

Н. Д. МАЛЬКЕВИЧ, Н. Ф. ЗЕНЬЧУК, И. Н. ТИХОМИРОВ (УО «Белорусский государственный университет транспорта», Беларусь)

МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА ЛОКОМОТИВА НА ПРЕОДОЛЕНИЕ ПОДЪЕМОМ ПУТИ

Спосіб підрахунку енергетичних витрат і витрат з ремонту рухомого складу і колії, пов'язаних з пересуванням поїзда по ділянці, пропорційно величині вимірювача «механічна робота», яка розраховується як добуток сили на відстань, не дає адекватних результатів. Чим більший час поїзд затрачає на подолання відрізка шляху з підйомом, тим більша витрата енергії з подолання сили опору підйому і тим більшими будуть відповідні витрати. У статті обґрунтовується спосіб визначення величини механічної роботи залежно від часу подолання підйому.

Ключові слова: експлуатація, механічна робота локомотиву, сила опору

Способ подсчета энергетических расходов и расходов по ремонту подвижного состава и пути, связанных с передвижением поезда по участку, пропорционально величине измерителя «механическая работа», рассчитываемой как произведение силы на расстояние, не дает адекватных результатов. Чем большее время поезд затрачивает на преодоление отрезка пути с подъемом, тем больше затрата энергии по преодолению силы сопротивления подъема и тем больше будут соответствующие расходы. В статье обосновывается способ определения величины механической работы в зависимости от времени преодоления подъема.

Ключевые слова: эксплуатация, механическая работа локомотива, сила сопротивления

Method of calculating energy expenditure and expenditure on repair of rolling stock and track associated with the movement of trains on the section, proportionally to meter «mechanical work», which is calculated as the product of force over a distance does not give adequate results. The more time a train spends at overcoming the path segment with the rise, the greater the expenditure of energy to overcome the resistance force recovery and the greater will be the costs. The article explains the method of determining the value of mechanical work, depending on the time to overcome rising.

Keywords: operation, mechanical work of the locomotive, force of resistance

Постановка проблеми

В техніко-економічних розрахунках на залізничному транспорті (в частині, при проектуванні залізничних доріг, а також при вирішенні задач по визначенню оптимальних мас і швидкостей поїздів) на вимірювач «механічна робота локомотива», як правило, відносять такі витрати на ремонт вузлів і деталей локомотивів, які пов'язані з вироботкою, перетворенням і передачею енергії, а на вимірювач «механічна робота сил опору» – частину витрат на ремонт ходових частин і гальмівного обладнання подвижного складу і по поточному утриманню і ремонту шляху [8, с. 31]. При цьому механічна робота розраховується як добуток сили на відстань [8, с. 32].

Однак таким чином визначення витрат пропорційно вимірювачу «механічна робота», розрахованому як добуток сили на відстань, не дає адекватних результатів. В частині, сила опору руху від часу подолання підйому

шляху пов'язана з дією сили земного тяжіння і діє неперервно в часі, тому чим більше часу поїзд витрачає на подолання відрізка шляху з підйомом, тим більше витрати енергії на подолання сили опору і тим більше знос вузлів і деталей локомотива, пов'язаних з вироботкою, перетворенням і передачею енергії. Неслучайно на практиці машиністи інтуїтивно, виходячи з свого досвіду, намагаються подолати підйом шляху як можна швидше.

Якщо ж виходити з класичного визначення механічної роботи [8, с. 32], отримується, що величина механічної роботи і пов'язані з нею енергетичні витрати на подолання сили опору від часу подолання шляху не залежать від часу перебування поїзда на цьому підйомі.

Аналіз досліджень в даній області

Вивчення енергетичних витрат і витрат

на ремонты пути и подвижного состава с измерителем «механическая работа» при технико-экономических расчетах позволяет учитывать влияние на величину этих расходов таких факторов, как скорость движения, масса груза и подвижного состава, объем работы подвижного состава, особенности плана и профиля пути и др., поскольку изменение указанных факторов сказывается на изменении величины выполняемой механической работы сил тяги и сил сопротивления.

Этим обусловлено широкое применение данного измерителя при решении таких задач, как определение оптимальных масс и скоростей движения поездов, сравнение вариантов подвижного состава, сравнение вариантов трассы проектируемых железных дорог и т. п.

Затраты на ремонт пути и подвижного состава связывали с механической работой тяги еще в начале XX века Б. Д. Воскресенский [3, 4], А. Л. Васютынский [1, 2] и позже проф. Ю. В. Ломоносов [6]. Затем эта взаимосвязь получила признание и конкретное выражение благодаря работам проф. М. М. Протодьяконова [12] в основном при сравнении вариантов трассы проектируемых железных дорог.

Профессорами М. М. Протодьяконовым, А. Е. Гибшманом [5] и Г. И. Черномордиком [16, 17] были разработаны нормативы затрат, связанных с механической работой тяги и преодоления сил сопротивлений движению поезда, для условий проектирования железных дорог. Для условий эксплуатации существующих линий данная взаимосвязь впервые была применена в исследованиях проф. Г. И. Черномордика [16, 17] и позволила проф. А. Е. Гибшману впервые поставить и решить для паровой тяги вопрос об оптимальном в технико-экономическом отношении сочетании веса и скорости грузовых поездов и необходимой для этого мощности локомотивов [5]. Существенная работа по нормированию затрат, связанных с механической работой тяги и сил сопротивления движению, была выполнена в Гипротранстеи МПС СССР [11]. Ценные научные и проектные разработки в этом направлении выполнены, в частности, инженерами П. А. Луговым и Л. Г. Цыпиным [7].

В дальнейшем взаимосвязь между механической работой и расходами на топливо и ремонты использовалась К. К. Тихоновым [15], Н. Д. Малькевичем [9], Н. Ф. Зеньчуком и многими другими исследователями для определения расходов, зависящих от скорости движения поезда при поиске оптимальных скоростей и режимов движения поездов, а также в других оптимизационных задачах.

Выделение ранее неисследованной части проблемы

В рассмотренных выше исследованиях предлагаются различные способы подсчета механической работы, однако в их основе лежит определение работы как произведения силы на расстояние. Это общепринятое, классическое определение работы, как оно дается в учебниках или справочниках по физике [14, 18].

Например, в [8] приводятся следующие формулы для определения механической работы (в тонно-километрах) по активным силам (силам тяги локомотива) и по пассивным силам (преодолеваемым сопротивлениям):

$$R_{\text{л}} = \Sigma F_{\text{к}} l \cdot 10^{-6} = 4,17 (P + Q)(v_2^2 - v_1^2) 10^{-6} + (P + Q) \Sigma il \cdot 10^{-6} + (P + Q)(\Sigma \omega_0 l + \Sigma \omega_{\text{кр}} l_{\text{кр}} + \Sigma b_{\text{к}} l_{\text{т}}) 10^{-6}. \quad (1)$$

Сумма пассивных сил представляется в виде следующего выражения:

$$R_{\text{п}} = 4,17 (P + Q)(v_2^2 - v_1^2) 10^{-6} + (P + Q)(H_2 - H_1) 10^{-3} + (P + Q)(\Sigma \omega_0 L + 12,2 \Sigma \alpha^0 + \Sigma b_{\text{к}} l_{\text{т}}) 10^{-6}, \quad (2)$$

где $R_{\text{л}}$ – механическая работа локомотива, т-км; $F_{\text{к}}$ – средняя сила тяги локомотива на каждом элементе профиля, кГ;

l – протяжение элемента профиля, м;

L – протяжение участка, м;

Σil – сумма высот подъемов и спусков на участке, определяемая по разности конечной и начальной красной отметки продольного профиля участка в рассматриваемом направлении ($H_2 - H_1$), м;

$\Sigma \omega_0 l$ – сумма произведений основных удельных сопротивлений движению поезда (кГ/т) на каждом элементе профиля на его длину, определяемая произведением средней величины сопротивления на длину участка: $\omega_0 \Sigma l = \Sigma \omega_0 l$;

$\Sigma \omega_{\text{кр}} l_{\text{кр}}$ – сумма произведений сопротивлений от кривых на их длину, определяемая величиной $12,2 \Sigma \alpha^0$, где α^0 – сумма центральных углов кривых на всем участке;

$\Sigma b_{\text{к}} l_{\text{т}}$ – сумма произведений удельных тормозных сил поезда (кГ/т) на протяжение тормозных участков.

Однако, по указанным выше причинам, данный способ расчета не позволяет определить фактическую величину механической работы, выполняемой локомотивом по передвижению поезда, пропорционально которой можно было бы адекватно рассчитать расходы на топливо и расходы по износу, связанные с передвижением поезда.

Цель исследования

Целью данного исследования является разработка метода определения величины механической работы, выполняемой локомотивом, который позволяет учесть реальную величину механической работы, выполняемой локомотивом по преодолению сопротивления движению от подъемов пути, с учетом которой можно было бы более адекватно рассчитать расходы на топливо и расходы по износу, связанные с передвижением поезда.

Основной материал

Рассмотрим сначала процесс преодоления силы земного притяжения при вертикальном движении тела и связанные с ним затраты механической работы и энергии. Очевидно, что даже для того, чтобы тело, например вертолет, «висело» в воздухе неподвижно (не изменяло своего положения в пространстве) не за счет опоры или подвеса, а за счет работы его двигателей, необходимо расходовать энергию (топливо) и совершать работу двигателей для преодоления постоянно действующей силы земного притяжения. При этом работа в классическом понимании (произведение силы на расстояние) не совершается, а расходы на топливо и ремонты имеют место.

В соответствии с классической теорией [14, 18] механическая работа A_h (Дж) подъема тела на высоту h_g равна

$$A_h = m \cdot g \cdot h_g. \quad (3)$$

Механическую работу непрерывно действующей силы тяжести по передвижению тела вниз можно рассматривать как работу силы сопротивления движению тела вверх. При движении вверх или просто чтобы оставаться на месте, необходимо затрачивать работу, численно равную механической работе силы тяжести.

Механическая работа силы тяжести в единицу времени $t_g = 1$ с, представляет собой мощность W_g в ваттах (Вт):

$$W_g = A_g / t_g = m \cdot g \cdot h_g / t_g. \quad (4)$$

Эта мощность за 1 секунду численно равна механической работе свободного падения тела за это же время.

Если тело начинает движение вниз с нулевой скорости, и дальше скорость увеличивается с ускорением свободного падения g , то средняя скорость на отрезке пути, пройденном за время t_g , равна $v_{gc} = t_g \cdot g / 2 = t_g \cdot 0,5 \cdot g$ м/сек. Тогда расстояние h_g равно

$$h_g = t_g \cdot v_{gc} = t_g^2 \cdot 0,5 \cdot g, \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в формулу (4) получаем, что мощность силы тяжести, выраженная в ваттах равна:

$$W_g = m (1 \text{ с})^2 \cdot 0,5 \cdot g^2 / (1 \text{ с}) = \quad (6)$$

$$= m \cdot 0,5 \cdot g^2 = m \cdot 0,5 \cdot 9,81^2 = m \cdot 48,118,$$

что равно кинетической энергии за одну секунду свободного падения тела из состояния покоя с ускорением $g = 9,81$ м/с². Здесь величина 48,118 Вт представляет собой мощность, создаваемую силой земного притяжения $1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$.

Исходя из классического определения (3), механическая работа A_g силы тяжести, действующей на тело в свободном падении с высоты $h_g = t_g^2 \cdot 0,5 \cdot g$ за время, например, $t_g = 5$ с, составляет

$$A_g = m \cdot g \cdot h_g = m \cdot t_g^2 \cdot 0,5 \cdot g^2 = m \cdot 5^2 \cdot 0,5 \cdot 9,81^2 = \\ = m \cdot 1203 \text{ Дж},$$

а значит, и равна механической работе A_h подъема этого тела на ту же высоту $h_g = t_g^2 \cdot 0,5 \cdot g = 5^2 \cdot 0,5 \cdot 9,81 = 122,6$ м, откуда оно падало.

В реальных же условиях, например при вертикальном подъеме вертолета на эту же высоту $h_g = 122,6$ м из состояния покоя на земле с нормальной скоростью, например $v_a = 3,0$ м/с, механическая работа A_w за время подъема $t_v = 122,6 / 3,0 = 40,87$ с преодоления только мощности W_g работы силы его тяжести в соответствии с уравнением (6) составляет

$$A_w = W_g \cdot t_v = m \cdot 48,118 \cdot 40,87 = m \cdot 1967 \text{ Дж},$$

и больше $A_h = m \cdot g \cdot h_g$ в $m \cdot 1967 / m \cdot 1203 = 1,63$ раза.

При изменении времени t_v за счет изменения скорости v_a механическая работа A_w подъема вертолета изменяется пропорционально t_v и обратно пропорционально v_a (без учета относительно небольшой работы на приращение кинетической энергии, за счет которой вертолет может еще подниматься без работы двигателя в течение $t_K = v_a / g = 3 / 9,81 = 0,306$ сек и подняться еще на $\Delta h_K = t_K \cdot v_{ac} = 0,306 \cdot 3 / 2 = 0,459$ м).

Аналогичным образом механическая работа A_w преодоления мощности работы силы тяжести тел затрачивается пропорционально времени опускания вертолета с постоянной скоростью без ускорения или при нахождении его в воздухе в неподвижном состоянии.

В практике нет и не может быть таких вариантов механической работы преодоления силы тяжести, т. е. силы сопротивления подъему тела или его опусканию с постоянной скоростью без

ускорения силы тяжести, при которых эта работа A_h преодоления силы сопротивления была бы $A_h = m \cdot g \cdot h_g$, или, что одно и то же, $A_h = K_{gv}$, т. е. равна кинетической энергии свободного падения тела, поскольку на тело, находящееся в движении или в покое с отрывом от земли, непрерывно действует сила земного притяжения, на преодоление которой непрерывно затрачивается мощность работы силы преодоления этого сопротивления.

Следовательно, механическая работа преодоления только силы тяжести пропорциональна времени нахождения тела с отрывом от земли в движении в любом направлении или в покое. Однако для изменения скорости движения тел в пространстве затрачивается еще механическая работа на приращение кинетической энергии, соответствующей изменению скорости передвижения тел.

Обоснованные выше выводы, подтвержденные примером расчетов механической работы преодоления сил сопротивления подъему тела с отрывом от земли, справедливы и при перемещении тел с силами сопротивления движению в условиях без отрыва от земли.

Рассмотрим пример движения поезда на положительном уклоне пути. В соответствии с Правилами тяговых расчетов [12, с. 8], дополнительное удельное сопротивление движению от уклона пути (подъема или спуска) ω_i учитывается в промилле ($\pm i \text{ ‰}$). При этом $1 \text{ ‰} = 1 \text{ кгс/т}$.

$$\omega_i = \pm i. \quad (7)$$

Соответственно, затрата механической работы только на преодоление крутизны уклона пути, выраженная в $\text{кгс} \cdot \text{м}$, в соответствии с классическим подходом (как произведение силы на расстояние) равна

$$A_k = m \cdot i \cdot l, \quad (8)$$

где m – масса поезда, т;

i – удельное сопротивление движению от уклона пути, кгс/т ;

l – расстояние передвижения (длина уклона пути), м;

$m \cdot i$ – сила сопротивления движению поезда от уклона пути, $\text{кГс} / \text{т}$.

Для случая движения поезда массой 5000 т на подъеме пути $i = 5 \text{ ‰}$ длиной 500 м со скоростью 50 км/ч (13,9 м/с) механическая работа по преодолению только сопротивления от уклона пути, рассчитанная в соответствии с классическим подходом, равна:

$$\begin{aligned} A_k &= 5\,000 \cdot 5 \cdot 500 = 12\,500\,000 \text{ кгс} \cdot \text{м}, \\ &\text{или } A_k = 12\,500\,000 \cdot 9,81 = \\ &= 122\,500\,000 \text{ Дж} = 122,6 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

Однако, сила сопротивления движению от уклона пути связана с действием силы земного

притяжения и действует непрерывно во времени, поэтому чем большее время поезд затрачивает на преодоление отрезка пути с подъемом, тем больше затрата энергии по преодолению силы сопротивления подъема пути.

Рассчитаем фактическую величину механической работы, выполняемой локомотивом. Исходя из предложенного уравнения (4) фактическая механическая работа только на преодоление крутизны уклона пути A_ϕ силы сопротивления движению состава поезда массой m в единицу времени 1 с, т. е. мощность W_ϕ силы этого сопротивления движению (выраженная в Вт) определяется равенством:

$$W_\phi = m \cdot 0,5 (i \cdot 9,81)^2. \quad (9)$$

Фактическая механическая работа A_ϕ (выраженная в Дж) по передвижению состава поезда на расстояние l пропорциональна мощности W_ϕ и времени t действия этой силы сопротивления движению.

$$A_\phi = W_\phi t = m \cdot 0,5 (i \cdot 9,81)^2 t. \quad (10)$$

Время t определяется при этом отношением расстояния к скорости движения поезда: $t = L / v = 500 / 13,9 = 35,9 \text{ сек}$.

Фактическая величина механической работы, выполняемой локомотивом, равна

$$\begin{aligned} A_\phi &= 5000 \cdot 0,5 (5 \cdot 9,81)^2 \cdot 35,9 = \\ &= 215\,929\,749 \text{ Дж} = 215,9 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

Как видно из расчетов, фактическая величина затраты механической работы только на преодоление дополнительного сопротивления движению от уклона пути в данном конкретном случае больше величины, рассчитанной в соответствии с классическим подходом, в $215,9 / 122,6 = 1,8$ раз.

При повышении скорости движения поезда величина механической работы по преодолению только сопротивления от уклона пути будет уменьшаться, поскольку уменьшается время действия мощности, направленной на преодоление этого сопротивления. Например, при преодолении того же подъема пути со скоростью $v = 90 \text{ км/ч}$ ($v = 25 \text{ м/с}$) время нахождения на подъеме равно $t_c = 500 / 25 = 20 \text{ с}$. Механическая работа равна:

$$\begin{aligned} A_\phi &= 5000 \cdot 0,5 (5 \cdot 9,81)^2 \cdot 20 = \\ &= 120\,295\,125 \text{ Дж} = 120,3 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

В данном случае при скорости 90 км/ч фактическая величина механической работы получилась близкой к величине, рассчитанной на основе классического подхода.

Выводы

В технико-экономических расчетах при про-

ектировании железных дорог измеритель механическая работа применяется для подсчета пропорционально ему энергетических расходов и расходов по ремонту подвижного состава и пути. При этом механическая работа рассчитывается как произведение силы на расстояние. Такой подход при расчете измерителя «механическая работа» и пропорционально ей энергетических расходов, связанных с передвижением поездов по участкам, не соответствует действительности. В частности, сила сопротивления движению от уклонов пути связана с действием силы земного притяжения и действует непрерывно во времени, поэтому чем большее время поезд затрачивает на преодоление отрезка пути с подъемом, тем больше затрата энергии по преодолению силы сопротивления подъема пути и тем больше износ узлов и деталей локомотива, связанных с выработкой, преобразованием и передачей энергии.

Поэтому механическую работу преодоления непрерывно действующих во время движения тела сил сопротивления его движению, и в частности, сопротивления от подъемов пути, следует определять по времени работы мощности силы преодоления этого сопротивления, обеспечивающей передвижение тела в пространстве на соответствующее расстояние. Или, что одно и то же, механическая работа равна сумме работы мощности непрерывно действующих сил во время движения тела, создающих эту мощность сопротивления его движению за период перемещения на это расстояние.

Предлагаемый подход позволяет рассчитывать величину механической работы локомотива, соответствующую действительности, и определять пропорционально ей энергетические затраты и затраты по износу подвижного состава и пути, связанные с передвижением поездов по участкам, при проектировании железных дорог и выборе вариантов.

Кроме того, данное понимание величины механической работы изменяет практические подходы к определению по минимуму энергетических затрат оптимальных скоростей движения поездов на действующих железнодорожных линиях, способствуя этим самым сбережению затрат энергетических ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васютынский, А. Л. Годовые расходы и эксплуатационная длина русских железных дорог [Текст] / А. Л. Васютынский // Инженер. – 1905. – № 3-4.
2. Васютынский, А. Л. Железные дороги [Текст] / А. Л. Васютынский. – Варшава, 1905.
3. Воскресенский, Б. Д. Основные начала механики железнодорожного транспорта [Текст] / Б. Д. Воскресенский, – Экспериментальный институт путей сообщения. Бюл. № 9. – 1919.
4. Воскресенский, Б. Д. Теория работы железнодорожных поездов [Текст] / Б. Д. Вознесенский. – Екатеринослав, 1903.
5. Гибшман, А. Е. Эксплуатационно-экономические обоснования выбора параметров перспективных паровозов [Текст] / А. Е. Гибшман // Вопросы экономики железнодорожного транспорта: Сб. статей. – М.: Трансжелдориздат, 1948.
6. Ломоносов, Ю. В. Научные основы эксплуатации железных дорог [Текст] / Ю. В. Ломоносов. – Изд. 4-е. – Берлин, 1922 (русс).
7. Луговой, П. А. Техничко-экономические расчеты при реконструкции железных дорог [Текст] / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин. – М.: Трансжелдориздат, 1963.
8. Луговой, П. А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте [Текст] / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин, Р. А. Аукуционек. – М.: Транспорт, 1973. – 232 с.
9. Малькевич, Н. Д. Исследование зависимости между оптимальным планом формирования, весом и скоростью движения грузовых поездов [Текст]: Автореф. и дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Н. Д. Малькевич. – Гомель: БИИЖТ, 1966.
10. Михальцев, Е. В. Себестоимость железнодорожных перевозок [Текст] / Е. В. Михальцев. – М.: Трансжелдориздат, 1957
11. Нормы эксплуатационных расходов для технико-экономических расчетов [Текст] / ГипротрансЭи МПС. – М., 1961.
12. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
13. Протодяконов, М. М. Изыскание и проектирование железных дорог [Текст] / М. М. Протодяконов. – М., Трансжелдориздат, 1934.
14. Справочник по элементарной математике, механике и физике [Текст]. – Изд. десятое. – Минск: Наука и техника, 1968. – 200 с.
15. Тихонов, К. К. Оптимальные ходовые скорости грузовых поездов [Текст] / К. К. Тихонов. – М.: Транспорт, 1964. – 262 с.
16. Черномордик, Г. И. Материалы по сравнительному анализу методов овладения грузооборотом [Текст] / Г. И. Черномордик и др. – М.: Трансжелдориздат, 1935.
17. Черномордик, Г. И. Техничко-экономические обоснования норм проектирования новых железных дорог [Текст] / Г. И. Черномордик. – М.: Трансжелдориздат, 1948.
18. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика [Текст]: учебн. для техн. вузов / А. А. Яблонский. – 6-е изд., испр. – М.: Высшая шк., 1984. – 423 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2010.

Принята в печать 28.03.2011.