

УДК 629.012.3
DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-34-44

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВОБОДНОГО И ВЕДУЩЕГО РЕЖИМОВ КАЧЕНИЯ КОЛЕСА С УЧЕТОМ НЕСИММЕТРИЧНОСТИ ЭПЮРЫ НОРМАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ

MODELING THE PARAMETERS OF FREE AND DRIVING WHEEL ROLLING MODES TAKING INTO ACCOUNT THE ASYMMETRY OF THE NORMAL REACTION DIAGRAM

М.И. РОМАНЧЕНКО, к.т.н.
ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, Белгород, Россия,
romanchenko_mi@bsaa.edu.ru

M.I. ROMANCHENKO, PhD in Engineering
Belgorod State Agricultural University, Belgorod, Russia,
romanchenko_mi@bsaa.edu.ru

Приведена методика определения силовых и кинематических параметров шины и колеса для свободного и ведущего режимов качения с учетом смещения центра нормальных реакций дорожной опорной поверхности. Величина смещения представлена в виде функции линейной зависимости от коэффициента продольной силы. Аналитическое описание зависимости отражает взаимосвязь коэффициента продольной силы и коэффициента несимметричности эпюры нормальных реакций опорной поверхности и определяет смещение центра нормальных реакций в направлении к переднему краю контактной площадки шины. Расчетная несимметричность эпюры относительных нормальных реакций может быть получена выбором соответствующего значения коэффициента несимметричности в интервале от 1 до 0.

На численном примере представлено графоаналитическое отображение силовых и кинематических параметров качения колеса с тракторной шиной 15,5-R38 модели Ф-2А при использовании эпюры относительных нормальных реакций, описываемой параболической зависимостью четвертой степени. Коэффициент продольной силы определяется с учетом образования результирующей продольной реакции двумя составляющими: на участке буксования и на участке покоя элементов контактной площадки шины. Установлено, что максимальное значение коэффициента продольной силы для несимметричной эпюры относительных нормальных реакций наблюдается при большем значении коэффициента буксования колеса по сравнению с симметричной эпюрой, однако остается практически неизменным для обеих сравниваемых эпюр относительных нормальных реакций. Приведенная методика определения силовых и кинематических параметров с учетом несимметричности эпюры нормальных реакций опорной поверхности может найти практическое применение при выборе и обосновании рациональных режимов работы колесных движителей тракторных транспортно-технологических агрегатов в различных дорожных условиях.

Ключевые слова: колесо, шина, качение, сила, режим, коэффициент, буксование, трение, сцепление, эпюра.

Для цитирования: Романченко М.И. Моделирование параметров свободного и ведущего режимов качения колеса с учетом несимметричности эпюры нормальных реакций // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 2. С. 34–44. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-34-44.

A method for determining the power and kinematic parameters of a tire and a wheel for free and driving modes of rolling is given. The displacement of the center of normal reactions of the road support surface was taken into account. The amount of displacement is presented as a linear function of the longitudinal force coefficient. The analytical description of the dependence reflects the relationship between the longitudinal force coefficient and the asymmetry coefficient of the diagram of normal reactions of the bearing surface and determines the displacement of the center of normal reactions towards the front edge of the contact area of the tire. The calculated asymmetry of the epure of relative normal reactions can be obtained by choosing the appropriate value of the asymmetry coefficient in the range from 1 to 0.

Based on a numerical example, a graphical-analytical display of the force and kinematic parameters of rolling of a wheel with a 15,5-R38 model F-2A tractor tire is presented when using the epure of relative normal reactions described by a parabolic dependence of the fourth degree. The longitudinal force coefficient is determined taking into account the formation of the resulting longitudinal reaction by two components – in the slip section and in the rest section of the tire contact pad elements. It was found that the maximum value of the longitudinal force coefficient for an asymmetric epure of relative normal reactions is observed with a larger value of the wheel slip coefficient compared to a symmetric epure, but remains practically unchanged for both compared diagrams of relative normal reactions.

The presented method for determining the power and kinematic parameters, taking into account the asymmetry of the epure of normal reactions of the supporting surface, can find practical application in the selection and substantiation of rational modes of operation of wheel propellers of tractor transport and technological units in various road conditions.

Keywords: wheel, tire, rolling, force, mode, coefficient, slipping, friction, adhesion, epure.

Cite as: Romanchenko M.I. Modeling the parameters of free and driving wheel rolling modes tak-ing into account the asymmetry of the normal reaction diagram. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 2, pp. 34–44 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-2-34-44.

Введение

При обосновании методов определения силовых и кинематических параметров свободного и ведущего режимов качения колеса необходимо учитывать смещение нормальной реакции дорожной опорной поверхности в плоскости контактной площадки шины. На эту необходимость обращают внимание авторы работ [1–4], в которых можно увидеть наличие определенной сложности и неоднозначности при экспериментальном определении отдельных составляющих смещения нормальной реакции. Следует также отметить отсутствие пригодных для применения адекватных моделей аналитического представления величины смещения с использованием исходных данных, доступных для получения и последующих расчетов.

Цель исследований

Разработка обобщенной математической модели взаимосвязи силовых и кинематических параметров для описания явлений, происходящих в плоскости контактной площадки шины при качении колеса в свободном и ведущем режимах.

Материалы и методы

Для численного определения силовых и кинематических параметров при качении колеса в различных режимах целесообразно использование параболической эпюры нормальных реакций в плоскости контактной площадки шины [5, 6]. Наиболее приемлемой для моделирования несимметричности эпюры относительных нормальных реакций по длине контактной площадки тракторной шины низкого давления является параболическая зависимость четвертой степени величины r_z относительной элементарной нормальной реакции [7]:

$$r_z = \frac{1}{16}K - K \left(\delta_{\text{кп}} - \frac{1}{2} \right)^4, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{кп}}$ – относительная продольная координата по длине участка контактной площадки шины, соответствующая расчетному значению относительной нормальной реакции опорной поверхности; K – коэффициент пропорциональности, получаемый из условия равенства единице относительной площади эпюры удельной нормальной реакции.

Величина $\delta_{\text{кп}}$ определяется в долевым выражении от длины контактной площадки шины:

$$\delta_{\text{кп}} = \frac{l}{l_{\text{кп}}},$$

где l – текущая координата контактной площадки шины, отсчитываемая по ее продольной оси в направлении от крайней задней точки контактной площадки к передней точке; $l_{\text{кп}}$ – длина контактной площадки шины.

Диапазон возможных расчетных значений текущей координаты контактной площадки шины $0 \leq l \leq l_{\text{кп}}$.

Расчетная несимметричность эпюры относительных нормальных реакций может быть получена подбором соответствующего значения коэффициента несимметричности $k_{\text{н}}$ в интервале $0 \leq k_{\text{н}} \leq 1$.

Выражение (1) приобретает в этом случае дополнительный множитель:

$$r_z = \left[\frac{1}{16}K - K \left(\delta_{\text{кп}} - \frac{1}{2} \right)^4 \right] [k_{\text{н}} + 2(1 - k_{\text{н}})\delta_{\text{кп}}].$$

Преобразование приводит к развернутому выражению, подлежащему интегрированию:

$$r_z = K \left[k_{\text{н}} \left(-\delta_{\text{кп}}^4 + 2\delta_{\text{кп}}^3 - \frac{3}{2}\delta_{\text{кп}}^2 + \frac{1}{2}\delta_{\text{кп}} \right) + (2 - 2k_{\text{н}}) \left(-\delta_{\text{кп}}^5 + 2\delta_{\text{кп}}^4 - \frac{3}{2}\delta_{\text{кп}}^3 + \frac{1}{2}\delta_{\text{кп}}^2 \right) \right].$$

Интегрирование полученного выражения по $\delta_{\text{кп}}$ в интервале от 0 до 1 для определения суммарной нормальной реакции опорной поверхности $R_{z \text{ max}}$ и приравнивание ее к нормальной (вертикальной) нагрузке на колесо $G_{\text{к}}$ представлено выражением:

$$R_{z \text{ max}} = K \left[\begin{array}{l} k_{\text{н}} \int_0^1 \left(-\delta_{\text{кп}}^4 + 2\delta_{\text{кп}}^3 - \frac{3}{2}\delta_{\text{кп}}^2 + \frac{1}{2}\delta_{\text{кп}} \right) \times \\ \times d\delta_{\text{кп}} + 2(1 - k_{\text{н}}) \times \\ \times \int_0^1 \left(-\delta_{\text{кп}}^5 + 2\delta_{\text{кп}}^4 - \frac{3}{2}\delta_{\text{кп}}^3 + \frac{1}{2}\delta_{\text{кп}}^2 \right) \times \\ \times d\delta_{\text{кп}} \end{array} \right] = G_{\text{к}}. \quad (2)$$

В результате интегрирования в пределах значений $0 \leq \delta_{\text{кп}} \leq 1$ получено:

$$R_{z \text{ max}} = \frac{K}{20} = G_{\text{к}}.$$

Из этого следует, что для любого значения коэффициента несимметричности $k_{\text{н}}$, находящегося в указанном выше диапазоне, коэффи-

циент является величиной, прямо пропорциональной нормальной нагрузке на колесо G_k :

$$K = 20 G_k. \quad (3)$$

Текущее значение суммарной нормальной реакции на участке буксования элементов контактной площадки шины определяется интегрированием функции (2) в пределах значений $0 \leq \delta_{\text{кп}} \leq \delta_{\text{букс}}$:

$$R_{z \text{ букс}} = \int_0^{\delta_{\text{букс}}} \left[\frac{1}{16} K - K \left(\delta_{\text{кп}} - \frac{1}{2} \right)^4 \right] \times \\ \times \left[k_n + 2(1 - k_n) \delta_{\text{кп}} \right] \delta_{\text{кп}}.$$

Величина коэффициента буксования элементов контактной площадки шины $\delta_{\text{букс}}$ определяется в долях длины контактной площадки шины, элементы которой находятся в буксовании, по отношению ко всей длине контактной площадки шины:

$$\delta_{\text{букс}} = \frac{l_{\text{букс}}}{l_{\text{кп}}},$$

где $l_{\text{букс}}$ – текущая координата границы участка буксования контактной площадки шины, отсчитываемая по оси абсцисс в направлении от крайней задней точки контактной площадки к передней точке по ее продольной оси.

Диапазон возможных значений текущей координаты границы участка буксования находится в интервале $0 \leq l_{\text{букс}} \leq l_{\text{кп}}$.

В результате интегрирования и преобразования получено выражение для определения суммарной нормальной реакции на участке буксования контактной площадки шины:

$$R_{z \text{ букс}} = 20 G_k \left[k_n \left(-\frac{1}{5} \delta_{\text{букс}}^5 + \frac{1}{2} \delta_{\text{букс}}^4 - \frac{1}{2} \delta_{\text{букс}}^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4} \delta_{\text{букс}}^2 \right) + (1 - k_n) \left(-\frac{1}{3} \delta_{\text{букс}}^6 + \frac{4}{5} \delta_{\text{букс}}^5 - \frac{3}{4} \delta_{\text{букс}}^4 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{3} \delta_{\text{букс}}^3 \right) \right].$$

Для отображения силовых параметров колеса при его качении в ведущем режиме следует ввести в рассмотрение величину – коэффициент продольной силы k_{R_x} , представляющий собой отношение продольной реакции R_x опорной поверхности к нормальной ее реакции R_z в контактной площадке шины, равной по величине и обратной по направлению нормальной нагрузке G_k на колесо:

$$k_{R_x} = \frac{R_x}{R_z} = \frac{R_x}{G_k}.$$

Коэффициент продольной силы k_{R_x} определяется с учетом образования результирующей продольной реакции R_x двумя составляющими: соответственно $R_{x \text{ букс}}$ – на участке буксования, $R_{x \text{ пок}}$ – на участке покоя элементов контактной площадки шины (рис. 1) и зависимостей:

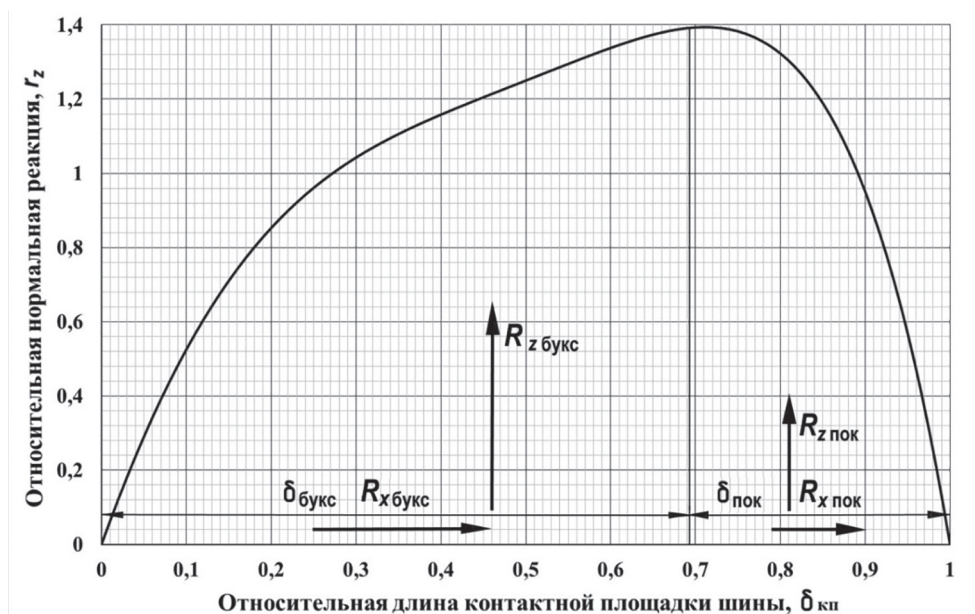


Рис. 1. Схема образования продольных реакций в плоскости контакта шины при качении колеса в ведущем режиме

Fig. 1. Diagram of formation of longitudinal reactions in the plane of contact of the tire when the wheel is rolling in the driving mode

$$\begin{aligned} R_x &= R_{x \text{ букс}} + R_{x \text{ пок}}; R_{x \text{ букс}} = R_{z \text{ букс}} \mu_{\text{сц букс}}; \\ R_{x \text{ пок}} &= R_{z \text{ пок}} \mu_{\text{сц пок}}; \\ R_z &= R_{z \text{ букс}} + R_{z \text{ пок}}; R_{z \text{ букс}} = G_k \delta_{Rz \text{ букс}}; \\ R_{z \text{ пок}} &= G_k \delta_{Rz \text{ пок}}, \end{aligned}$$

где $R_{x \text{ букс}}, R_{x \text{ пок}}$ – продольная реакция соответственно на участке буксования и на участке покоя элементов контактной площадки шины; $R_{z \text{ букс}}, R_{z \text{ пок}}$ – нормальная реакция соответственно на участке буксования и на участке покоя элементов контактной площадки шины; $\mu_{\text{сц букс}}$ – динамический коэффициент сцепления элементов контактной площадки шины на участке буксования; $\mu_{\text{сц пок}}$ – статический коэффициент сцепления элементов контактной площадки шины на участке покоя; G_k – нормальная (вертикальная) нагрузка на колесо, воспринимаемая опорной поверхностью; $\delta_{Rz \text{ букс}}$ – относительная нормальная реакция на участке буксования элементов контактной площадки шины; $\delta_{Rz \text{ пок}}$ – относительная нормальная реакция на участке покоя элементов контактной площадки шины.

Динамический коэффициент сцепления элементов контактной площадки шины на участке буксования $\mu_{\text{сц букс}}$ определяется по убывающей эллиптической зависимости от относительной нормальной реакции на участке буксования:

$$\mu_{\text{сц букс}} = \mu_{\text{пок}} - \frac{\sqrt{(\mu_{\text{пок}} - \mu_{\text{букс}})^2 - (\mu_{\text{пок}} - \mu_{\text{букс}})^2 \times (1 - \delta_{Rz \text{ букс}})^2}}{(1 - \delta_{Rz \text{ букс}})^2},$$

где $\mu_{\text{пок}}$ – коэффициент трения покоя элементов контактной площадки шины на опорной поверхности при полном отсутствии буксования или скольжения колеса; $\mu_{\text{букс}}$ – коэффициент трения при полном буксовании колеса и элементов контактной площадки шины.

Максимальное значение динамического коэффициента сцепления равно коэффициенту трения покоя контактной площадки шины на дорожной опорной поверхности при отсутствии буксования колеса. Минимальное значение равно коэффициенту трения буксования элементов контактной площадки при полном буксовании колеса.

Статический коэффициент сцепления элементов контактной площадки шины на участке покоя определяется по возрастающей эллиптической зависимости от относительной нормальной реакции на участке покоя:

$$\mu_{\text{сц пок}} = \sqrt{\mu_{\text{пок}}^2 - \mu_{\text{пок}}^2 \delta_{Rz \text{ пок}}^2}.$$

Минимальное значение коэффициента $\mu_{\text{сц пок}}$ равно нулю при отсутствии буксования элементов контактной площадки шины. Максимальное значение равно коэффициенту трения покоя элементов контактной площадки шины на опорной поверхности в момент перехода к полному буксованию, когда последний крайний задний элемент контактной площадки еще продолжает находиться в состоянии покоя.

Относительная нормальная реакция на участке буксования элементов контактной площадки шины:

$$\delta_{Rz \text{ букс}} = \frac{R_{z \text{ букс}}}{R_z} = \frac{R_{z \text{ букс}}}{G_k},$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \delta_{Rz \text{ букс}} = 20 \left[\left(k_n \left(-\frac{1}{5} \delta_{\text{букс}}^5 + \frac{1}{2} \delta_{\text{букс}}^4 - \frac{1}{2} \delta_{\text{букс}}^3 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4} \delta_{\text{букс}}^2 \right) + (1 - k_n) \left(-\frac{1}{3} \delta_{\text{букс}}^6 + \frac{4}{5} \delta_{\text{букс}}^5 - \frac{3}{4} \delta_{\text{букс}}^4 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{3} \delta_{\text{букс}}^3 \right) \right]. \end{aligned}$$

Относительная нормальная реакция на участке покоя:

$$\delta_{Rz \text{ пок}} = \frac{R_{z \text{ пок}}}{R_z} = \frac{R_{z \text{ пок}}}{G_k}.$$

Площадь эпюры на участке буксования $\delta_{\text{букс}}$ элементов контактной площадки шины представляет собой относительную нормальную реакцию $\delta_{Rz \text{ букс}}$ на участке буксования, а площадь эпюры на участке покоя $\delta_{\text{пок}}$ – относительную нормальную реакцию $\delta_{Rz \text{ пок}}$ на участке покоя. На участке буксования действуют составляющая $R_{z \text{ букс}}$ нормальной реакции опорной поверхности и составляющая $R_{x \text{ букс}}$ продольной реакции, а на участке покоя – соответственно составляющие $R_{z \text{ пок}}$ и $R_{x \text{ пок}}$.

Развернутое выражение для определения коэффициента продольной силы имеет вид:

$$\begin{aligned} k_{Rx} = (5 \delta_{\text{букс}}^2 - 10 \delta_{\text{букс}}^3 + 10 \delta_{\text{букс}}^4 - 4 \delta_{\text{букс}}^5) \mu_{\text{сц букс}} + \\ + (1 - k_n) \left[1 - (5 \delta_{\text{букс}}^2 - 10 \delta_{\text{букс}}^3 + 10 \delta_{\text{букс}}^4 - 4 \delta_{\text{букс}}^5) \times \right. \\ \left. \times \mu_{\text{сц пок}} \right]. \end{aligned}$$

Сумма относительных нормальных реакций контактной площадки шины на участке покоя и на участке буксования должна быть равна единице, то есть:

$$\delta_{Rz \text{ букс}} + \delta_{Rz \text{ пок}} = 1.$$

Более ранними исследованиями автора статьи установлено, что коэффициент буксования колеса выражается зависимостью:

$$\delta_k = \frac{\alpha_k \delta_{\text{букс}}}{\sqrt{4\pi^2(1-\delta_{\text{букс}}) + \alpha_k^2 \delta_{\text{букс}}}},$$

где α_k – центральный угол контакта шины с опорной поверхностью, рад.

Обратная зависимость коэффициента буксования контактной площадки шины от коэффициента буксования колеса представлена выражением:

$$\delta_{\text{букс}} = \frac{(\alpha_k^2 - 4\pi^2) \delta_k^2 + \sqrt{(16\pi^4 - 8\pi^2\alpha_k^2 + \alpha_k^4) \delta_k^2 + 16\pi^2\alpha_k^2}}{2\alpha_k^2}.$$

Радиус качения колеса в ведущем режиме определяется выражением:

$$r_{k \text{ вед}} = r_{k \text{ св}}(1 - \delta_k),$$

где $r_{k \text{ св}}$ – радиус качения колеса в свободном режиме; δ_k – коэффициент буксования колеса.

Для определения продольного смещения центра нормальных реакций опорной поверхности используем статический момент эпюры относительно вертикальной оси r_z , который выражается интегральной функцией:

$$S_z = \int_0^1 \left[\frac{1}{16} K - K \left(\delta_{\text{кп}} - \frac{1}{2} \right)^4 \right] \times \\ \times [k_n + 2(1 - k_n) \delta_{\text{кп}}] \delta_{\text{кп}} d\delta_{\text{кп}}.$$

После интегрирования выражения в пределах значений $0 \leq \delta_{\text{кп}} \leq 1$ получено:

$$S_z = \frac{K}{420} [13 - 2,5k_n].$$

Продольная координата центра масс несимметричной эпюры по относительной длине контактной площадки шины определяется с учетом зависимости (3) выражением:

$$\delta_{\text{кп цм}} = \frac{S_z}{G_k} = \frac{1}{21} [13 - 2,5k_n]. \quad (5)$$

Относительное смещение продольной координаты результирующей нормальной реакции относительно геометрического центра длины контактной площадки составляет:

$$\Delta_{\text{нр}} = \delta_{\text{кп цм}} - 0,5. \quad (6)$$

Смещение продольной координаты результирующей нормальной реакции относительно геометрического центра длины контактной площадки определяет плечо действия результирующей нормальной реакции относительно вертикальной оси колеса:

$$a_{\text{нр}} = \Delta_{\text{нр}} l_{\text{кп}}.$$

При качении колеса в свободном режиме численное значение этого плеча определяется из известной формулы момента сопротивления деформации шины при качении колеса в свободном режиме [8]:

$$a_{\text{нр св}} = \frac{h_{\text{ст}}}{2\pi}. \quad (7)$$

Ниже в качестве примера выполнен расчет коэффициента несимметричности, а также силовых и кинематических параметров для тракторного колеса с шиной 15,5-R38 модели Ф-2А при следующих исходных данных:

- свободный радиус шины $r_{\text{св}} = 0,785$ м;
- посадочный радиус шины $r_{\text{об}} = 0,483$ м;
- нормальная (вертикальная) нагрузка на колесо $G_k = 17,06$ кН;
- давление воздуха в шине $p_w = 0,08$ МПа;
- статический нормальный прогиб шины $h_{\text{ст}} = 58,2$ мм = 0,0582 м;
- длина контактной площадки шины $l_{\text{кп}} = 617,9$ мм = 0,618 м;
- центральный угол контакта шины $\alpha_{\text{кп}} = 0,825$ рад;
- коэффициент трения покоя элементов контактной площадки шины на опорной поверхности при полном отсутствии буксования колеса $\mu_{\text{пок}} = 0,85$;
- коэффициент трения элементов контактной площадки шины при полном буксовании колеса $\mu_{\text{букс}} = 0,7$.

Радиус качения колеса в свободном режиме:

$$r_{k \text{ св}} = \frac{l_{\text{кп}}}{\alpha_k},$$

$$r_{k \text{ св}} = \frac{617,9}{0,825} = 748,97 \text{ мм} = 0,749 \text{ м}.$$

Момент сопротивления деформации шины при качении колеса:

$$M_{\text{деф}} = \frac{G_k h_{\text{ст}}}{2\pi}, \\ M_{\text{деф}} = \frac{17,06 \cdot 58,2}{2\pi} = 158,02 \text{ кН} \cdot \text{мм} = 0,158 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления деформации шины преодолевается приложенным к колесу крутящим моментом $M_{к\text{деф.}} = M_{\text{деф.}} = 0,158$ кН·м.

Коэффициент сопротивления деформации шины при качении колеса в свободном режиме:

$$f_{к\text{св}} = \frac{h_{ст}}{2\pi r_{к\text{св}}}, \quad f_{к\text{св}} = \frac{0,0582}{2\pi \cdot 0,749} = 0,01237.$$

Условная продольная реакция опорной поверхности при качении колеса в свободном режиме:

$$R_{x\text{св}} = \frac{M_{к\text{деф.}}}{r_{к\text{св}}}, \quad R_{x\text{св}} = \frac{0,158}{0,749} = 0,211 \text{ кН.}$$

Численное значение плеча действия результирующей нормальной реакции относительно оси колеса при его качении в свободном режиме составляет по формуле (7):

$$a_{нр\text{св}} = \frac{58,2}{2\pi} = 9,26 \text{ мм.}$$

Относительное смещение центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки шины должно составлять при свободном режиме качения:

$$\Delta_{нр\text{св}} = \frac{a_{нр\text{св}}}{l_{кп}}, \quad \Delta_{нр\text{св}} = \frac{9,26}{617,9} = 0,01499.$$

Для определения расчетной величины коэффициента несимметричности эпюры относительных нормальных реакций $k_{н\text{св}}$ при свободном режиме качения колеса необходимо преобразовать выражение (5) с учетом соотношения (8), полученного простым преобразованием выражения (6):

$$\delta_{кп\text{цм}\text{св}} = \Delta_{нр\text{св}} + 0,5. \quad (8)$$

В результате получается выражение:

$$k_{н\text{св}} = 1 - 8,4 \Delta_{нр\text{св}}. \quad (9)$$

В приведенном примере для шины модели Ф-2А расчетное значение коэффициента несимметричности эпюры относительных нормальных реакций при качении колеса в свободном режиме составляет:

$$k_{н\text{св}} = 1 - 8,4 \cdot 0,01499 = 0,8741.$$

На рис. 2 изображена несимметричная эпюра относительных нормальных реакций, приведенная к продольной оси контактной площадки шины на недеформируемой опорной поверхности, и наложенная на эпюру схема смещения нормальной реакции опорной поверхности при качении колеса в свободном режиме.

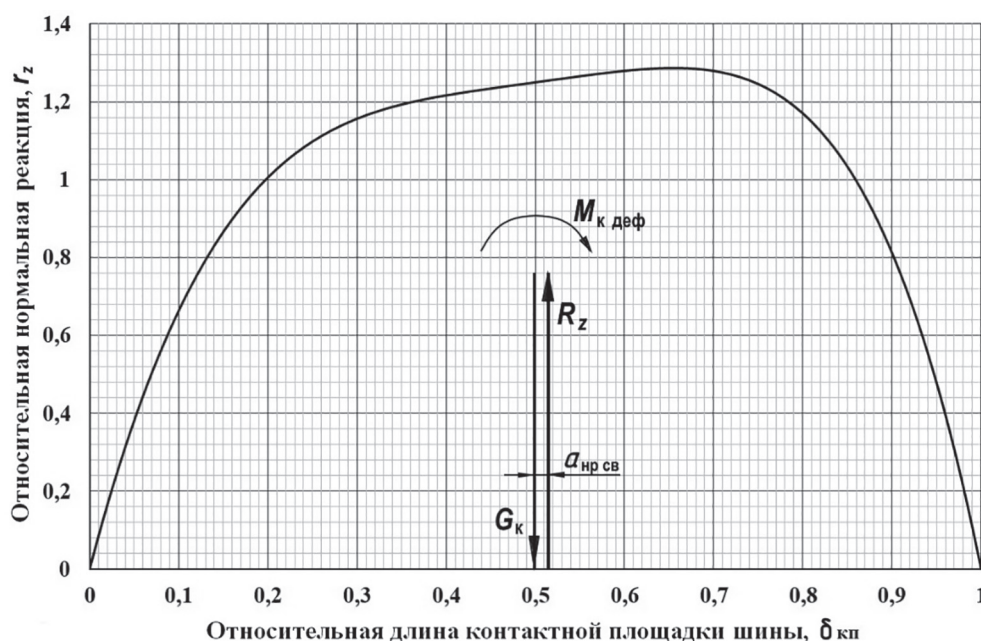


Рис. 2. Схема смещения нормальной реакции опорной поверхности при нулевом значении коэффициента продольной силы в свободном режиме качения колеса (коэффициент несимметричности эпюры относительных нормальных реакций $k_{н\text{св}} = 0,8741$)

Fig. 2. The scheme of displacement of the normal reaction of the support surface at a zero value of the coefficient of longitudinal force in the free rolling mode of the wheel (the coefficient of asymmetry of the epure of relative normal reactions $k_{н\text{св}} = 0,8741$)

В ведущем режиме качения колеса при увеличении на некоторую величину относительного смещения центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки коэффициент несимметричности эпюры относительных нормальных реакций может быть представлен выражением (9), дополненным коэффициентом приращения относительного смещения φ :

$$k_n = 1 - 8,4 \Delta_{\text{нрсв}} (1 + \varphi).$$

Коэффициент приращения относительного смещения φ может быть определен линейной или другой зависимостью от коэффициента продольной силы k_{Rx} :

$$\varphi = f(k_{Rx}).$$

В работе [3] отмечается, что продольное смещение центра нормальной реакции прямо пропорционально продольному усилию в пятне контакта, то есть продольной реакции.

В этой связи наиболее приемлемой следует признать прямую пропорциональную зависимость с коэффициентом β :

$$\varphi = \beta \frac{k_{Rx}}{k_{Rx \max}}.$$

Тогда можно представить пропорциональную зависимость в виде выражения (10), по-

лагая при этом, что некоторое максимальное значение коэффициента приращения относительного смещения φ_{\max} наблюдается при максимальном значении коэффициента $k_{Rx \max}$ продольной силы (рис. 3):

$$k_n = 1 - 8,4 \Delta_{\text{нрсв}} \left(1 + \beta \frac{k_{Rx}}{k_{Rx \max}} \right). \quad (10)$$

Зависимость строится по функции коэффициента продольной силы, текущее значение которого делится на максимальное значение $k_{Rx \max}$ этого коэффициента. На первом шаге следует выбрать начальное значение коэффициента продольной силы, равное $k_{Rx \max}$ при симметричной эпюре, то есть при коэффициенте несимметричности, равном единице. Полученное расчетное значение следует подставить в расчетную формулу коэффициента несимметричности эпюры и относительного смещения центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки. Для получения конечных результатов необходимо выполнить несколько предварительных расчетов с пошаговым уточнением максимального значения $k_{Rx \max}$. Для достижения достаточно высокой точности следует произвести два-три расчетных цикла.

Относительное смещение центра нормальных реакций несимметричной эпюры относи-

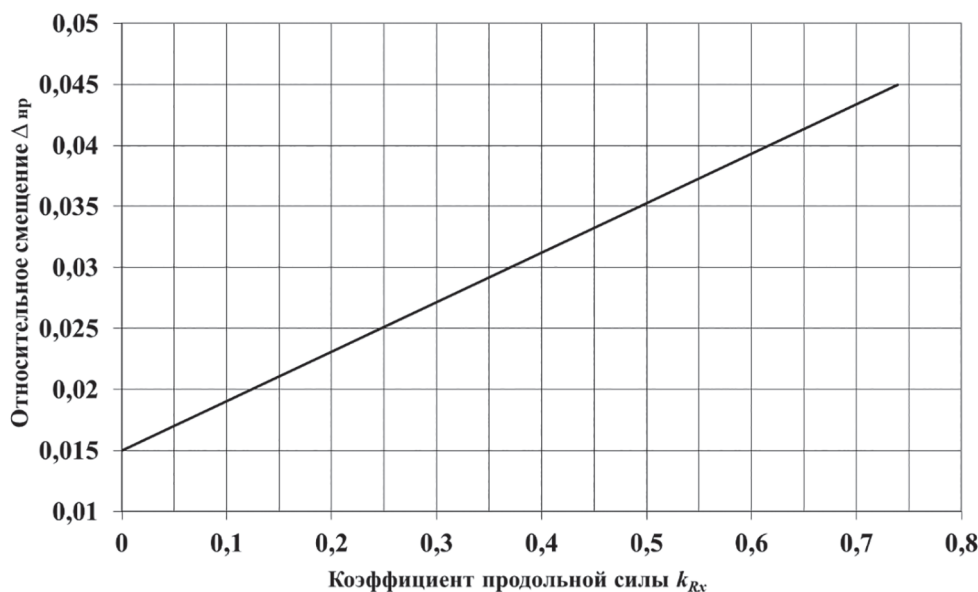


Рис. 3. Линейная зависимость относительного смещения нормальной реакции от коэффициента продольной силы для ведущего режима качения колеса

Fig. 3. Linear dependence of the relative displacement of the normal reaction on the coefficient of longitudinal force for the driving mode of wheel rolling

тельно геометрического центра контактной площадки в ведущем режиме выражается зависимостью от относительного смещения центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки в свободном режиме:

$$\Delta_{\text{нр вед}} = \Delta_{\text{нр св}} \left(1 + \beta \frac{k_{R_x}}{k_{R_x \text{ max}}} \right).$$

Например, принято расчетное значение $\beta = 2$. В этом случае относительное смещение центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки будет увеличено в три раза при максимальном значении коэффициента продольной силы в ведущем режиме качения колеса по сравнению с начальным значением, соответствующим свободному режиму качения колеса.

Показатель β выступает в качестве коэффициента прямой пропорциональности. Его значение может варьировать в диапазоне от единицы до какого-то определенного возрастающего значения, которое можно получить из экспериментальных или расчетных данных по величине относительного смещения

центра нормальных реакций несимметричной эпюры относительно геометрического центра контактной площадки.

На рис. 4 представлена несимметричная эпюра нормальных реакций опорной поверхности и наложенная на нее схема смещения нормальной реакции опорной поверхности с приложением сил и моментов при максимальном значении коэффициента продольной силы в ведущем режиме качения колеса.

Крутящий момент M_k , приложенный к колесу в ведущем режиме качения, включает в себя две составляющие – крутящий момент $M_{k \text{ деф}}$, преодолевающий действие на плече, равном смещению нормальной реакции $a_{\text{нр}}$, пары нормальных сил R_z и G_k , образующих момент сопротивления деформации шины, и крутящий момент $M_{k \text{ тяг}}$, преодолевающий действие на условном плече, равном радиусу $r_{k \text{ св}}$ качения колеса в свободном режиме, пары продольных сил P_x и R_x , образующих момент тягового сопротивления.

Результаты и обсуждение

Ниже приведены сравнительные результаты расчета силовых и кинематических параметров для ведущего режима качения колеса

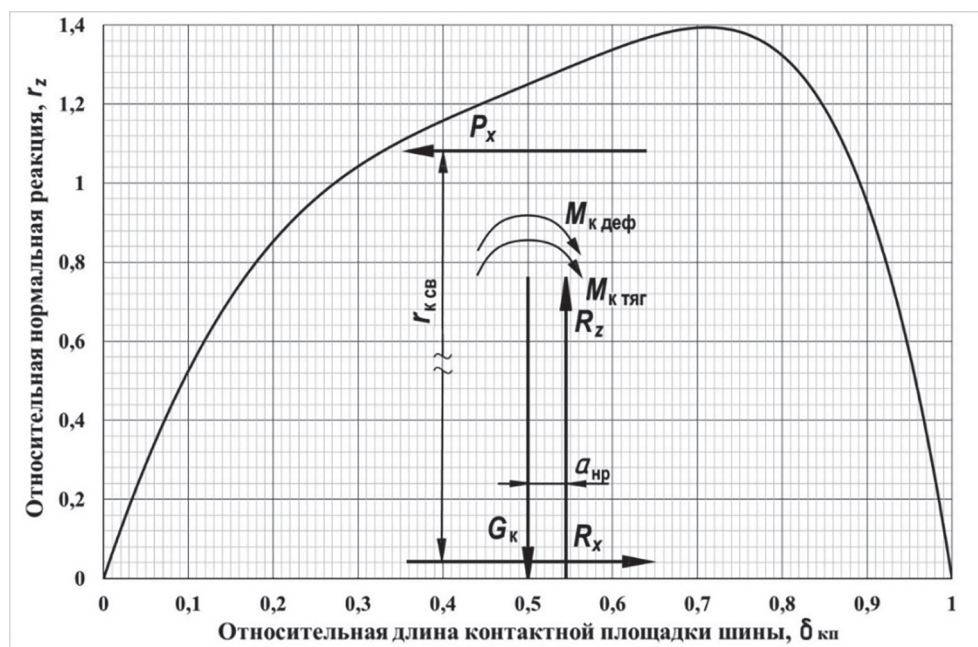


Рис. 4. Схема смещения нормальной реакции опорной поверхности с приложением сил и моментов при максимальном значении коэффициента продольной силы в ведущем режиме качения колеса (коэффициент несимметричности эпюры относительных нормальных реакций опорной поверхности $k = 0,6223$)

Fig. 4. Scheme of displacement of the normal reaction of the support surface with the application of forces and moments at the maximum value of the coefficient of longitudinal force in the driving mode of wheel rolling (the coefficient of asymmetry of the epure of the relative normal reactions of the support surface $k = 0,6223$)

при симметричной и несимметричной эпюрах нормальных реакций в области максимального значения коэффициента продольной силы $k_{Rx \max}$. Эта область является граничной в отношении реализации тяговых свойств колеса без срыва его в полное буксование.

Графическое представление результатов расчета для сравнительной оценки силовых

и кинематических параметров шины и колеса при несимметричной эпюре нормальных реакций, имеющей коэффициент несимметричности $k_n = 0,6223$ при максимальном коэффициенте продольной силы, и симметричной эпюре показано на рис. 5 и 6.

Увеличение несимметричности эпюры приводит к смещению максимума коэффициента

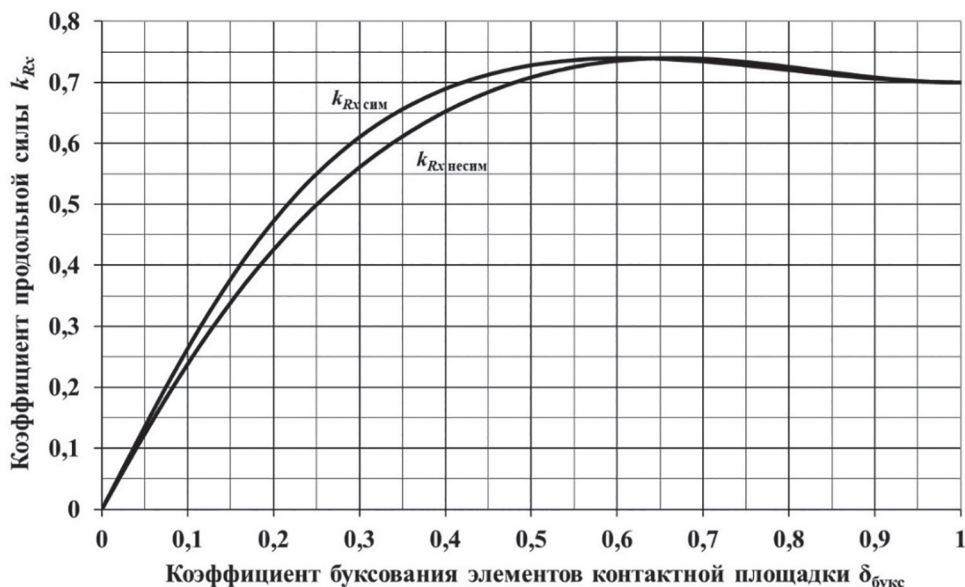


Рис. 5. Зависимость коэффициента продольной силы от коэффициента буксования элементов контактной площадки беговой дорожки шины при симметричной и несимметричной эпюрах нормальных реакций опорной поверхности

Fig. 5. Dependence of the coefficient of longitudinal force on the coefficient of slipping of the elements of the contact pad of the treadmill of the tire with symmetric and asymmetric epures of normal reactions of the supporting surface

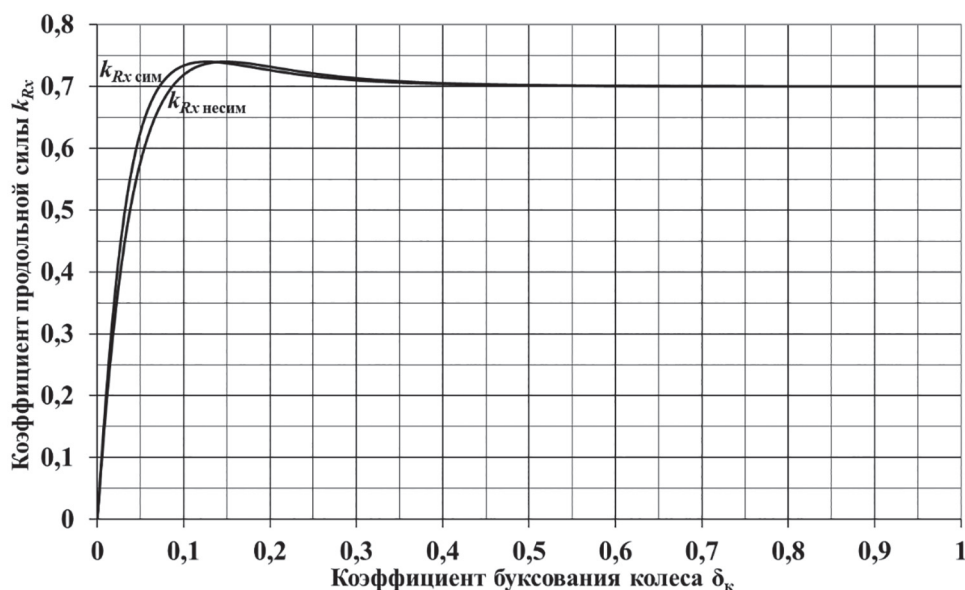


Рис. 6. Тяговая диаграмма колеса при несимметричной и симметричной эпюрах нормальных реакций опорной поверхности

Fig. 6. Traction diagram of a wheel with an asymmetric and symmetric epures of normal reactions of the bearing surface

продольной силы в сторону больших значений коэффициента буксования элементов контактной площадки шины и коэффициента буксования колеса при практически неизменном максимальном значении коэффициента продольной силы.

При несимметричной эпоре с минимальным значением переменного коэффициента несимметричности $k_n = 0,6223$ максимальное значение коэффициента продольной силы составляет $k_{Rx \max} = 0,7392$, а при симметричной эпоре – $k_{Rx \max} = 0,7398$. Отклонение максимального значения коэффициента продольной силы при несимметричной эпоре по сравнению с симметричной эпорой составляет 0,08 %.

Коэффициент буксования элементов контактной площадки шины при несимметричной эпоре составляет значение $\delta_{\text{букс}} = 0,691$, а при симметричной эпоре – $\delta_{\text{букс}} = 0,625$. Отклонение значения коэффициента буксования элементов контактной площадки шины при несимметричной эпоре по сравнению с симметричной эпорой составляет 10,56 %.

Коэффициент буксования колеса при несимметричной эпоре составляет $\delta_k = 0,160$, а при симметричной эпоре – $\delta_k = 0,132$. Отклонение значения коэффициента буксования колеса при несимметричной эпоре по сравнению с симметричной эпорой составляет 21,21 %.

Следует иметь в виду, что в предложенной графоаналитической модели – во избежание некорректного представления эпоры относительных нормальных реакций опорной поверхности с переходом в область их отрицательных значений – наложено ограничение по величине относительного смещения центра нормальных реакций, максимальное относительное значение которого не должно превышать $\Delta_{\text{нр}} = 0,119$ при граничном значении коэффициента несимметричности эпоры $k_n = 0$. Для шины модели Ф-2А максимальное абсолютное смещение в ведущем режиме ограничено значением $a_{\text{нр}} = 73,53$ мм, что в 7,94 раза больше смещения в свободном режиме качения колеса.

Заключение

Представленная графоаналитическая модель несимметричной эпоры относительных нормальных реакций позволяет получить подходящую расчетную форму эпоры, в том числе

несимметричную, отображающую силовые параметры шины и колеса, применительно к свободному и ведущему режимам качения колеса. Приведенная методика определения силовых и кинематических параметров с учетом несимметричности эпоры нормальных реакций опорной поверхности может найти применение при расчете и обосновании эксплуатационных показателей тракторных транспортно-технологических агрегатов, оснащенных колесными движителями, а также при выборе рациональных нагрузочных и скоростных режимов их работы в различных дорожных условиях.

Литература

1. Козлов Ю.Н. Сальников В.И., Барашков А.А., Балакина Е.В. Определение взаимного положения зон разного трения в пятне контакта шины с опорной поверхностью // Автомобильная промышленность. 2014. № 7. С. 15–17.
2. Балакина Е.В., Зотов Н.М. Расчет продольного сноса нормальной реакции на колесо из-за упругих угловых деформаций шины // Автомобильная промышленность. 2015. № 4. С. 25–26.
3. Копотилов В.И. Смещение пятна контакта шины как фактор изменения сопротивления качению // Грузовик. 2016. № 4. С. 26–30.
4. Луан Ле Ван, Федотов А.И. Математическая модель для расчета нормальных и касательных напряжений в пятне контакта колеса с эластичной шиной с плоской опорной поверхностью // Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2 ч. Ч. 1. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2014. С. 139–144.
5. Богомоллов В.А. Расчетное распределение давлений в пятне контакта шины с поверхностью дорожной одежды // Вестник ХНАДУ. 2016. Вып. 72. С. 143–150.
6. Алипов А.А. Беляков В.В., Блохин А.Н., Зезюлин Д.В. Распределение давлений в контакте шины с дорогой // Вестник ИЖГТУ. 2011. № 1 (49). С. 15–18.
7. Романченко М.И. Силовые параметры качения колеса в ведущем режиме // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 9. С. 41–44.
8. Романченко М.И. Сопротивление деформации шины при качении колеса // Автомобильная промышленность. 2009. № 7. С. 20–23.

Reference

1. Kozlov YU.N., Sal'nikov V.I., Barashkov A.A., Balakina YE.V. Determination of the relative position of zones of different friction in the contact patch of the tire with the supporting surface. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2014. No 7, pp. 15–17 (In Russ.).
2. Balakina YE.V., Zotov N.M. Calculation of the longitudinal drift of the normal reaction to the wheel due to elastic angular deformations of the tire. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2015. No 4, pp. 25–26 (In Russ.).
3. Kopotilov V.I. Displacement of the tire contact patch as a factor of the change in rolling resistance. *Gruzovik*. 2016. No 4, pp. 26–30 (In Russ.).
4. Luan Le Van, Fedotov A.I. Mathematical model for calculating normal and tangential stresses in the contact patch of a wheel with an elastic tire with a flat bearing surface. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sotsial'no-kul'turnogo i tekhnicheskogo servisa: materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [State and prospects for the development of social, cultural and technical services: materials of the II All-Russian scientific and practical conference with international participation]. V 2 ch. CH. 1. Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta. 2014, pp. 139–144 (In Russ.).
5. Bogomolov V.A. Calculated pressure distribution in the contact patch of the tire with the road surface. *Vestnik KHNADU*. 2016. Vup. 72, pp. 143–150 (In Russ.).
6. Alipov A.A., Belyakov V.V., Blokhin A.N., Zeczyulin D.V. Pressure distribution in contact of the tire with the road. *Vestnik IZHGTU*. 2011. No 1 (49), pp. 15–18 (In Russ.).
7. Romanchenko M.I. Force parameters of wheel rolling in driving mode. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2009. No 9, pp. 41–44 (In Russ.).
8. Romanchenko M.I. Resistance to deformation of the tire when rolling the wheel. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2009. No 7, pp. 20–23 (In Russ.).