

УДК 630*377.4

Ю. А. Ким, В. А. Бобрович, Б. В. Войтеховский, В. С. Исаченков
Белорусский государственный технологический университет

К ВОПРОСУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОСНОВАНИЕМ

Рост энергонасыщенности сельхозмашин и машин специального назначения приводит к росту их массы и, следовательно, к увеличению сопротивления передвижению. Основные потери мощности связаны с передвижением транспортного средства.

В статье рассмотрен процесс взаимодействия жесткого колеса с упругим деформируемым основанием, а также основные причины, которые влияют на величину момента сопротивления качению колеса. В основном момент сопротивления колеса, а следовательно энергозатраты на передвижение, зависят от характера распределения удельного давления в пятне контакта колеса и деформируемого опорного основания. Именно от характера распределения удельного давления зависят направление и величина реактивной силы, прямо влияющей на момент сопротивления качению. В свою очередь характер распределения контактного напряжения зависит от формы поверхности контакта, которая может быть задана размерами и формой жесткого колеса.

В статье доказано, что моделирование поверхности контакта пневматического колеса с деформируемым основанием в ряде случаев достаточно точно отражает реальную картину взаимодействия и может быть применено в расчетах ходовых систем сельхозмашин и машин специального назначения.

Ключевые слова: шина колеса, пятно контакта, геометрические параметры, опорная поверхность.

Yu. A. Kim, V. A. Bobrovich, B. V. Voytekhovskiy, V. S. Isachenkov
Belarusian State Technological University

TO THE QUESTION OF THE INTERACTION OF THE WHEEL PROPULSION WITH A DEFORMABLE BASE

The increase in energy saturation of agricultural machines and special-purpose machines leads to an increase in their mass and, consequently, to an increase in resistance to movement. Major power loss associated with the movement of the vehicle.

The article describes the process of interaction of a hard wheel with an elastic deformable base, as well as the main reasons that affect the magnitude of the rolling resistance moment of the wheel. Basically the moment of wheel resistance, and therefore the energy consumption for movement, depends on the nature of the distribution of specific pressure in the contact patch of the wheel and the deformable support base. It is the nature of the distribution of the specific pressure that determines the direction and magnitude of the reactive force, which directly affects the rolling resistance moment. In turn, the nature of the distribution of contact voltage depends on the shape of the contact surface, which can be specified by the size and shape of the hard wheel.

The article proved that modeling the contact surface of a pneumatic wheel with a deformable base in some cases fairly accurately reflects the real picture of the interaction and can be used in the calculations of the running systems of agricultural machines and special-purpose machines.

Key words: tire wheel, contact spot, geometric parameters, bearing surface.

Введение. Процесс взаимодействия пневматического колеса с грунтовым основанием в первую очередь связан со взаимной деформацией движителя и основания. От этого зависят форма и размеры пятна контакта. В свою очередь от формы и размеров пятна контакта зависят характер и величины напряжений, обуславливающих сопротивление качению, энергоосберегающие качества транспортного средства и другие важные эксплуатационные характеристики. В общем случае форма поверхности контакта представляет собой произвольную

кривую, имеющую области положительной и отрицательной кривизны. Однако теоретическое определение формы поверхности контакта представляет собой сложную задачу. Поэтому во многих случаях форма поверхности контакта задается предположительно. Такая модель снижает точность решения, но позволяет избежать трудностей вычислительного характера. В частности, существует модель, в которой пневматическое колесо заменено на жесткое колесо большего диаметра. В связи этим есть необходимость рассмотрения взаимодействия

жесткого колеса с деформируемым опорным основанием. При этом форма поверхности контакта определяется формой и размерами условного жесткого колеса.

Основная часть. В процессе взаимодействия пневматического колеса с деформируемым основанием одним из основных параметров является форма и размеры поверхности контакта взаимодействующих тел. Именно от формы и размеров поверхности контакта зависят такие показатели, как сопротивление качению, проходимость, развиваемая касательная сила тяги и др. [1–11].

В общем случае форма поверхности контакта имеет сложную конфигурацию и зависит от размеров и деформативных свойств движителя и опорной поверхности. Теоретическое определение поверхности контакта представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому во многих случаях форма поверхности контакта моделируется. Существует несколько вариантов моделирования, одним из которых является замена пневматического колеса на жесткое, но большего диаметра. В этом случае форма и размеры поверхности контакта будут заданы формой и размерами условного жесткого колеса. В связи с этим важно рассмотреть процесс взаимодействия жесткого колеса с деформируемым грунтовым основанием. При взаимодействии жесткого колеса с грунтовым основанием происходит деформация грунта, что приводит к увеличению площади пятна контакта. Колесо погружается до тех пор, пока не наступит равновесие между силами, действующими в контакте, и силами, приложенными к оси колеса. Размеры и форма жесткого колеса определяют форму поверхности контакта. При заданной глубине погружения можно определить закон распределения вертикальных перемещений частиц грунта U_z [12].

Эти перемещения являются функциями координат по ширине и длине пятна контакта:

$$U_z = f(x, y). \tag{1}$$

Начало координат выбрано на недеформированной опорной поверхности внутри пятна контакта (рис. 1). Функции $F_1(y)$ и $F_2(y)$ описывают его контур и находятся из (1) при $U_z = 0$.

Для крупногабаритных колес характерно преобладание вертикальных перемещений частиц грунта в направлении OZ . Обозначим перемещения частиц грунта U_i , которые для упругого полупространства должны удовлетворять уравнениям Ляме [13]:

$$\Delta U_i + (k+1) \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1, 2, 3); \tag{2}$$

$$k = \frac{\lambda}{\mu},$$

где μ и λ – коэффициенты Ляме.

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1-\sigma)(1-2\sigma)};$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)},$$

где E – модуль деформации почвы; σ – коэффициент поперечной деформации; Δ – оператор Лапласа; Θ – объемная деформация, которая определяется по формуле

$$\Theta = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial U_i}{\partial x_i}.$$

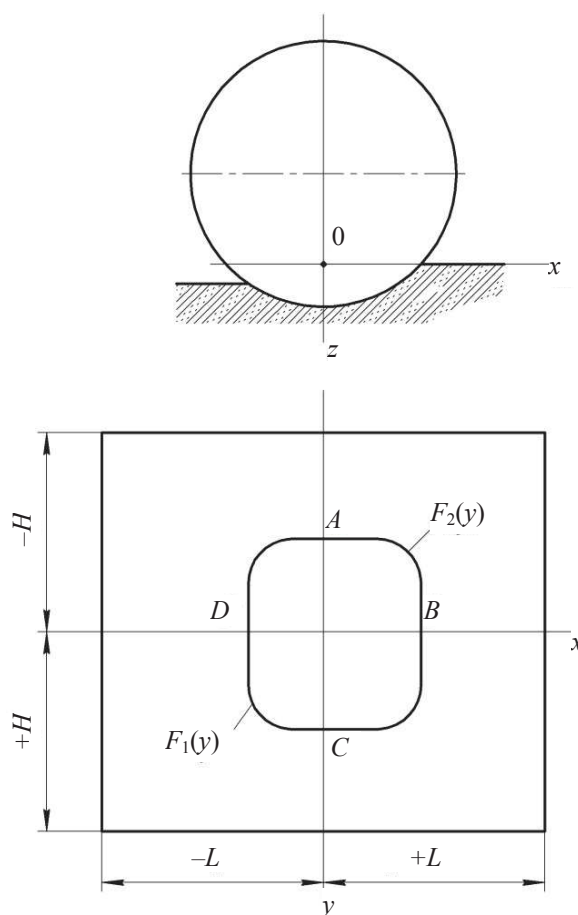


Рис. 1. Схема расположения системы координат для однородного полупространства

Общее решение уравнений (2) имеет следующий вид:

$$U_i = \varphi_i + z \frac{\partial \Psi}{\partial x_i}, \tag{3}$$

где φ_i – произвольные гармонические функции.

Функция Ψ определяется из уравнения

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = -\frac{k+1}{k+3} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i}.$$

В целом почвогрунт по физическим свойствам не является однородной средой. Модуль деформации E может считаться постоянной величиной только в пределах отдельных слоев. Представление грунтового основания в виде многослойной анизотропной среды с числом слоев больше двух делает математическую модель более точной, но приводит к значительным трудностям вычислительного характера, а также громоздким уравнениям для вычисления коэффициентов ряда. Пахотный горизонт реальной почвогрунтовой залежи представляет собой более рыхлый слой почвы толщиной 0,3–0,4 м, а подстилающий – плотное грунтовое основание. Каждый слой характеризуется тремя параметрами: толщиной h , модулем E и коэффициентом поперечной деформации σ . Для грунтового полупространства $h \rightarrow \infty$. Определим форму поверхности контакта с почвой при заданной наибольшей глубине погружения H_0 жесткого колеса, имеющего форму и размеры рассматриваемого пневматического, при давлении воздуха в шине P_w , равным нулю.

Перемещение частиц почвы на расстояние y от средней плоскости вращения колеса определяется из выражения

$$f(x, y) = H(y) - R(y) + \sqrt{[R(y)]^2 - x^2}, \quad (4)$$

где $R(y)$ – радиус сечения, расположенного на расстоянии y от средней плоскости вращения колеса; $H(y)$ – наибольшая глубина погружения колеса в почву в том же сечении.

На рис. 2 изображена схема к определению функции деформации почвы под жестким колесом.

Искомые гармонические функции φ_i в уравнениях (3) должны удовлетворять краевым условиям при $z = 0$.

Суммарное давление по всей площади контакта равно общей вертикальной нагрузке на колесо G , которое определялось по формуле

$$G = \iint_{(F)} P_{zz0} dF, \quad (5)$$

где F – площадь пятна контакта шины с почвой; P_{zz0} – давление в контакте.

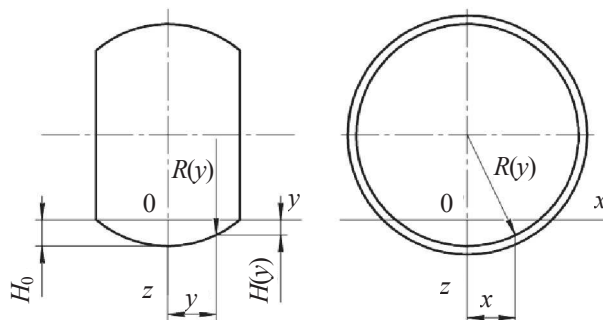


Рис. 2. Схема для определения функции деформации почвы под жестким колесом

Уравнение (5) является вторым краевым условием.

В общем случае, если известны перемещения частиц почвы под колесом в направлениях осей координат $0x$ и $0y$, должны удовлетворяться условия на поверхности:

$$\varphi_1(x, y) = U_x(x, y); \quad (6)$$

$$\varphi_2(x, y) = U_y(x, y). \quad (7)$$

Для активного колеса ставится следующее краевое условие:

$$P_k = \iint_{(F)} f P_{zz0} dF, \quad (8)$$

где P_k – касательная сила тяги, Н; f – коэффициент сцепления; F – площадь пятна контакта, м².

Заключение. Процесс взаимодействия пневматического колеса с грунтовым основанием сопровождается взаимной деформацией взаимодействующих тел. В результате форма и размеры поверхности контакта зависят от механических свойств опорной поверхности, формы, размеров и деформативных свойств пневматического колеса. Поверхность контакта имеет сложную конфигурацию, состоящую из вогнутых и выпуклых участков, от которой зависит характер распределения контактных напряжений, а следовательно, сила сопротивления качению и другие важнейшие показатели. Проведенные теоретические исследования показали, что моделирование поверхности контакта пневматического колеса с деформируемым основанием в ряде случаев достаточно точно отражает реальную картину взаимодействия и может быть применено в расчетах ходовых систем сельхозмашин и машин специального назначения.

Литература

1. Рабочев И. С. Уменьшение отрицательного воздействия мобильных агрегатов на почву // Вестник сельскохозяйственной науки. 1979. № 4. С. 90–94.
2. Пупонин А. И., Матюк Н. Ф., Русанов В. А. Деформация дерново-подзолистой почвы ходовыми системами тракторов и урожай // Земледелие. 1981. № 6. С. 22–24.

3. Камнев А. Л., Маслов В. А., Полонский М. А. Влияние ходовых аппаратов тракторов на плотность почвы и урожайность // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1978. № 2. С. 74–78.
4. Бондарев А. Г. Изменение физических свойств и плодородия почв Нечерноземья под воздействием ходовых систем // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. № 5. С. 8–10.
5. Кононов А. М. Исследование реализации тягово-сцепных качеств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Беларуси: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Горки: БСХА, 1974. 41 с.
6. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву: труды Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. М., 1981. С. 56–61.
7. Ксеневиц И. П., Скотников В. А., Ляско М. И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
8. Бочаров Н. Ф. Транспортные средства на эластичных движителях. М.: Машиностроение, 1974. 208 с.
9. Омелянов А. Е. О применении пневматических колес на сельхозмашинах // Сельхозмашина. 1948. № 5. С. 15–18.
10. Ульянов Н. А. Теория самоходных землеройно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1969. 520 с.
11. Алексейчик, Н. А., Будько Ю. В., Терехов Б. А. Повышение проходимости сельскохозяйственных машин. Минск: Урожай, 1979. 139 с.
12. Ким Ю. А., Опейко С. Ф. Теоретическое определение напряжений в области контакта жесткого колеса с деформируемым грунтом // Автотракторостроение. Вып. 17. Теория и конструирование мобильных машин. 1982. С. 68–70.
13. Филоненко – Бородич М. М. Теория упругости: учеб. для вузов; 4-е изд., доп. и перераб. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. 364 с.

References

1. Rabochev I. S. Reduction of the negative impact of mobile aggregates on soil. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science], 1979, no. 4, pp. 90–94 (In Russian).
2. Puponin A. I., Matyuk N. F., Rusanov V. A. Deformation of sod-podzolic soil by tractors' tractors and harvesting. *Zemledeliye* [Agriculture], 1981, no. 6, pp. 22–24 (In Russian).
3. Kamnev A. L., Maslov V. A., Polonsky M. A. The influence of tractors' tractors on soil density and yields. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 1978, no. 2, pp. 74–78 (In Russian).
4. Bondarev A. G. Changes in physical properties and soil fertility of the Non-Black Earth Region under the influence of running systems. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture], 1983, no. 5, pp. 8–10 (In Russian).
5. Kononov A. M. *Issledovaniye realizatsii tyagovo-stsepnnykh kachestv i agrotekhnicheskoy prokhodimosti kolesnykh traktorov na suglinistykh pochvakh Belarus. Aftoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Investigation of the realization of traction-coupling qualities and agrotechnical patency of wheeled tractors on loamy soils in Belarus. Abstract of thesis doct. eng. sci.]. Gorki, 1974. 41 p.
6. Gaponenko V. S. On ways to reduce the sealing effect of machine-tractor aggregates on the soil. *Trudy Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchayeva («Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu»)* [Proceeding of the Soil Institute. V. V. Dokuchaeva («Influence of agricultural machinery on soil»)], 1981, pp. 56–61 (In Russian).
7. Ksenevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. *Khodovaya sistema – pochva – urozhay* [Running system – soil – harvest]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
8. Bocharov N. F. *Transportnyye sredstva na elastichnykh dvizhitelyakh* [Vehicles on elastic propellers]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 208 p.
9. Omel'yanov A. E. On the use of pneumatic wheels on agricultural machines. *Sel'khoz mashina* [Agricultural machinery], 1948, no. 5, pp. 15–18 (In Russian).
10. Ul'yanov N. A. *Teoriya samokhodnykh zemleroyno-transportnykh mashin* [Theory of self-propelled earth-moving machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 520 p.
11. Alekseychik N. A., Budko Yu. V., Terekhov B. A. *Povysheniye prokhodimosti sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Raising the passability of agricultural machines]. Minsk, Urozhay Publ., 1979. 139 p.
12. Kim YU. A., Opeyko S. F. *Teoreticheskoye opredeleniye napryazheniy v oblasti kontakta zhestkogo kolesa s deformiruyemym gruntom* [Theoretical determination of stresses in the contact area of a hard wheel with a deformable soil]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 1982, pp. 68–70.

13. Filonenko – Borodich M. M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1959. 364 p.

Информация об авторах

Ким Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: y.kim@belstu.by

Бобрович Владимир Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.bobrovich@belstu.by

Войтеховский Борис Викторович – ассистент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: b.voytehovski@belstu.by

Исаченков Владимир Сергеевич – ассистент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Information about the authors

Kim Yuriy Alekseevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: y.kim@belstu.by

Bobrovich Vladimir Arkadieevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.bobrovich@belstu.by

Voytekhovskiy Boris Viktorovich – assistant lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.voytehovski@belstu.by

Isachenkov Vladimir Sergeevich – assistant lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.isachenkov@belstu.by

Поступила 18.10.2018