

7. САРС органично дополняет многочисленные, теперь уже существующие системы автоматического регулирования, примененные на автомобиле (АБС, ПБС, электронная система стабилизации). С некоторыми из них работа системы управления схождение может быть связана алгоритмически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рязанцев В. И. Автоматическое регулирование угла схождения колес при движении автомобиля. Автомобильная промышленность, 2003. — №10. — С. 38—40.
2. Рязанцев В. И. Повышение активной безопасности автомобиля введением автоматически управляемого схождения. «Мехатроника, автоматизация, управление». — Новые технологии, 2004. — № 9. — С. 40—47.

629 113

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИН ПО СНЕГУ

Канд. техн. наук, доц. А.А. АНИКИН, д-р техн. наук, проф Л.В. БАРАХТАНОВ,
канд. техн. наук И.О. ДОНАТО

Рассмотрены известные зависимости для расчета силы сопротивления качению колеса в зависимости от смятия грунта. Показано, что при движении по реально залегающим снегам использование их в чистом виде приводит к большим погрешностям. Получены выражения для определения сопротивления качению по снегу жесткого колеса и пневматической шины.

The known dependencies are considered for calculation of power of the resistance to swing travel about from compressions soil. It is shown that when moving on real lying snow use them in clean type brings about big inaccuracy. Expressions are received for determination of the resistance to swing on snow hard travel about with pneumatic tire.

Одной из первых зависимостей для расчета силы сопротивления качению колеса от смятия грунта является формула, предложенная Вюстом [1],

$$P = K\sqrt{DB}, \quad (1)$$

где D — диаметр колеса; B — ширина обода; K — постоянный коэффициент, $K = 2/3k\sqrt{H^3}$, k — сопротивление грунта взаимодействию; H — глубина колеи, которая определялась из формулы Берстнера [1]

$$H = \sqrt[3]{\frac{9Q^2}{4B^2D^2k^2}}; \quad (2)$$

здесь Q — нагрузка на колеса.

На основе широких экспериментальных работ М.Н. Летошневым получена зависимость для определения силы сопротивления качению от деформации грунта [2]

$$F = 0,958G_k^{3/2} / [C_n(1+0,27B)]^{1/2} (2R_{k0})^{3/4}, \quad (3)$$

где C_n — коэффициент удельного сопротивления смятию грунта; G_k — нагрузка на колесо; R_{k0} — свободный радиус колеса; B — ширина шины.

Используя степенную зависимость между давлением и глубиной вдавливания колеса в грунт и полагая, что контакт пневматического колеса с грунтом происходит по цилиндрической поверхности, вид и кривизна которой зависят от механических свойств колеса и грунта, В.Ф. Бабковым, А.К. Бируля и В.М. Сиденко предложена зависимость для определения коэффициента сопротивления движению [1]

$$f = \frac{(1+\mu_2)C_1h_1^{\mu_1+1} - (1+\mu_1)C_2h_2^{\mu_2+1}}{\sqrt{D_0} [C_1h_1^{\mu_1}(1-\mu_1/3)\sqrt{h_1+u_m} + C_2h_2^{\mu_2}(1-\mu_2/3)\sqrt{h_2+u_m}] (1+\mu_1)(1+\mu_2)}, \quad (4)$$

где h_1 — деформация грунта в зоне загрузки шины; h_2 — обратная часть деформации; C_1 , μ_1 , C_2 , μ_2 — коэффициенты осадки и показатели степени в зоне загрузки и разгрузки шины; D_0 — свободный диаметр колеса; u_m — максимальная деформация шины.

В результате исследования колесных движителей строительных и дорожных машин Н.А. Ульяновым предложена весьма простая зависимость для определения силы сопротивления движению от смятия грунта, учитывающая в явном виде давление воздуха P_w , размеры колеса R_{k0} , нагрузку G_k и модуль деформации грунта E [3]:

$$\Phi_{\text{ГП}} = 1,8P_w / 2R_{k0} [G_k^3 / E^3]^{1/2}. \quad (5)$$

Я.С. Агейкин [4] так же, как при определении глубины колеи h , предлагает рассчитывать сопротивление качению для двух типов грунта: для безблизлежащего слоя грунта

$$P_{\text{ГП}} = 2Eq_{s0}b_{\text{усл}} \left(\frac{h}{2e} - \frac{\pi q_{s0}b_{\text{усл}}}{4E^2} \ln \frac{2Eh + \pi q_{s0}b_{\text{усл}}}{\pi q_{s0}b_{\text{усл}}} \right) \quad (6)$$

и с близлежащим твердым слоем

$$P_{\text{ГП}} = \frac{\pi q_{s0}b_{\text{усл}}^2 \cos \beta}{2E + \pi q_{s0}b_{\text{усл}}} \left[H_r \ln \frac{H_r}{H_r - h} - \frac{\pi q_{s0}b_{\text{усл}}}{2E} \ln \frac{2Eh + \pi q_{s0}b_{\text{усл}}}{\pi q_{s0}b_{\text{усл}}} \right], \quad (7)$$

где $b_{\text{усл}}$ — условная ширина протектора; q_{s0} — несущая способность грунта; E — модуль деформации грунта; β — угол приложения нагрузки; h — глубина колеи; H_r — высота грунта.

Предложенные выше зависимости использовались, в основном, для определения качения колеса по грунту. Использование их для снежного полотна пути весьма проблематично. Так, в зависимостях (1)—(3) и (5)—(7) в качестве параметра, характеризующего физико-механические свойства грунта, используется коэффициент удельного сопротивления грунта смятию или модуль деформации грунта. Вместе с тем известно [5], что их значения в зависимости от плотности снега отличаются на пять порядков. Формальное применение зависимости (4) для снега также не дает удовлетворительных результатов. Так, при движении по реально залегающим снегам ($\mu_1, \mu_2 > 1$) коэффициент сопротивления качению f принимает значения, противоречащие экспериментальным данным.

М. Беккером [6] предложена зависимость для определения сопротивления движению жесткого колеса за счет уплотнения грунта

$$R_c = b \int_0^{z_0} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z^n dz = b \left(\frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right) \left[\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right], \quad (8)$$

где z_0 — максимальное погружение колеса; b — ширина колеса; k_c, k_φ — модули сцепления и трения; n — экспонента деформации.

Осадка z_0 определялась из уровня равновесия колеса

$$W = b \int_0^{z_0} p dx = -b \int_0^{z_0} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z^n dx. \quad (9)$$

Исходя из геометрических соображений (9) было преобразовано к виду

$$W = b \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D}}{z \sqrt{z_0 - z}} dz. \quad (10)$$

Далее была проведена замена переменных $(z_0 - z) = t^2$. Учитывая только первые два члена $(z_0^n - n z_0^{n-1} + \dots)$, получим

$$W = \frac{b(k_c/b + k_\varphi) \sqrt{z_0 D}}{3} z_0^n (3 - n), \quad (11)$$

откуда

$$z_0 = \left[\frac{3W}{b(3-n)(k_c/b + k_\varphi) \sqrt{D}} \right]^{2/(2n+1)}. \quad (12)$$

Теперь, подставляя (12) в (8), окончательно получим выражение для расчета сопротивления уплотнению

$$R_c = \frac{1}{(3-n)^{(2n+2)(2n+1)} (n+1) b^{1/(2n+1)} (k_c/b + k_\varphi)^{1/(2n+1)}} \times \left[\frac{3W}{\sqrt{D}} \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}}. \quad (13)$$

Формулу (11) нельзя применять для расчета сопротивления уплотнению снежного полотна пути, как это пытались делать некоторые исследователи, так как при $n > 1,5$, выражение (13) дает большую ошибку, а при $n \rightarrow 3$ сопротивление уплотнению $R_c \rightarrow 8$.

Изложенный выше способ определения уплотнения грунта был применен Дж. Вонгом для расчета сопротивления движению пневматической шины. Используя методический подход М.Беккера, было получено выражение для определения вертикальной нагрузки W_{cu} , приходящейся на участок загрузки шины [7],

$$W_{cu} = -b \int_0^{z_0} P dx = -b \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D} dz}{\sqrt{z_0 + \delta_t - z}}, \quad (14)$$

где b — длина контакта; δ_t — прогиб шины. Проведя замену переменных $z_0 + \delta_t - z = t^2$; $dz = -2t dt$, получим

$$W_{cu} = b \left(\frac{k_c}{l_t} + k_\varphi \right) \sqrt{D} \int_{\sqrt{\delta_t}}^{\sqrt{z_0 + \delta_t}} (z_0 - t^2)^n dt;$$

$$W_{cu} = \frac{b(k_c/l_t + k_\phi \sqrt{D} (z_0 + \delta_t)^{n-1} (\sqrt{(z_0 + \delta_t)} - \sqrt{\delta_t}))}{3} \times \\ \times [z_0(3-n) + \delta_t(3-2n) - n\sqrt{\delta_t(z_0 + \delta_t)}]. \quad (15)$$

Применение формулы (15) для снега также недопустимо: при $n > 1,5$ выражение (14) дает весьма большую ошибку, а при $n > 2,15$ приводит к парадоксальным результатам: вертикальная нагрузка, а следовательно, и сопротивление движению принимают отрицательные значения.

Упрощенную модель М. Беккера можно применять для приближенной оценки сопротивления движению за счет уплотнения снега, если воспользоваться подходом, применяемым Баракхановым Л.В. при определении силы сопротивления движению машины, обусловленной вертикальной деформацией снежного покрова гусеницами. Интеграл в (9)

$$\int_0^{z_0} \frac{z^n}{\sqrt{z_0 - z}} dz; \quad (16)$$

заменой переменной $z/z_0 = t$ может быть приведен к виду

$$\sqrt{z_0} z_0^n \int_0^{z_1/z_0} t^n (1-t)^{1/2} dt = \sqrt{z_0} z_0^n B_{z_1/z_0}(n+1, 1/2). \quad (17)$$

С учетом (16)—(17) значение вертикальной нагрузки на колеса определим так

$$W = b/2 \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z_0^n \sqrt{z_0 D} [2B(n+1, 1/2) - B_{z_1/z_0}(n+1, 1/2) - B_{z_2/z_0}(n+1, 1/2)], \quad (18)$$

где $B(n+1, 1/2)$ — полная бета-функция; $B_{z_1/z_0}(n+1, 1/2)$ — неполная бета-функция; z_0, z_1 — расстояния от поверхности грунта до уровня недеформируемой поверхности снега перед колесом и за колесом соответственно.

Теперь, подставляя в (8) z_0 из (17), получим выражение для определения сопротивления уплотнению (смятию) грунта (снега) в случае качения жесткого колеса

$$R = \frac{1}{\left[b(k_c/b + k_\phi) \right]^{1+2n} \left[2B(n+1, 1/2) - B_{z_1/z_0}(n+1, 1/2) - B_{z_2/z_0}(n+1, 1/2) \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}}} \times \\ \times \left(\frac{2W}{\sqrt{D}} \right)^{\frac{2n+2}{2n+1}}. \quad (19)$$

Формулы (18) и (19) являются более общими, чем зависимости (10) и (13). Из них, в частности, получится вариант, рассмотренный М. Беккером ($z_1 = 0, z_2 = z_0$),

$$W = 1/2b \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{z_0 D} B(n+1, 1/2)$$

$$R = \frac{1}{[b(k_c/b + k_\phi)]^{1+2n} [2B(n+1)]^{\frac{2n+2}{2n+1}}} \left(\frac{2W}{\sqrt{D}} \right)^{\frac{2n+2}{2n+1}}.$$

и

Аналогичным образом можно преобразовать зависимость для расчета сопротивления движению пневматической шины, предложенной Дж. Вонгом (15).

$$\text{Проведем замену переменной } \frac{z}{z_0 + \delta_t} = t; \quad dz = (z_0 + \delta_t) dt.$$

Интеграл в выражении (14) приводится к виду

$$\int_0^{\frac{z}{z_0 + \delta_t}} \frac{(z_0 + \delta_t)^n t (z_0 + \delta_t)}{\sqrt{(z_0 + \delta_t)(1-t)}} dt = (z_0 + \delta_t)^{n+1/2} \int_0^{\frac{z}{z_0 + \delta_t}} t^n (1-t)^{-1/2} dt = \\ = (z_0 + \delta_t)^{n+1} B_{z/z_0}(n+1, 1/2).$$

$$\text{Тогда } W_{cu} = b\sqrt{D} \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) (z_0 + \delta)^{n+1} B_{z/z_0}(n+1, 1/2). \quad (20)$$

Оценка полученных зависимостей показывает, что они справедливы для любых n , не приводят к большим погрешностям и парадоксальным результатам при $n > 1,5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В. Ф., Бируля А. К., Сиденко В. М. Проходимость колесных машин по грунту. — М.: Автотрансиздат, 1959. — 189 с.
2. Летошнев М. Н. Взаимодействие конной повозки и дороги. — М.: Транспечать НКПС, 1929. — 206 с.
3. Ульянов Н. А. Колесные движители строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1982. — 279 с.
4. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. — М.: Машиностроение, 1981. — 230 с.
5. Снег: Пер. с англ. / Под ред. В.М. Катлякова. — Л.: Гидрометеониздат, 1986. — 751 с.
6. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местность-машина: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Гуськова. — М.: Машиностроение, 1973. — 520 с.
7. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. — М.: Машиностроение, 1982. — 284 с.