

УДК 629.114.2.001

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО КОЛЕСА ЗА СЧЕТ СМЯТИЯ ТОРФЯНОГО ГРУНТА ДВИЖИТЕЛЕМ И ОБРАЗОВАНИЯ КОЛЕИ

А.В. Гуськов, кандидат технических наук
Минский тракторный завод

Ключевые слова: торфяная почва, машины с колесным движителем, расчеты пневматического колеса

В настоящее время в торфяной промышленности находят применение комбинированные агрегаты для разработки торфяных месторождений, обладающие большим тяговым сопротивлением и требующие значительного отбора мощности для привода рабочих органов.

Как правило, эти машины агрегируются с колесными тракторами или имеют самостоятельный привод и оборудуются колесными движителями.

При движении эти агрегаты создают сопротивление движению за счет смятия грунта движителем и образования колеи.

Существующие методики [1] для определения этого сопротивления базируются на зависимости сопротивления грунтов сжатию, предложенной проф. В.В. Кацыгиным для минеральных грунтов:

$$\sigma = \sigma_0 \ln \frac{k}{\sigma_0} h, \quad (1)$$

где σ – напряжение сжатия, н/м²; σ_0 – предел несущей способности, н/м²; k – коэффициент объемного сжатия, н/м³; h – глубина погружения штампа, м.

Однако, по нашему мнению, эта зависимость не отражает процесс взаимодействия колеса с торфяно-болотным грунтом.

Для расчета сопротивлений, возникающих при смятии торфяно-болотного грунта колесным движителем, более подходит зависимость сопротивления сжатию от глубины погружения штампа, предложенная проф. С.С. Корчуновым [2]:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{h}{k}} \right), \quad (2)$$

где σ_0 – несущая способность торфяно-болотного грунта, н/м²; k – коэффициент деформации, м; h – глубина колеи, м.

Несущая способность почвы, по С.С. Корчунову, определяется следующей формулой:

$$\sigma_0 = A_0 + B_0 \frac{P}{S}, \quad (3)$$

где S – площадь штампа, m^2 ; P – периметр штампа, m ; A_0 и B_0 – константы деформируемости грунта.

Величины σ_0 и k являются физическими характеристиками торфяно-болотного грунта. Из анализа уравнения (2) вытекает, что константа k имеет линейную размерность и может быть определена как деформация залежи штампом при удельном давлении, составляющим $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$ от величины несущей способности, или приблизительно 0,63 ее.

Отношение периметра к площади, при соблюдении условия подобия геометрической формы штампа, изменяется обратно пропорционально линейным размерам штампа. Таким образом, для неосушенного торфяника, обладающего в значительной мере пластическими свойствами, и для штампов, соизмеримых с площадью опорной поверхности движителя гусеничного трактора (отношение P/S мало), можно считать, что $\sigma_0 \cong 1,5 \dots A_0$ [2].

По данным С.С. Корчунова, коэффициенты, характеризующие деформируемость и прочность различных торфяных залежей, приведены в таблице.

Коэффициенты, характеризующие деформируемость и прочность различных торфяных залежей

Вид торфа	Степень разложения, %	Влажность от-носительная, %	Коэффициенты			Скорость возрастания силы, кг/мин
			A_0	B_0	k	
Осоково-лесной	45-50	82-84,5	19,0	4,75	0,047	7
Гипново-топяной	25-30	85	37,6	9,42	0,062	7
Гипново-топяной	20	90	32,4	8,10	0,062	7
Осоково-топяной	30	82-84	46,4	6,62	0,048	200-500
Осоково-топяной	30	88	18,2	4,56	0,035	200-500
Гипново-топяной	25	90	35,8	8,95	0,069	500
Топяной	25-30	80-84	10,8	5,0	0,063	0

Используем приведенную зависимость для определения сопротивления движению пневматического колеса по торфяно-болотному грунту.

На рис. 1 приведена схема взаимодействия пневматического колеса с грунтом. Из рисунка видно, что опорная часть колеса, взаимодействующая с грунтом, представляет сложную поверхность, которая описывается системой дифференциальных уравнений.

В практических расчетах [3] ее обычно представляют в виде колеса большего диаметра, т.е. $D_{пр} > D_0$, где D_0 – номинальный диаметр колеса (рис. 2).

Как показали исследования В.В. Гуськова [1, 3] и других ученых, например, М.Г. Беккера [4], опорная поверхность эластичного колеса при качении его по грунту близка к цилиндрической. Следовательно, можно сделать вывод, что пневматическое колесо можно условно заменить жестким, имеющим увеличенный диаметр.

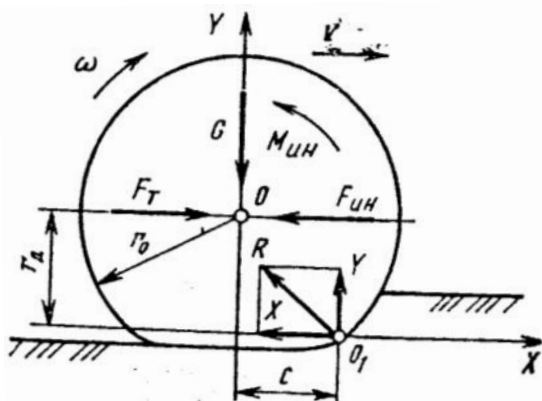


Рис. 1. Схема сил, действующих на ведомое колесо, оборудованное шиной

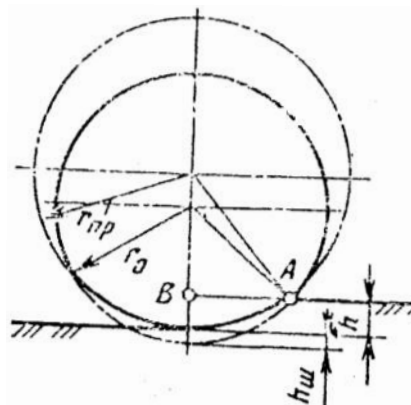


Рис. 2. Схема определения приведенного к жесткому колесу диаметра эластичного колеса

Замена диаметра эластичного колеса приведенным диаметром жесткого осуществляется в соответствии со схемой на рис. 2. Длина отрезка АВ для эластичного и эквивалентного ему жесткого колеса

$$AB = \sqrt{r_0^2 - r_0' - (r_0 - h - h_{ш})^2} = \sqrt{r_{пр}^2 - (r_{пр} - h)^2} \quad \text{или}$$

$$2r_0(h + h_{ш}) - (h + h_{ш})^2 = 2r_{пр}h.$$

Преобразовав выражение, получим

$$D_{пр} = \frac{D_0(h + h_{ш}) - h_{ш}(2h + h_{ш})}{h} = D_0 + \frac{h_{ш}}{h}(D_0 - 2h - h_{ш}). \quad (4)$$

Так как второй член правой части формулы (4) больше нуля и $D_0 > 2h + h_{ш}$, то $D_{пр}$ всегда больше D_0 . При $h_{ш} \rightarrow 0$ эластичное колесо приближается к жесткому. Такой случай имеет место при качении эластичного колеса с большим давлением воздуха в шине по переувлажненному грунту.

Здесь $D_{пр}$ – приведенный диаметр жесткого колеса, эквивалентного пневматическому; h – глубина колеи; $h_{ш}$ – прогиб шины.

Прогиб шины можно определить по зависимости, предложенной Хейдекелем [1]:

$$h_{ш} = \frac{G}{2\pi P_w \sqrt{r_0 r_c}},$$

где G – нормальная нагрузка, н; P_w – давление воздуха в шине, Па; r_0 – номинальный радиус колеса, м; r_c – радиус сечения шины, м. В приближении его можно

принять равным половине ширины b шины, т.е. $r_c = \frac{b}{2}$.

Схема взаимодействия жесткого колеса, эквивалентного эластичному, с торфяно-болотным грунтом приведена на рис. 3.

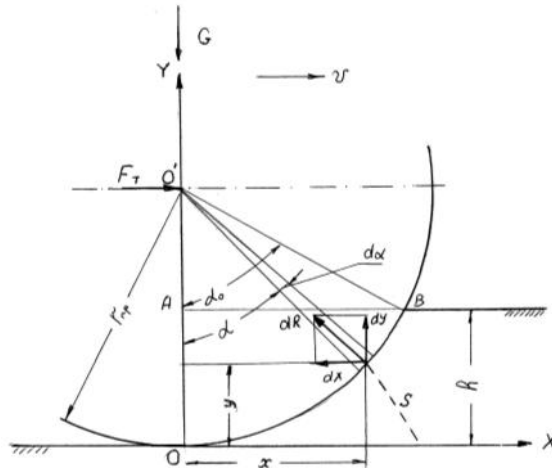


Рис. 3. Схема взаимодействия колеса с грунтом

В соответствии с приведенной схемой элементарные реакции грунта dR направлены перпендикулярно ободу колеса (рис. 3) и их траекторией является трактриса

$$S = r \ln \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0}.$$

В этом случае элементарная реакция почвы на участке обода площадью $A = br d\alpha$

$$dR = \sigma_0 br_{np} d\alpha,$$

где σ – нормальное напряжение, н/м²; b – ширина колеса, м; r_{np} – приведенный радиус, м; α – угол приложения элементарной реакции, °.

Разложим элементарную реакцию на горизонтальную dx и вертикальную dy составляющие. При этом $dy = dG$ и $dx = F_{спр}$, где G – нормальная нагрузка, н; $F_{спр}$ – сила сопротивления движению за счет смятия грунта движителем и образования колеи.

$$\text{Тогда } dF_{спр} = r_{np} \sigma \sin \alpha.$$

$$\text{Поскольку } \sigma = \sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{h}{k}} \right) \text{ и } h = s = r_{np} \ln \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0},$$

$$\text{то } dF_{спр} = br_{np} \sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{r_{np} \ln \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0}}{k}} \right) \cdot \sin \alpha d\alpha \text{ и}$$

$$dF_{спр} = br_{np} \sigma_0 \left(1 - \frac{\cos \alpha_0}{e^{\frac{r_{np}}{k} \ln \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0}}} \right) \sin \alpha d\alpha.$$

После решения этого уравнения, получим

$$F_{\text{спр}} = br_{\text{np}} \sigma_0 \left(1 - \cos \alpha_0 + \frac{\cos \alpha_0 \ln \cos \alpha_0}{e^{\frac{r_{\text{np}}}{k}}} \right). \quad (5)$$

Из треугольника O'BA следует, что

$$\cos \alpha_0 = \frac{r_{\text{np}} - h}{r_{\text{np}}}, \sin \alpha_0 = \frac{1}{r_{\text{np}}} \sqrt{2rh - h^2} \text{ и } \alpha = \arccos \frac{r_{\text{np}} - h}{r_{\text{np}}}.$$

Тогда

$$F_{\text{спр}} = br_{\text{np}} \sigma_0 \left[\frac{h}{r_{\text{np}}} + \frac{\left(\frac{r_{\text{np}} - h}{r_{\text{np}}} \right) \ln \left(\frac{r_{\text{np}} - 1}{r_{\text{np}}} \right)}{e^{\frac{r_{\text{np}}}{k}}} \right]. \quad (6)$$

В уравнении (6) неизвестной величиной является глубина колеи h. Найдем ее значение из уравнения

$$\sum Y = R \cos \alpha - G = 0 \text{ и } G = R \cos \alpha.$$

При этом

$$dG = br_{\text{np}} \delta_0 \int_0^{\alpha_0} \left(1 - e^{-\frac{h}{k}} \right) \cos \alpha d\alpha$$

или

$$G = br_{\text{np}} \sigma_0 \int_0^{\alpha} \left(1 - \frac{\cos \alpha_0}{e^{\frac{r_{\text{np}}}{k} \cos \alpha}} \right) \cos \alpha d\alpha.$$

После решения этого интеграла получим

$$G = br_{\text{np}} \delta_0 \left(\sin \alpha_0 - \frac{\alpha_0 \cos \alpha_0}{e^{\frac{r_{\text{np}}}{k}}} \right).$$

После подстановки вместо $\sin \alpha_0$, $\cos \alpha_0$ и α_0 и их значений, получим

$$G = br_{\text{np}} \delta_0 \left[\frac{\sqrt{2 - r_{\text{np}} h - h^2}}{r_{\text{np}}} - \frac{r_{\text{np}} - h \arccos \frac{r_{\text{np}} - h}{r_{\text{np}}}}{r_{\text{np}} e^{\frac{h}{k}}} \right]. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6) и (7) дает возможность определить величины $F_{\text{спр}}$ и h и их зависимость от параметров колеса (b, D, P_w) приходящейся на него нагрузки G и физико-механических свойств торфяно-болотного грунта (σ_0 , A₀, П, S и K).

Уравнения (6) и (7) можно значительно упростить, если пренебречь членами, содержащими в знаменателе $e^{\frac{r_{np}}{k}}$ (величины $r_{np} = 0,7 \dots 2,0$ и $k = 0,035 \dots 0,69$).

$$F_{спр} = b \sigma_0 h; \quad (8)$$

$$h^2 - 2rh + \left(\frac{G}{\sigma_0} \right)^2 = 0. \quad (9)$$

Тогда
$$h = r_{np} \pm \sqrt{r_{np}^2 - \left(\frac{G}{b \sigma_0} \right)^2}.$$

Значение корня в уравнении (9) следует брать с отрицательным знаком, в противном случае глубина колеи может превышать значение приведенного радиуса, что противоречит действительности.

И в окончательном виде:

$$F_{спр} = b \sigma_0 h \left[r_{np} - \sqrt{r_{np}^2 - \left(\frac{G}{b \sigma_0} \right)^2} \right] \quad (10)$$

и

$$h = r_{np} - \sqrt{r_{np}^2 - \left(\frac{G}{b \sigma_0} \right)^2}. \quad (11)$$

Проведенные по указанным уравнениям расчеты (рис. 4) процесса взаимодействия пневматического колеса (шина 580/70R 42, $b = 058$, $D_0 = 1,9$ м, $P_w = 14$ кПа) при его качении по горизонтальной поверхности двух фонов торфяно-болотного грунта (осоково-

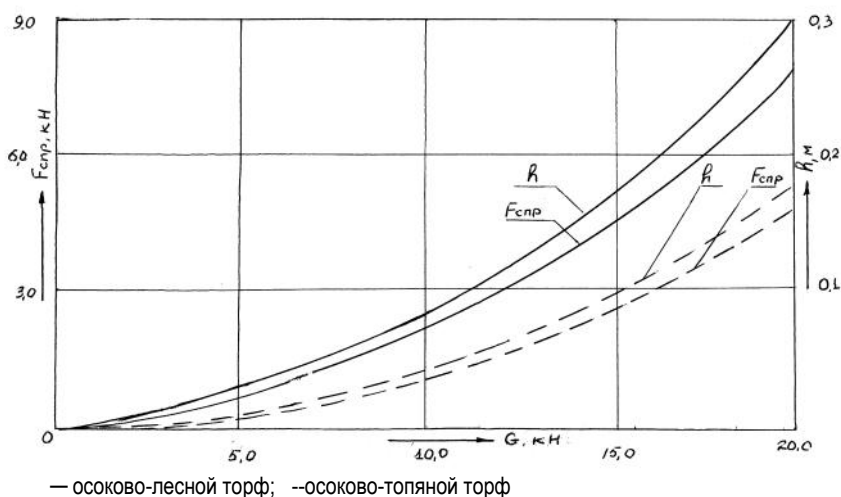


Рис. 4. Зависимость $F_{спр}$ и R от вертикальной нагрузки

лесной и осоково-топяной торф), характеристики которых приведены в таблице, показали, что в зависимости от нормальной нагрузки G градиенты сопротивления движения и глубины колеи возрастают.

При проведении расчетов зависимость $D_{пр} = f(D_0, h \text{ и } h_{ш})$ формулы (4) была заменена эмпирической зависимостью [1]

$$D_{пр} = D_0 \left(1 + \frac{0,1G}{\sigma_0 D_0} \right).$$

Выводы

1. Величины сил сопротивления движению и глубины колеи при движении мобильной машины по торфяно-болотному грунту значительно отличаются от величин сил сопротивления при движении по минеральному грунту.

2. Для расчета процесса взаимодействия колесного движителя мобильной машины с торфяно-болотным грунтом следует использовать уравнения С.С. Корчунова, наиболее адекватно отражающие упомянутый процесс.

3. На сопротивление движению мобильной машины в значительной степени влияет состав торфяно-болотного грунта: чем больше его несущая способность, тем меньше глубина колеи и сила сопротивления движению.

Литература

1. Тракторы: теория. / В.В. Гуськов, И.П. Ксеневич, Ю.Е. Атаманов и др. Под общ. ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
2. Корчунов, С.С. Деформация торфяной залежи / С. С. Корчунов // Торфяная промышленность. – 1946. – № 10.
3. Гуськов, В.В. О сопротивлении движению гусеничной машины на торфяниках./ В. В. Гуськов // Торфяная промышленность. – 1959. – № 8.
4. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем жесткость – машина / М. Г. Беккер. Пер. с англ. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 519 с.

Summary

Guskov A. Resistance to the movement of pneumatic wheel due to contortion of peat soil with mover and formation of track

Carried out: investigation of the process of interaction of mobile machine wheeled mover with peat soil.
Assigned: dependencies enabling to define thereat the resistance to movement and the depth of track

Поступила 23 мая 2007 г.