

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ОПОРНОГО ОСНОВАНИЯ НА КУРСОВОЕ ДВИЖЕНИЕ НАКЛОННО РАСПОЛОЖЕННОГО КОЛЕСА

В ряде случаев колеса транспортных средств расположены под углом к поверхности опорного основания: при установке с развалом; у крутосклонных тракторов; на повороте у одноколейных транспортных средств. Вследствие качения элементов пятна контакта колеса с различными радиусами имеет место его увод в сторону наклона [1]. Однако какое влияние на увод колеса оказывает изменения характера деформации грунта, выражающееся в смещении поперечного расположения точек контакта, которые принадлежат одной продольной плоскости (например, I-II, проходящей через центр давления, рис. 1), не исследовано.

В процессе деформирования грунта катящимся колесом, нагруженным только вертикальной силой  $G_k$ , и не имеющего голономных связей с остоном транспортного средства, т. е. подчиненного только неголономным связям со стороны опорного основания, упомянутые точки контакта стремятся совершать перемещения по вертикали. Поэтому каждая, вновь вступающая во взаимодействие с грунтом точка  $a$  протектора шины стремится расположиться относительно точек, вступивших во взаимодействие с грунтом ранее, на некото-

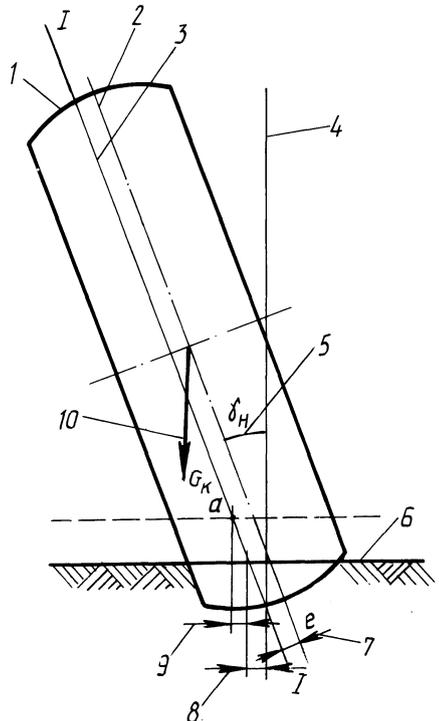


Рис. 1. Схема поперечного смещения точек контакта наклонного колеса по глубине колеи:

1 – колесо; 2 – продольная плоскость симметрии колеса; 3 – продольная плоскость, проходящая через центр давления колеса на опорное основание; 4 – вертикальная плоскость; 5 – угол отклонения колеса от вертикального положения; 6 – деформируемое опорное основание; 7 – смещение центра давления в поперечной плоскости колеса; 8 – поперечное смещение точек контакта; 9 – смещение вновь вступающих в контакт точек протектора; 10 – нагружающая колесо сила

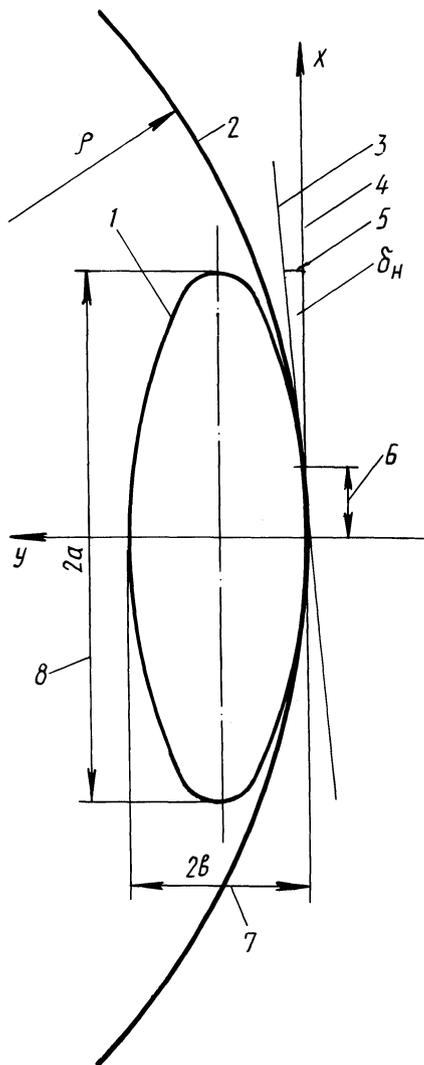


Рис. 2. Схема к определению отклонения вектора скорости наклонного колеса:

1 – проектирование продольной плоскости колеса, проходящей через центр давления, на поверхность опорного основания; 2 – траектория качения колеса, подчиненного только неголономным связям; 3 – траектория качения колеса, подчиненного неголономным и голономным связям; 4 – заданное направление движения; 5 – угол отклонения вектора скорости колеса; 6 – продольное смещение центра давления; 7, 8 – малая и большая оси эллипса

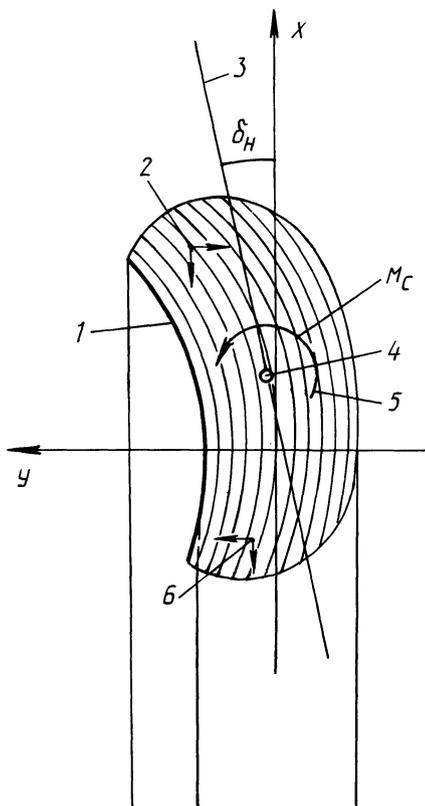


Рис. 3. Схема направлений перемещений взаимодействующих точек шины и опорного основания в пятне контакта наклонно катящегося колеса:

1 – пятно контакта; 2 – направления перемещений точек контакта в зоне, расположенной перед центром давления; 3 – направление вектора скорости колеса; 4 – центр давления; 5 – момент сил сцепления, стремящийся вызвать поворот колеса; 6 – направления перемещений точек контакта в зоне, расположенной за центром давления

ром удалении в сторону наклона колеса. В результате этого колесо стремится совершать движение по криволинейной траектории с постоянным радиусом кривизны  $\rho$  для данных угла наклона и глубины колеи (рис. 2). Это было подтверждено экспериментально на модели. Скорость качения такого колеса направлена по касательной к упомянутой траектории в точке, совпадающей с центром его давления. В случае подчинения колеса голономным связям, налагаемым остовом и рулевым механизмом, такое направление будет иметь, очевидно, его траектория. Угол, который она составит с плоскостью вращения колеса, равен арктангенсу углового коэффициента касательной к криволинейной траектории, которую имело бы колесо, будучи подчиненным только неголономным связям. При этом момент, развиваемый силами сцепления в пятне контакта и стремящийся вызвать поворот колеса по криволинейной траектории, уравновесится реакциями остова или деталей рулевого механизма. Точки контакта, принадлежащие шине, получат перемещение не только в продольной вертикальной плоскости, но и в поперечной в направлении, противоположном действию упомянутого момента. В зоне пятна контакта, расположенной перед центром давления, поперечная составляющая их перемещения направлена в сторону, противоположную направлению наклона колеса, а в зоне, расположенной за центром давления, совпадает с направлением наклона (рис. 3).

Предварительно определим угол  $\delta_n$  отклонения вектора скорости от плоскости вращения жесткого наклонно расположенного колеса. Очевидно (см. рис. 2), что вблизи центра давления траектория подчиненного только неголономным связям колеса практически совпадает с эллипсом, полученным в результате проектирования продольного, проходящего через упомянутый центр, сечения колеса на поверхность опорного основания. Следовательно, угол отклонения вектора скорости колеса, подчиненного одновременно голономным и неголономным связям, может быть получен как арктангенс углового коэффициента касательной к этому эллипсу.

Уравнение эллипса в канонической форме:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1. \quad (1)$$

Большая ось эллипса  $2a$  равна диаметру колеса. Малая же ось

$$2b = 2ak = 2r_0 k, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент сжатия эллипса, равный в данном случае  $\sin \gamma_n$ ;  $r_0$  – радиус колеса;  $\gamma_n$  – угол его наклона.

Преобразовав уравнение (1) к виду

$$y = \sqrt{b^2 - b^2/a^2 x^2}$$

и продифференцировав его по  $x$ , получим искомый угловой коэффициент:

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{bx}{a^2 \sqrt{1 - x^2/a^2}},$$

откуда

$$\delta_{\text{н}} = \text{arctg} \frac{bx}{a^2 \sqrt{1 - x^2/a^2}}, \quad (3)$$

где  $x$  — смещение центра давления в продольной плоскости, равное коэффициенту трения качения.

Известно, что

$$x = f_c r_0, \quad (4)$$

где  $f_c$  — коэффициент сопротивления качению колеса.

Для реальных значений  $f_c$  радикал  $\sqrt{1 - x^2/a^2}$  практически равен единице, что позволяет упростить выражение (3):

$$\delta_{\text{н}} = \text{arctg}(bx/a^2). \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (4) оно имеет вид

$$\delta_{\text{н}} = \text{arctg}(f_c \sin \gamma_{\text{н}}).$$

По предварительным вычислениям  $\delta_{\text{н}}$  не превышает 0,08 рад, что дает основание принять с достаточной для практических расчетов точностью

$$\delta_{\text{н}} = f_c \sin \gamma_{\text{н}}. \quad (6)$$

Эластичное колесо образует на деформируемой поверхности колею меньшей, чем жесткое, глубины. Замечено также, что профиль продольного сечения шины в зоне пятна контакта близок к окружности. Это дает основание заменять при математическом описании профиля шины эластичное колесо жестким, увеличенного диаметра [2]:

$$D_{\text{п}} = 2r_{\text{п}} = 2r_0 (1 + h_{\text{ш}}/h_{\text{г}}), \quad (7)$$

где  $D_{\text{п}}$ ,  $r_{\text{п}}$  — приведенные к эластичному диаметр и радиус жесткого колеса;  $h_{\text{ш}}$  и  $h_{\text{г}}$  — деформация шины и грунта.

Отклонение вектора скорости наклонно расположенного эластичного колеса, исходя из выражений (2), (4) и (5),

$$\delta_{\text{н}} = f_c r_0 \sin \gamma_{\text{н}} / r_{\text{п}},$$

а из выражения (7) для приведенного радиуса

$$\delta_{\text{н}} = f_c h_{\text{г}} \sin \gamma_{\text{н}} / h_{\text{с}}, \quad (8)$$

где  $h_{\text{с}}$  — суммарная деформация шины и грунта в продольной плоскости:  $h_{\text{с}} = h_{\text{г}} + h_{\text{ш}}$ .

Это выражение позволяет уточнить формулу для определения отклонения вектора скорости произвольно расположенного колеса при качении по деформируемому основанию, предложенную в работе [3]:

$$\delta' = \frac{1}{k_y} \left\{ \frac{G_k [e \cos \gamma_H + (r - d'/2) \sin \gamma_H]}{r - d'/2} + F''_6 \right\} + \frac{\delta F_6}{(1 - \delta) F_k} + \frac{f_c h_r \sin \gamma_H}{h_c}, \quad (9)$$

где  $\delta'$  — отклонение вектора скорости колеса от плоскости вращения;  $k_y$  — коэффициент сопротивления шины боковому уводу;  $G_k$  — вертикальная нагрузка на колесо;  $e$  — смещение центра давления;  $r, d'$  — статический радиус и посадочный диаметр шины;  $F''_6, F_6$  — боковая сила со стороны остова и результирующая этой силы и боковой составляющей вертикальной нагрузки  $G_k$  на колесо [4];  $\delta$  — буксование;  $F_k$  — касательная сила тяги.

Согласно полученному выражению (8), влияние деформируемости опорного основания на отклонение вектора скорости наклонно катящегося колеса тем значительнее, чем меньше деформация шины, т. е. когда  $h_c$  стремится к  $h_r$ , а отношение  $h_r/h_c$  — к единице, достигая своего максимума у абсолютно жесткого колеса (см. выражение (6)). В типичных полевых условиях эксплуатации тракторов применение пневматических шин способствует снижению отклонения вектора скорости наклонного колеса, обусловленное деформируемостью опорного основания, приблизительно вдвое. Этот эффект, важный для установленных с развалом передних направляющих колес пропашных тракторов и для колес всей ходовой системы в случае работы трактора на склоне, усиливается со снижением внутришинного давления воздуха и благодаря другим мероприятиям, направленным на уменьшение сопротивления качению колес и деформации почвы, увеличение доли  $h_{ш}$  в  $h_c$ .

Таким образом, уточненное выражение (9) позволяет учитывать влияние на отклонение вектора скорости произвольно расположенного колеса не только увода шины в результате ее боковой деформации на склоне (составляющая в фигурных скобках) и бокового скольжения из-за качения колеса с буксованием (вторая составляющая), но и поперечной деформации грунта, обусловленной наклонным расположением колеса (третья составляющая).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ч у д а к о в Е.А. О качении автомобильного колеса при наклонном расположении его средней плоскости // Докл. АН СССР. — 1953. — Т. 92. — № 1. — С. 13–15.
2. Г у с ь - к о в В.В. Тракторы. — Ч. II: Теория. — Минск: Выш. шк., 1977. — 384 с.
3. З е л е н ы й П.В. Изыскание и исследование средств повышения устойчивости курсового движения колесного машинно-тракторного агрегата на склоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1982. — 22 с.
4. З е л е н ы й П.В. К определению силовых параметров взаимодействия эластичного колеса со сминаемым наклонным основанием // Автотракторостроение. — Минск, 1984. — Вып. 19. — С. 81–85.