

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

УДК 502/504:631.372

С. Р. СИРЕКАНЯН

Национальный аграрный университет Армении, г. Ереван, Армения

ПЛАВНЫЙ ПОВОРОТ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА

Рассмотрена задача по определению координат центра вращения и значение момента сил сопротивления при плавном повороте гусеничного трактора (отстающая тележка выключена, но не заторможена) на горизонтальном участке, без крюковой нагрузки. Координаты центра вращения трактора и значение результирующего момента сил сопротивления определены из условия минимальности принуждения для совершения поворота. Выявлено, что для идеального трактора (центр тяжести совпадает с геометрическим центром) момент сопротивления поворота приобретает минимальное значение, когда центр поворота совпадает со следом центра тяжести. Выведено уравнение момента сил сопротивления вращению трактора, где помимо таких параметров как вес, продольная база и коэффициент сопротивления поворота, учитывается также влияние поперечной базы трактора (ширины колеи). При подстановке в уравнение значение ширины колеи равной нулю, оно трансформируется в общеизвестную формулу момента сопротивления повороту, которая справедлива для одной гусеничной тележки. Проведена сравнительная оценка моментов сопротивления поворота, рассчитанные вновь выведенной и существующей формулами, которая показала, что по сравнению с полученной автором существующая формула дает ошибку в сторону уменьшения момента сопротивления от 180 до 210 % в зависимости от значения соотношения ширины колеи на продольную базу трактора. Анализом выведенной зависимости установлено, что при данном значении продольной базы трактора чем меньше отношение колеи на базу, тем меньше момент сопротивления и трактор более маневренный.

Гусеничный трактор, поворот, центр вращения, полюс поворота, момент сопротивления поворота.

There is considered a task on determination of the coordinates of the rotation center and the value of the moment of resistance forces at the smooth turn of the caterpillar tractor (the lagging cart is disconnected but not braked) on the horizontal part, without a hook loading. The coordinates of the rotation center of the tractor and value of the resultant moment of resistance forces are determined from the condition of the minimal compulsion for making a turn. It is revealed that for an ideal tractor (the center of gravity coincides with the geometric center) the moment of turn acquires the minimal value when the center of turn coincides with the trace of the gravity center. There is derived an equation of the moment of resistance forces to the tractor turning where besides such parameters as weight, longitudinal base and coefficient of turn resistance there is also taken into consideration the influence of the transversal base of the tractor (rut width). When inserting into the equation the rut width value is equal to zero. It is transformed into the well-known formula of the turn resistance moment which is suitable for one caterpillar cart. A comparative assessment of moments of rotation resistance calculated by means of the new one and existing formulas which showed that in comparison with the new one derived by the author, the existing one makes a mistake in the direction of lessening of the resistance moment from 180 to 210 % depending on the value of the ration of the rut width on the longitudinal tractor base. The analysis of the derived dependence established that under the given value of the longitudinal tractor base the less the ratio of the rut on the base the less the moment of resistance and the tractor is more maneuverable.

Caterpillar tractor, turn, center of rotation, pole of turn, moment of turn resistance.

Определены координаты центра вращения и значение момента сил сопротивления при плавном повороте гусеничного трактора (отстающая тележка выключена, но не заторможена) на горизонтальном участке, когда центр вращения может находиться только внутри колеи трактора и будет располагаться в такой точке, относительно которой результирующий момент сил сопротивления имеет минимальное значение.

Допустим центром вращения является точка C (рис. 1) с координатами x_c и y_c и трактор совершает поворот в левую сторону. Следом центра тяжести трактора является точка Π с координатами $x_\Pi = L/2$, $y_\Pi = B/2$. В зависимости от формы и интенсивности распределения сил сопротивлений между гусеницами и опорной поверхностью мгновенный центр вращения C является блуждающей точкой внутри прямоугольника $B \times L$. Однако при данной картине распределения сил сопротивления точка C имеет фиксированное расположение с постоянными координатами $x_c = \text{const}$ и $y_c = \text{const}$.

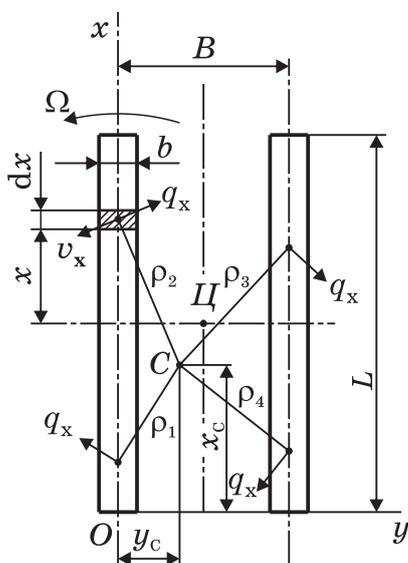


Рис. 1.

Определены радиус-векторы ρ_i для отдельных участков гусениц. Из рис. 1 следует:

для интервала $0 \leq x \leq x_c$

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \sqrt{(x_c - x)^2 + y_c^2}; \\ \rho_3 &= \sqrt{(x_c - x)^2 + (B - y_c)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

для интервала $x_c \leq x \leq L$

$$\left. \begin{aligned} \rho_2 &= \sqrt{(x_c - x)^2 + y_c^2}; \\ \rho_4 &= \sqrt{(x_c - x)^2 + (B - y_c)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Результирующий момент сил сопротивлений будет:

$$M_c = \int_0^{x_c} b q_x \rho_1 dx + \int_{x_c}^L b q_x \rho_2 dx + \int_0^{x_c} b q_x \rho_3 dx + \int_{x_c}^L b q_x \rho_4 dx.$$

Имея ввиду, что при отсутствии крюковой нагрузки $q_x = G\mu/(2Lb)$, где q_x – удельная сила трения, тогда:

$$M_c = bq \left[\int_0^{x_c} \sqrt{(x_c - x)^2 + y_c^2} dx + \int_{x_c}^L \sqrt{(x - x_c)^2 + (B - y_c)^2} dx + \int_0^{x_c} \sqrt{(x_c - x)^2 + (B - y_c)^2} dx + \int_{x_c}^L \sqrt{(x - x_c)^2 + y_c^2} dx \right]. \quad (3)$$

Выражение момента сил сопротивления (3) может быть представлено в виде:

$$M_c = bql = bq(I_1 + I_2 + I_3 + I_4). \quad (4)$$

Подставляя эти значения I_1, I_2, I_3, I_4 и упрощая, можно получить:

$$I = \frac{1}{2} \left\{ x_c \sqrt{x_c^2 + y_c^2} + x_c \sqrt{x_c^2 + (B + y_c)^2} + (L - x_c) \sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2} + (L - x_c) \sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2} + y_c^2 \ln \left[\frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + y_c^2}}{y_c} \right] + \frac{\left[(L - x_c)^2 + \sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2} \right]}{y_c^2} + (B - y_c)^2 \ln \left[\frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + (B - y_c)^2}}{(B - y_c)^2} \right] \right\}.$$

$$\left. \left[\frac{(L - x_c) \sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2}}{(B - y_c)^2} \right] \right\}. \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), $I = f(x_c, y_c)$ является функцией двух переменных и необходимо выяснять при каких значениях x_c, y_c функция $f(x_c, y_c)$ приобретает минимальное значение, т. к. при повороте трактор будет вращаться путем наименьшего сопротивления.

Можно воспользоваться математическим методом дифференцирования под знаком интеграла применением формулы

$$\frac{d}{dy} \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} f(x, y) dx = \int_{\alpha(y)}^{\beta(y)} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + \beta'(y) \cdot f[\beta(y), y] - \alpha'(y) \cdot f[\alpha(y), y], \quad (6)$$

где $\alpha(y)$ и $\beta(y)$ – пределы интеграла, зависящие от параметров x_c, y_c .

В данном случае для интегралов I_1 и I_3 параметр x_c является верхним пределом интегрирования, т. е. $\beta(y) = x_c, \beta'(y) = 1, \alpha(y) = 0, \alpha'(y) = 0$, а для интегралов I_2 и I_4 параметр x_c является нижним пределом интегрирования, т. е. $\alpha(y) = x_c, \alpha'(y) = 1, \beta(y) = L, \beta'(y) = 0$.

Определили экстремальные значения функции $I = f(x_c, y_c)$.

Для параметра x_c , согласно формуле (6) получено:

$$\frac{\partial I_1}{\partial x_c} = \int_0^{x_c} \frac{\partial \left[\sqrt{(x_c - x)^2 + y_c^2} \right]}{\partial x_c} dx + \beta'(x_c) \cdot f[\beta(x_c), y_c] = -y_c + \sqrt{x_c^2 + y_c^2} + y_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}. \quad (7)$$

Аналогичным образом производя вычисления для остальных интегралов. Суммируя полученные значения и приравнявая к нулю, можно получить:

$$\frac{\partial I}{\partial x_c} = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} - \sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2} + \sqrt{x_c^2 + (B - y_c)^2} - \sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2} = 0. \quad (8)$$

По параметру y_c согласно формуле (6) получено:

$$\frac{\partial I_1}{\partial y_c} = y_c \ln \frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + y_c^2}}{y_c}. \quad (9)$$

Произведя аналогичные вычисления для остальных интегралов, суммируя полученные значения, приравняв к нулю, получено:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1}{\partial y_c} &= y_c \ln \left[\frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + y_c^2}}{y_c} \right] \\ &+ \frac{\left[(L - x_c) + \sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2} \right]}{y_c^2} \\ &- (B - y_c) \cdot \ln \left[\frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + (B - y_c)^2}}{(B - y_c)^2} \right] \\ &- \frac{\left[(L - x_c) + \sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2} \right]}{(B - y_c)^2} = 0. \quad (10) \end{aligned}$$

Из системы уравнений (8) и (10) видно, что условия системы будут удовлетворены при $x_c = L/2, y_c = B/2$.

Чтобы определить максимум или минимум функции $I = f(x_c, y_c)$ при значениях $x_c = L/2, y_c = B/2$, вычислены соответствующие вторые производные $f(x_c, y_c)$.

Дифференцируя уравнение (9) получено:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 I}{\partial x_c^2} &= \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}} + \frac{L - x_c}{\sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2}} + \\ &+ \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + (B - y_c)^2}} + \\ &+ \frac{L - x_c}{\sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2}} \Big|_{x_c = \frac{L}{2}, y_c = \frac{B}{2}} = \\ &= \frac{4L}{\sqrt{L^2 + B^2}} > 0; \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x_c \partial y_c} &= \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}} - \frac{y_c}{\sqrt{(L - x_c)^2 + y_c^2}} - \\ &- \frac{B - y_c}{\sqrt{x_c^2 + (B - y_c)^2}} + \\ &+ \frac{L - x_c}{\sqrt{(L - x_c)^2 + (B - y_c)^2}} \Big|_{x_c = \frac{L}{2}, y_c = \frac{B}{2}} = 0. \end{aligned}$$

После операции дифференцирования полученных уравнений по параметру y_c , получено:

$$\frac{\partial^2 I_1}{\partial y_c^2} = \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}};$$

$$\frac{\partial^2 I_2}{\partial y_c^2} = \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}};$$

$$\frac{\partial^2 I_3}{\partial y_c^2} = \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}};$$

$$\frac{\partial^2 I_4}{\partial y_c^2} = \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}}.$$

Значит

$$\frac{\partial^2 I_1}{\partial y_c^2} \Big|_{x_c = \frac{L}{2}, y_c = \frac{B}{2}} = 4 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{4L}{\sqrt{L^2 + B^2}}.$$

Составляя

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & B \\ B & C \end{vmatrix} = \left[f''_{xx} \cdot f''_{yy} - (f''_{xy})^2 \right] \Big|_{x_c = \frac{L}{2}, y_c = \frac{B}{2}},$$

можно получить:

$$\Delta = \frac{16}{\sqrt{L^2 + B^2}} \left[\ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}} \right].$$

Обозначив $\eta = B/L$, получено:

$$f(\eta) = \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + B^2}} =$$

$$= \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \eta^2}}{\eta} - \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}}.$$

Для современных гусеничных тракторов, значение η варьирует в пределах 0,55...0,97.

При $\eta = 0,5$: $f(\eta) = \ln 4,24 - 1/1,12 = 1,44 - 0,89 > 0$.

При $\eta = 0,7$: $f(\eta) = \ln 3,16 - 1/1,22 = 1,15 - 0,82 > 0$.

При $\eta = 1,0$: $f(\eta) = \ln 2,41 - 1/\sqrt{2} = 0,88 - 0,71 > 0$.

При $\eta = 1,2$: $f(\eta) = \ln 2,24 - 1/1,56 = 0,80 - 0,64 > 0$.

Таким образом для практически возможных значений изменения соотношения $\eta = B/L$, функция $f(\eta) > 0$ и $\Delta > 0$. Следовательно функция $I = f(x_c, y_c)$ при значениях $x_c = L/2$, $y_c = B/2$ приобретает минимальное значение.

Подставляя значения $x_c = L/2$, $y_c = B/2$ в уравнение (9), можно записать:

$$I = I_{\min} = \frac{1}{2} \left[L\sqrt{L^2 + B^2} + B^2 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} \right]. \quad (11)$$

Подставляя значение I в уравнение (4), получено выражение момента сопротивления вращению трактора в следующем виде:

$$M_c = \frac{\mu G}{4L} \left[L\sqrt{L^2 + B^2} + B^2 \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + B^2}}{B} \right] \quad (12)$$

или

$$M_c = \frac{\mu GL}{4} \left[\sqrt{1 + \eta^2} + \eta^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \eta^2}}{\eta} \right]. \quad (13)$$

При $\eta = 0$, т. е. $B = 0$, бывает случай одной гусеницы (так рассматривается поворот трактора в существующей литературе). Но как показывает уравнение (13), второй член в скобке при $\eta = 0$ дает неопределенность вида $0 \cdot \infty$. Раскрыв эту неопределенность, применяя правило Лопитала, можно записать:

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\eta^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \eta^2}}{\eta} \right] = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\ln \frac{1 + \sqrt{1 + \eta^2}}{\eta}}{\left(\frac{1}{\eta^2} \right)} =$$

$$= \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\eta^2}{2\sqrt{1 + \eta^2}} = \frac{0}{2} = 0.$$

Следовательно из уравнения (12), при $B = 0$, можно получить общеизвестную формулу:

$$M_c = \frac{\mu GL}{4}. \quad (14)$$

В формуле (14) не учтено влияние ширины колеи трактора на сопротивление поворота, что, конечно, влечет за собой большие неточности. Чтобы убедиться в этом, построим график функции

$$F(\eta) = \sqrt{1 + \eta^2} + \eta^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \eta^2}}{\eta}. \quad (15)$$

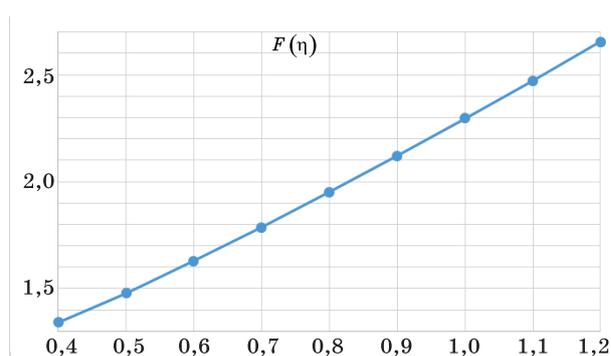


Рис. 2.

Заключение

Как видно из рисунка 2, с увеличением η функция $F(\eta)$ возрастает и для практических значений $\eta = 0,7...0,9$ изменяется от 1,78 до 2,12. Это означает, что, по сравнению с формулой (12), формула (14) дает ошибку в сторону уменьшения момента сопротивления от 180 до 210 %. Следовательно, для определения момента сил сопротивления повороту трактора нельзя ограничиться рассмотрением вращения отдельной гусеницы вокруг своего полюса, т. к. при такой расчетной схеме пренебрегается ширина колеи трактора, процесс поворота не соответствует действительности, что, как можно убедиться из приведенного выше анализа, ведет к очень грубым ошибкам.

С другой стороны, график функции

$F(\eta)$ показывает, что при данном значении базы L трактора, чем меньше отношение $\eta = B/L$, тем меньше момент сопротивления и трактор более поворотлив. Поэтому для улучшения маневренности трактора при данном L колею трактора B следует взять по возможности меньшим. Однако, для работы на склонах лучше иметь большее значение B , что, кроме лучшего перераспределения давлений по бортам трактора, будет противодействовать также его самопроизвольному повороту вниз по склону и улучшит устойчивость курса движения.

Материал поступил в редакцию 16.09.2015.

Сиреканян Самвел Рафикович, кандидат технических наук, доцент
E-mail: samsir1@rambler.ru

УДК 502/504:631.558.1

Н. А. МОЧУНОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕКАТЫВАНИЮ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

В статье представлены зависимости силы сопротивления перекатыванию колесного трактора от изменения частоты колебания нагрузки на крюке на разных поверхностях, полученные экспериментальным путем. Показано, что существенно изменяется величина деформации, оказывающая влияние на сопротивление почвы сжатию и сдвигу, при колебательном характере приложения усилий в месте контакта колеса с почвой. Отмечается, что колебательный характер изменения тяговых сопротивлений сельскохозяйственных машин и орудий вызывает колебания касательной силы тяги на ведущих колесах трактора. Установлено, что с ростом частоты и амплитуды колебаний тягового сопротивления пропорционально увеличивается частота и амплитуда колебаний касательной силы тяги. Отмечается, что повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов является важнейшей задачей в сельскохозяйственном производстве. Все виды сельскохозяйственных работ характеризуются неравномерной загрузкой трактора и возникновением больших нагрузок.

Трактор, частота и амплитуда колебаний, вибровязкость, давление воздуха в шинах.

In the article there are given dependences received experimentally of the resistance force to rolling of a wheel tractor on the change of load vibration frequency on a hook on different surfaces. It is shown that the deformation size changes significantly having an impact on the soil resistance to compression and displacement under the oscillating character of efforts application in the contact place of the wheel with soil. It is stated that the oscillating character of changes of traction resistances of agricultural machines and implements causes oscillations of the tangential force of traction on the leading wheels of the tractor. It is established that with the growth of the frequency and amplitude of oscillations of traction resistance the frequency and amplitude of oscillations of the tangential force of traction is proportionally increases. It is noted that the most important task in the agricultural production is raising the efficiency of using machinery-tractor aggregates. All kinds of agricultural works are characterized by an irregular charging of the tractor and occurrence of large loading.

Tractor, frequency and amplitude of oscillations, vibro-viscosity, air pressure in tires.