая при сгорании топлива в цилиндрах двигателя. По нашему мнению, предложенный показатель характеризует количество потраченной мощности при движении транспортной машины на единицу израсходованной энергии топлива. Это не КПД в соответствии с классическим понятием КПД машины. Подтверждением этому является размерность предлагаемого показателя Вт/Дж или после преобразования 1/с, но по определению КПД это безразмерная величина. Безразмерность предлагаемого показателя в работе [3] получена заменой коэффициента суммарного сопротивления произведением скорости движения v на некоторый коэффициент пропорциональности по пути выбега транспортной машины K_s, т. е. безразмерный коэффициент ψ под предлогом «...для удобства практического пользования формулой...» заменен произведением

$K_s v$, размерности м/с. Подобная формула расчета КПД предложена в работе [4], где в качестве полезной берется мощность, затрачиваемая на преодоление всех внешних сопротивлений движению транспортной машины за вычетом силы сопротивления качению.

По нашему мнению, критические замечания Н. К. Куликова и его вывод по этому вопросу, сделанный 40 лет назад, – «...КПД автомобиля при установившемся движении, в современном смысле, принципиально бесперспективен и приводит к запутыванию ряда проблем автомобильной науки и техники и дезориентации конструкторов» – остаются справедливыми по настоящее время [5].

Для соглашения с Н. К. Куликовым необходимо согласиться с утверждением, что ни одна из сил сопротивления движению АТС или исполнительным органам любой другой машины (подъемно-транспортной, строительно-дорожной и т. д.) не может быть полезной, т. е. не может совершать полезной работы. Конструктор должен работать над уменьшением всех этих сил и стремиться к фантастическим конструкциям изделий с результирующей всех сил сопротивления, близкой или в идеале равной нулю.

При движении любой механической системы сумма работ всех действующих сил на некотором перемещении равна изменению ее механической энергии – кинетической и потенциальной. Иными словами, работа суммарной движущей силы на каком-либо пути равна работе по преодолению сопротивления на этом пути и полученной системой механической энергии. При движении АТС с установившимися скоростями по горизонтальной опорной поверхности вся энергия, преобразованная движителем $W^{и}$, расходуется на преодоление сил сопротивления движению, т. е. полезно совершаемая механическая работа и соответствующая ей энергия $W_0^{и}$ с точки зрения механических систем равна нулю ($\eta^{и} = 0$). Поэтому КПД АТС $\eta = \eta^{э}\eta^{м}\eta^{и} = 0$. Более того, если АТС начало двигаться с места (начальная скорость равна нулю), в конце пути остановилось и высота его над уровнем моря не изменилась, то суммарная полезная механическая работа также равна нулю ($\eta = 0$). В этом случае скорость АТС и высота его над уровнем моря менялись непрерывно в процессе движения. Поэтому одна часть энергии тратилась на преодоление сил сопротивления движению, другая – на изменение механической энергии (кинетической Т и потенциальной П). Кинетическая и потенциальная энергии непрерывно изменялись в зависимости от дорожных условий движения АТС. Если сила тяги на движителе становилась меньше суммарной силы сопротивления движению, то расходовалась часть механической энергии, полученной АТС раньше. В конце движения Т + П = 0, т. е. вся механическая энергия потрачена на преодоление различных сил сопротивления движению. В этом случае также КПД АТС $\eta = 0$.

В рассмотренных двух случаях движения АТС КПД равен нулю, но никаких противоречий здесь нет. Действует закон сохранения и превращения энергии: во всех явлениях природы энергия не создается из ничего и не исчезает бесследно, а только переходит из одного вида в другой или от одного тела к другому, оставаясь в количественном отношении неизменной. В наших случаях энергия в движителе потрачена на преодоление сил сопротивления движению АТС, ни одна из которых не может быть полезной для человека с точки зрения энергетических потерь.

В процессе разгона кроме вредных потерь энергии на преодоление сил сопротивления движению возрастает кинетическая энергия АТС. Однако только часть кинетической энергии, связанной с перемещением полезного груза, следует считать

полезной человеку. При движении АТС по дороге с переменным профилем также изменяется потенциальная энергия перевозимого груза. Поэтому суммарная полезно используемая механическая энергия будет равна $W_0^{\text{и}} = 0{,}5(m\,v_{\text{к}}^2 - m\,v_{\text{н}}^2) + mg(h_{\text{к}} - h_{\text{н}})$, где m – масса полезного груза в кг; $v_{\text{н}}, v_{\text{к}}$ – соответственно начальная и конечная скорости движения в процессе разгона в интервале времени от $t_{\text{н}}$ до $t_{\text{к}}$ в м/с; $h_{\text{н}}, h_{\text{к}}$ – высота над уровнем моря соответственно в начале и конце процесса разгона в м; g – ускорение свободного падения. Тогда интегральный (за весь процесс разгона) КПД АТС

$$\eta = \frac{W_0}{W} = \eta^{\text{э}}\eta^{\text{м}}\eta^{\text{и}} = \frac{W_0^{\text{и}}}{W^{\text{э}}} = \frac{0{,}5(mv_{\text{к}}^2 - mv_{\text{н}}^2) + mg(h_{\text{к}} - h_{\text{н}})}{10^6 H_u Q}, \qquad (1)$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива, соответствующая количеству теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива, и определяемая обычно в МДж/кг для жидкого и в МДж/м^3 для газообразного топлива (например, при температуре 15 °С и давлении 101,3 кПа для бензина низшая теплота сгорания 44 МДж/кг, для дизельного топлива 42,5 МДж/кг, для метана CH_4 – 33,869 МДж/м^3, для водорода H_2 – 10,228 МДж/м^3); Q – расход топлива в процессе разгона в кг или в м^3.

Рассмотрение понятия КПД с точки зрения процессов преобразования и изменения энергии в АТС позволило получить формулу для определения КПД при разгоне, которая полностью согласуется с формулой расчета эффективного КПД $\eta_{\text{е}}$, предложенной Н. К. Куликовым в работе [5]. Эффективный КПД представляет собой отношение полезно используемой энергии к суммарному количеству преобразованной энергии за бесконечно малый промежуток времени, т. е. $\eta_{\text{е}} = \dfrac{dW_0^{\text{и}}/dt}{dW^{\text{э}}/dt}$.

Дифференцирование числителя и знаменателя интегрального КПД η, записанного в виде (1), с учетом движения АТС по горизонтальной опорной поверхности $(h_{\text{к}} = h_{\text{н}})$ по времени t позволяет получить эффективный КПД $\eta_{\text{е}}$ для произвольной скорости движения $v_{\text{к}}$. Действительно, для числителя производная $dW_0^{\text{и}}/dt = mv_{\text{к}}\dot{v}_{\text{к}}$, где $\dot{v}_{\text{к}} = dv/dt$ – ускорение АТС, а для знаменателя – $dW^{\text{э}}/dt = 10^6 \text{H}_u dQ/dt = \text{H}_u g_{\text{е}} N_{\text{е}}/3{,}6$, где мгновенный расход топлива dQ/dt записан в виде произведения удельного эффективного расхода топлива $g_{\text{е}}$ в г/(кВт · ч) или для газообразного топлива в л/(кВт · ч) на эффективную мощность двигателя $N_{\text{е}}$ в кВт. Следовательно, эффективный КПД $\eta_{\text{е}} = \dfrac{mv_{\text{к}}\dot{v}_{\text{к}}}{H_u g_{\text{е}} N_{\text{е}}/3{,}6}$.

Пусть осуществляется процесс разгона в течение заданного промежутка времени Δt. Тогда в соответствии с полученной зависимостью для увеличения интегрального КПД АТС η при разгоне необходимо повышать топливную экономичность при одновременном улучшении динамики разгона (достичь как можно более высокой конечной скорости разгона $v_{\text{к}}$ за время Δt при возможно меньшем расходе топлива). Очевидно, что любые конструктивные мероприятия по повышению инте-

грального КПД разгона АТС (уменьшение потерь на сопротивление качению, сопротивление воздуха, потерь в трансмиссии и подвеске при колебаниях и т. д.) приведут к повышению эффективности использования энергии при всех других режимах движения. Поэтому в искусственном построении КПД АТС при установившемся режиме движения, по нашему мнению, нет необходимости.

При наличии в конструкции машины накопителей энергии в числителе интегрального КПД (1) появится дополнительный член, учитывающий изменение энергии накопителя за время разгона. Примерами таких конструкций являются машины, оборудованные гибридными энергосиловыми установками с накопителями энергии, АТС с рекуператорами на базе дифференциальных, гидрообъемных и электромеханических передач и другие машины с накопителями энергии. Вид энергии зависит от типа накопителя, например, для аккумуляторных батарей – химическая энергия, маховика – кинетическая, пружины и гидропневматического накопителя – потенциальная, конденсатора – электрическая и т. д.

В заключение отметим, что не следует относиться к КПД как к некоему идеальному показателю, позволяющему решить автомобилестроителям и эксплуатационникам все проблемы энергетической эффективности машин. Его значение для конкретной машины зависит от скоростных и нагрузочных режимов ее работы, условий эксплуатации и многих других факторов. Поэтому проблема многокритериальности этой задачи из-за большого количества технических требований, предъявляемых к проектируемым АТС, разнообразия условий их эксплуатации и сложности самих изделий с введением КПД остается, и конструкторы вынуждены будут продолжать принимать сложные компромиссные решения в проблемах эффективности машин. КПД АТС – это всего лишь один из комплексных критериев оптимальности, учитывающий влияние скоростных свойств и экономичности на качество АТС, который может быть полезен при решении ряда задач оптимизации конструктивных параметров и характеристик машины и установленного на ней двигателя.

Список литературы

1. *Погосбеков, М. И.* КПД автомобиля / М. И. Погосбеков // Автомобил. пром-сть. – 1962. – № 9. – С. 13–15.

2. *Погосбеков, М. И.* Еще раз о КПД автомобиля / М. И. Погосбеков // Автомобил. пром-сть. – 1996. – № 9. – С. 12–15.

3. *Токарев, А. А.* Еще раз о КПД автомобиля / А. А. Токарев // Автомобил. пром-сть. – 1997. – № 9. – С. 18–21.

4. *Говорущенко, Н. Я.* Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте / Н. Я. Говорущенко. – М. : Транспорт, 1990. – 135 с.

5. *Куликов, Н. К.* К вопросу о КПД автомобиля / Н. К. Куликов // Труды конференции по теории и расчету автомобилей, работающих в горных условиях. – Тбилиси : Мецниереба, 1968. – С. 323–334.