

ТОРМОЗНАЯ СИЛА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

BRAKE FORCE OF TRACKED VEHICLES

В.И. КОПОТИЛОВ, к.т.н.

Тюменское высшее военно-инженерное командное училище, г. Тюмень, Россия, vikopotilov@mail.ru

V.I. KOPOTILOV, PhD in Engineering

Tyumen High Military Engineering Command School, Tyumen, Russia, vikopotilov@mail.ru

Принято считать, что замедление и остановку машины вызывают силы сцепления ее гусениц с грунтовой поверхностью. Однако силовой анализ показывает, что, хотя эти силы при торможении и играют важную роль, непосредственно причиной замедления машины являются продольные составляющие внутренних сил, прикладываемых к валам затормаживаемых ведущих колес машины и передних опорных катков гусеничного движителя. Сумма этих продольных усилий, направленных против хода движения гусеничной машины, и составляет тормозную силу гусеничной машины. При этом величина этой суммарной тормозной силы в конечном счете определяется отношением тормозного момента, развиваемого силами трения, к радиусу ведущих колес, с которыми сопряжены тормозные устройства.

Поскольку при торможении гусеничной машины продольная реакция уравновешена, то она не может быть непосредственной причиной замедления машины, т.е. ее тормозной силой. К тому же, продольная реакция, приложенная к нижней неподвижной части гусеницы, не совершает механическую работу и не может поглощать кинетическую энергию движущейся машины. Такую работу совершает внутренняя тормозная сила $P_{\text{тор}}$, развивающая при торможении отрицательную (тормозную) мощность. Выясняется, что при торможении продольная реакция нужна вовсе не для того, чтобы вызывать замедление, а для того чтобы она, будучи внешней силой, уравновешивала часть внутренних сил гусеничной машины. В результате ее действия неуравновешенная часть внутренних сил образует внутреннюю тормозную силу, которая непосредственно вызывает замедление и остановку машины. При этом продольная реакция опорной поверхности, без которой невозможно образование внутренней тормозной силы, ограничивает как нижнее, так и верхнее значение последней, а сами эти силы численно равны.

Тот факт, что тормозная сила гусеничной машины, как и ее сила тяги, является внутренней силой, совсем не противоречит теоремам о движении центра масс или изменении количества движения механической системы, которые справедливы только для изолированных механических систем, не имеющих источника активных внутренних сил.

Ключевые слова: гусеничная машина, ведущее колесо, опорный каток, гусеница, тормозной момент, тормозная сила, продольная реакция, опорная поверхность.

It is commonly supposed that the slowing down and stopping of vehicle is caused by adhesion of its tracks to the dirt surface. However, force analysis shows that, although these forces play an important role during braking, the longitudinal components of the internal forces applied to the shafts of the vehicle's braked drive wheels and the front support rollers of the tracked propulsion are directly responsible for its deceleration. The sum of these longitudinal forces directed against the motion of the tracked vehicle constitutes the braking force of the tracked vehicle. The value of this total braking force is ultimately determined by the ratio of the braking torque developed by the friction forces to the radius of the drive wheels with which the braking devices are coupled.

Since when braking a tracked vehicle, the longitudinal reaction is balanced, it cannot be the direct cause of the deceleration of the vehicle, i.e. its braking force. In addition, the longitudinal reaction applied to the lower fixed part of the track does not perform mechanical work and cannot absorb the kinetic energy of a moving vehicle. This work is performed by the internal braking force $P_{\text{тор}}$, which develops negative (braking) power during braking. It turns out that during braking, the longitudinal reaction is needed not at all to cause a slowdown, but as an external force, to balance some of the internal forces of the tracked vehicle. As a result of its action, the unbalanced part of the internal forces forms the internal braking force, which directly causes the machine to slow down and stop. In this case, the longitudinal reaction of the supporting surface, without which the formation of an internal braking force is not possible, limits both the lower and upper values of the latter, and these forces themselves are numerically equal. The fact that the braking force of a tracked vehicle, like its traction force, is an internal force, does not contradict theorems on the movement of the center of mass or the change in the amount of motion of a mechanical system, which are valid only for isolated mechanical systems that do not have a source of active internal forces.

Keywords: tracked vehicle, drive wheel, track roller, track, braking torque, braking force, longitudinal reaction, bearing surface.

Введение

Замедление и остановку гусеничной машины обеспечивает ее тормозная система, которая создает искусственное сопротивление движению, т.е. тормозную силу.

Несмотря на важную роль тормозной силы, представления о ней в литературе по гусеничным машинам крайне скудны и, к сожалению, не совсем верны. Практически считается, что замедление и остановку машины вызывает сила сцепления ее гусениц с грунтовой поверхностью [1, 2]. Такой взгляд на тормозную силу, на первый взгляд, кажется вполне очевидным, хотя и не подкрепляется соответствующим теоретическим обоснованием.

Цель исследования

Аналитическое обоснование понятия тормозной силы гусеничной машины.

Результаты исследования и их обсуждение

Силовой анализ процесса торможения гусеничной машины показывает, что непосредственно причиной ее замедления и остановки является вовсе не продольная реакция грунта, хотя она и играет при торможении важную роль.

Чтобы разобраться в том, какая именно сила в действительности тормозит гусеничную машину, рассмотрим процесс ее торможения.

У гусеничной машины для торможения и остановки предусматривается, как правило, два остановочных тормоза, сопряженных с ведущими колесами. Схема расположения тормозов в случае привода ведущих колес посредством бортовых фрикционов приведена на рис. 1.

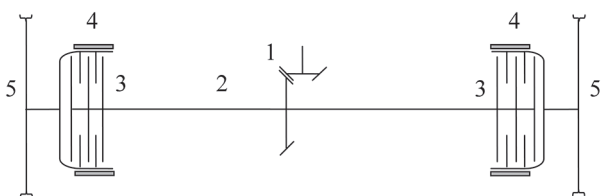


Рис. 1. Схема привода ведущих колес:

- 1 – главная передача; 2 – вал привода;
- 3 – фрикционная муфта; 4 – тормоз;
- 5 – ведущее колесо машины

Основу каждого из них составляет обычно тормозной шкив, цилиндрическую поверхность которого охватывает стальная согнутая по дуге окружности лента, к внутренней поверхности которой прикреплены фрикцион-

ные накладки. Ленточные тормоза гусеничной машины самозатягивающиеся, плавающего типа. При торможении лента прижимается к поверхности тормозного шкива, и на его поверхности образуются силы трения, которые создают тормозной момент (M_t). Этот момент воспринимает ведущее колесо машины, взаимодействующее с гусеницей, в результате чего на последнюю передается соответствующее продольное усилие.

Рассмотрим механизм образования силы, непосредственно вызывающей замедление гусеничной машины, т.е. тормозной силы.

Примем, что гусеничная машина имеет заднее расположение ведущих колес и тормозных механизмов.

При торможении силы трения образуют силовую пару, которая характеризуется моментом трения M_t , т.е. тормозным моментом, который передается ведущему колесу машины. Представим эту пару в виде двух сосредоточенных сил \vec{F}_O и \vec{F}_A (рис. 2).

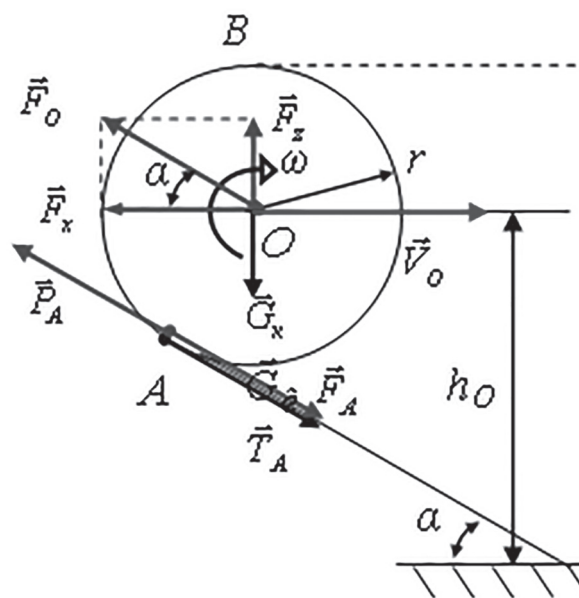


Рис. 2. Схема сил, прикладываемых к колесу гусеничного движителя

Так как плечо этой пары равно радиусу r колеса, то численное значение каждой силы:

$$F_O = F_A = \frac{M_t}{r}. \quad (1)$$

Одна из сил пары (\vec{F}_O) прикладывается к оси O колеса, а другая (\vec{F}_A) к точке A , находящейся на расстоянии r от оси его вращения (рис. 2). Последняя сила передается гусенице

в виде силы \vec{O}_A , которая прижимает ее дугообразный участок AB к колесу и натягивает верхнюю часть гусеницы. В ответ на действие силы \vec{O}_A гусеница создает аналогичную по величине реакцию \vec{P}_A ($P_A = T_A$), которая прикладывается к колесу. В результате окружная сила \vec{F}_A колеса оказывается уравновешенной реакцией \vec{P}_A гусеницы ($\vec{F}_A + \vec{P}_A = 0$).

Вторую силу пары, т.е. силу \vec{F}_O , приложенную к оси колеса, разложим на две составляющие \vec{F}_x и \vec{F}_z .

Вертикальная составляющая \vec{F}_z численно равна $F_z = F_O \cdot \sin \alpha$, стремится сместить колесо вверх, но ее действие уравновешивается суммарной силой (\vec{G}_k) тяжести самого колеса и частью силы тяжести корпуса самой машины ($\vec{G}_k + \vec{F}_z = 0$).

Горизонтальная составляющая \vec{F}_x , численно равная

$$F_x = F_O \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

тормозит движение вала колеса в продольном направлении и воспринимается корпусом гусеничной машины в виде силы \vec{F}'_x . Так как вектор этой продольной силы направлен против хода гусеничной машины, то сила \vec{F}'_x вызывает ее замедление.

Однако продольная сила \vec{F}'_x – это не единственная сила, замедляющая ход машины. Другой силой, тормозящей гусеничную машину, является продольное усилие, воспринимаемое передним опорным катком движителя. Рассмотрим, как оно при этом образуется.

Опорная часть гусеницы, взаимодействующая с грунтовой поверхностью вследствие силы натяжения \vec{O}_A , создаваемого тормозящим колесом, стремится вытянуть гусеницу из-под опорных катков движителя, которые прижимают ее всей тяжестью машины. Однако, грунтовая поверхность, взаимодействуя с траками гусеницы, создает продольную (\vec{R}_x) реакцию (рис. 3), которая, являясь силой сцепления гусеницы с опорной поверхностью, препятствует этому. Поэтому участок гусеницы, непосредственно примыкающий к переднему опорному катку I , в процессе торможения машины испытывает действие трех сил: \vec{R}_x , \vec{O}_D и \vec{Q}' (рис. 3). При этом сила \vec{O}_D представляет собой усилие, передаваемое верхней частью гусеницы вследствие приложения к ней силы \vec{O}_A на другом конце гусеницы (рис. 2).

Две первые из выше указанных сил, т.е. \vec{R}_x и \vec{O}_D , складываясь, определяют силу \vec{Q} давле-

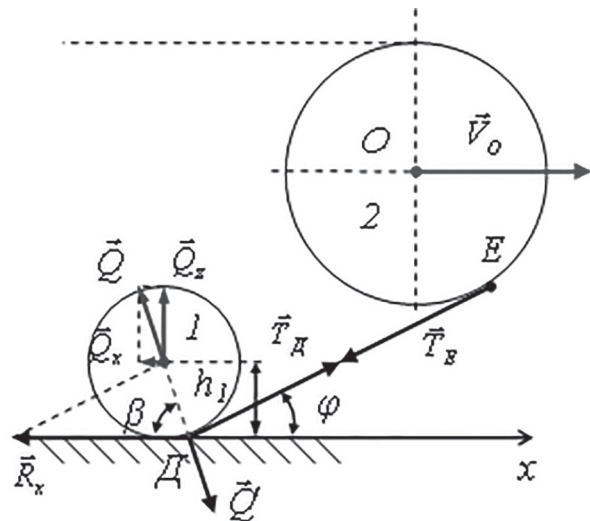


Рис. 3. Силы, прикладываемые к переднему катку гусеничной машины

ния гусеницы на каток (на рис. 3 она смещена от точки D по линии действия в центр катка), который в ответ и создает реакцию \vec{Q}' , прикладываемую к гусенице в точке D .

Величину силы \vec{Q} определим из уравнения равновесия трех указанных сил, действующих на рассматриваемый участок гусеницы, в проекции на продольную координатную ось x :

$$-R_x + Q' \cos \beta + T_D \cos \varphi = 0. \quad (3)$$

Учитывая, что $R_x = T_D = T_E = T_A = F_A = F_O$, получаем, что

$$Q' = \frac{F_O \cdot (1 - \cos \varphi)}{\cos \beta}. \quad (4)$$

Сила \vec{Q} создает продольное усилие \vec{Q}_x , численно равное $Q_x = Q \cdot \cos \beta$. Так как $Q = Q'$, а сила Q' выражается формулой (4), то получаем, что

$$Q_x = F_O \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (5)$$

Эта продольная сила, как и сила F_x , прикладываемая к тормозящему колесу, также передается на корпус, направлена против хода гусеничной машины и вызывает ее замедление.

Складывая (5) и (2), получаем выражение значения суммарной продольной силы, тормозящей гусеничную машину:

$$P_{\text{тор}} = Q_x + F_x = F_O \cdot (1 + \cos \alpha - \cos \varphi). \quad (6)$$

Если углы свеса двух участков гусеницы, примыкающих к тормозному и направляющему колесу машины, одинаковы ($\alpha = \varphi$), то $P_{\text{тор}} = F_O$.

При этом геометрическая точка приложения вектора тормозной силы $\vec{P}_{\text{тор}}$ располагается на высоте

$$h(\vec{P}_{\text{тор}}) = \frac{h_0 F_x + h_1 Q_x}{P_{\text{тор}}} \quad (7)$$

от нижней (опорной) части гусеницы.

Если же углы свеса неодинаковы ($\alpha \neq \varphi$), то к двум указанным выше продольным силам \vec{Q}_x и \vec{F}_x , вызывающим замедление машины, добавляется еще одна сила сопротивления, которая через колеса машины передается на корпус и обусловлена разницей продольных составляющих двух сил \vec{O}_E и \vec{O}_A , приложенных к верхней части гусеницы:

$$\begin{aligned} \Delta T_x &= T_E \cdot \cos \varphi - T_A \cdot \cos \alpha = \\ &= F_O \cdot (\cos \varphi - \cos \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Если же учесть это продольное усилие, то оказывается, что величина тормозной силы $P_{\text{тор}}$ машины все равно равна F_O . Действительно,

$$\begin{aligned} P_{\text{тор}} &= Q_x + F_x + \Delta T_x = F_O (1 + \cos \alpha - \cos \varphi) + \\ &+ F_O (\cos \varphi - \cos \alpha) = F_O. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, можно констатировать, что тормозная сила гусеничной машины не зависит от соотношения углов переднего и заднего свеса гусеницы и численно равна силе F_O .

Так как $F_O = M_T / r$, то численное значение суммарной тормозной силы гусеничной машины:

$$P_{\text{тор}} = \frac{M_T}{r}. \quad (10)$$

При служебном (умеренном) торможении численное значение этой тормозной силы регулирует водитель, который, задавая соответствующее значение сил трения в тормозном механизме, определяет фактическую величину тормозного момента M_T .

Рассмотрим теперь величину продольной реакции \vec{R}_x , воспринимаемой гусеницей при торможении, и ее роль в процессе образования тормозной силы.

Из уравнения (3) имеем:

$$R_l = Q' \cdot \cos \beta + T_D \cos \alpha. \quad (11)$$

Так как $T_D = F_O$, а усилие Q' выражается формулой (4), то нетрудно установить, что продольная реакция опорной поверхности численно равна тормозной силе:

$$R_x = F_O = P_{\text{тор}} = M_T / r. \quad (12)$$

Поскольку при торможении гусеничной машины продольная реакция уравновешена силами \vec{O}_D и \vec{Q}' ($\vec{R}_x + \vec{O}_D + \vec{Q}' = 0$), то \vec{R}_x , естественно, не может быть непосредственной причиной замедления машины, т.е. ее тормозной силой. К тому же, продольная реакция \vec{R}_x , приложенная к нижней неподвижной части гусеницы ($\vec{V}_r^H = 0$), не совершает механическую работу

$$A = \vec{R}_x \cdot \vec{V}_r^H = -R_x \cdot V_r^H = -R_x \cdot 0 = 0$$

и не может поглотить кинетическую энергию движущейся машины. Такую работу совершает внутренняя тормозная сила $P_{\text{тор}}$, развиваемая при торможении тормозную (отрицательную) мощность $N_{\text{тор}} = -P_{\text{тор}} \cdot V_O$.

Это означает, что при торможении продольная реакция \vec{R}_x нужна вовсе не для того чтобы вызывать соответствующее замедление, а для того чтобы она, будучи внешней силой, нарушала уравновешенность совокупности внутренних сил гусеничной машины. В результате ее действия часть внутренних сил, а именно продольные силы \vec{Q}_x , \vec{F}_x и $\Delta \vec{O}_x$, и образуют внутреннюю тормозную силу, которая непосредственно вызывает замедление и остановку гусеничной машины.

Такая роль продольной реакции позволяет ей выступать в роли силового фактора, ограничивающего диапазон реализации величины тормозной силы и проявляется в следующем.

Если продольная реакция \vec{R}_x по каким-либо причинам исчезает ($\vec{R}_x = 0$), например при отрыве гусеницы от опорной поверхности, то одновременно исчезает и тормозная сила.

Если реакция опорной поверхности \vec{R}_x достигает своего предела по сцеплению $R_x^{\text{max}} = G \cdot \varphi$, и гусеничная машина при экстренном торможении переходит в скольжение, то это вызывает соответствующее ограничение величины ее тормозной силы и, как следствие, развиваемого замедления. В том случае, когда колеса и гусеницы заблокированы, гусеничная машины может рассматриваться как одно простое тело, совершающее скольжение по опорной поверхности с ускорением $j = g \cdot \varphi_x$ (где φ_x – величина коэффициента продольного сцепления гусениц с грунтом).

Заключение

В заключение отметим: тот факт, что тормозная сила гусеничной машины, как и ее сила тяги [3], является внутренней силой, совсем

не противоречит теоремам о движении центра масс или изменении количества движения механической системы, которые справедливы только для изолированных механических систем, не имеющих источника активных внутренних сил.

Литература

1. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1968. 396 с.
2. Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Теория / под ред. проф. В.П. Бойкова. Минск: Новое знание; М.: Инфра-М, 2012. 543 с.

3. Коптилов В.И. Сила тяги гусеничной машины // Вестник машиностроения, 2017, № 6. С. 3–7.

References

4. Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnyh gusenichnyh mashin [Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 396 p.
5. Mnogocelevye gusenichnye i kolyosnye mashiny. Teoriya [Multipurpose tracked and wheeled vehicles]. Pod red. prof. V.P. Boykova. Minsk: Novoe znanie; Moscow: Infra-M Publ., 2012. 543 p.
6. Koptilov V.I. Traction of caterpillar vehicle. Vestnik mashinostroeniya, 2017, No 6, pp. 3–7 (in Russ.).