

УДК 629.032

**Ю. А. Ким<sup>1</sup>, М. Т. Насковец<sup>2</sup>, Н. И. Жарков<sup>2</sup>, В. И. Гиль<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ**

В связи с ростом энергонасыщенности лесных машин, тракторов и техники специального назначения возрастает их масса, следовательно, увеличиваются нагрузки их ходовых систем на опорную поверхность. Возникают такие негативные явления, как переуплотнение почвогрунта выше допустимых норм, повышающие энергозатраты на передвижение.

Для учета изменения сопротивления грунтовых оснований по мере деформирования пользуются расчетными моделями, схематизирующими зависимость между нагрузкой на грунтовый массив и его осадкой. Наибольшее распространение имеет модель линейно-деформируемого полупространства. Грунт рассматривается как сплошное однородное линейно-деформируемое тело, бесконечно простирающееся вглубь и в стороны и ограниченное сверху плоскостью.

В действительности грунтовое основание, как правило, является многослойной структурой. Верхний слой имеет ограниченную толщину, а нижний представляет собой упругое полупространство. Представление грунтов в виде нескольких слоев в предположении постоянства модуля упругости для каждого из них позволяет более точно учесть естественное сложение грунтового основания.

В результате проведенных исследований получено решение, позволяющее определять величину и характер распределения напряжений, а также момент сопротивления качению колеса и его зависимость от свойств взаимодействующих тел.

**Ключевые слова:** колесный движитель, грунтовое основание, нагрузка на колесо, момент сопротивления качению.

**Для цитирования:** Ким Ю. А., Насковец М. Т., Жарков Н. И., Гиль В. И. Исследование процесса взаимодействия колесного движителя с двухслойным грунтовым основанием // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 208–211.

**Yu. A. Kim<sup>1</sup>, M. T. Naskovets<sup>2</sup>, N. I. Zharkov<sup>2</sup>, V. I. Gil<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian National Technical University<sup>2</sup>Belarusian State Technological University**RESEARCH OF THE INTERACTION PROCESS  
OF THE WHEEL DRIVE WITH DOUBLE-LAYER SOIL BASE**

In connection with the increase in the energy saturation of forest machines, tractors and special-purpose equipment, their mass increases, therefore, the loads of their running systems on the supporting surface increase. There are such negative phenomena as overconsolidation of the soil above the permissible norms, which increases the energy consumption for movement.

To take into account the change in the resistance of soil foundations during deformation, calculation models are used that schematize the relationship between the load on the soil mass and its settlement. The most widespread is the model of a linearly deformable half-space. The soil is considered as a continuous homogeneous linearly deformable body, infinitely extending in depth and to the sides and bounded from above by a plane.

In reality, the subgrade is usually a multi-layer structure. The subgrade is usually a multi-layer structure. The upper layer has a limited thickness, while the lower one is an elastic half-space. Representation of soils in the form of several layers, assuming a constant modulus of elasticity for each of them, makes it possible to more accurately take into account the natural composition of the subgrade.

As a result of the research, a solution was obtained that allows one to determine the magnitude and nature of the stress distribution, as well as the moment of rolling resistance of the wheel and its dependence on the properties of interacting bodies.

**Key words:** wheel mover, soil base, volumetric deformation, wheel load, rolling resistance moment.

**For citation:** Kim Y. A., Naskovets M. T., Zharkov N. I., Gil V. I. Research of the interaction process of the wheel drive with double-layer soil base. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 208–211 (In Russian).

**Введение.** Эксплуатационные свойства колесных машин при взаимодействии с деформируемым опорным основанием зависят от характеристик опорного основания и наоборот, характеристики деформируемого опорного основания зависят от режимов работы и параметров применяемых колесных машин [1–3]. При рассмотрении такой взаимоувязанной системы решение поставленных исследователями задач производится с применением математических моделей и методов. Чтобы учесть многообразие характеристик опорного основания, с одной стороны, и полнее отразить влияние колесных машин на опорное основание, с другой, приходится существенно усложнять методы расчета [4]. Целью данного исследования является теоретический расчет величины усилий и момента сопротивления качению колеса и его зависимость от свойств взаимодействующих тел. Предметом и объектом исследований является взаимодействие колесного движителя с грунтовым основанием.

**Основная часть.** Воздействие колесного движителя ходовой системы транспортного средства на деформируемую грунтовую поверхность вызывает в грунтовом массиве напряженно-деформируемое состояние. При этом в нем происходят сложные процессы, связанные с разрушением частиц и структурных агрегатов, выжиманием воды и воздуха из пор [5]. Для разных грунтов доля того или иного явления зависит от плотности, влажности и других свойств грунта. Сжатие защемленных объемов воздуха определяют упругие деформации [6]. В общем случае грунт является вязко-упруго-пластичным, анизотропным телом. При кратковременном воздействии преобладают упругие деформации [7]. Кроме того, грунтовое основание, как правило, является многослойным. Верхний слой имеет ограниченную толщину, а нижний представляет собой упругое полупространство. Во многих случаях глубина распространения напряжений превышает толщину верхнего слоя, тогда влияние на деформацию оказывает подстилающее основание [8]. При этом принцип непрерывности материи полностью остается в силе и отдельно выделенные слои сохраняют плотное соприкосновение [9], [10]. Таким образом, представление грунтовой залежи в виде нескольких слоев, в предположении постоянства модуля упругости для каждого из них, позволяет более точно учесть естественное сложение грунтового основания.

Исходные данные:

$R_k$  – радиус колеса;

$B$  – половина ширины колеса;

$R_y = R_k - \alpha y^4$  – уравнение профиля шины;  $\alpha = 0,00000077$ ;

$E$  – модуль деформации материала первого слоя;

$E^*$  – модуль деформации материала второго слоя;

$\sigma$  – величина упругого восстановления грунта;

$\lambda, \mu$  – коэффициенты Ляме первого слоя;

$\lambda^*, \mu^*$  – коэффициенты Ляме второго слоя;

$P_w$  – давление воздуха в шине;

$c$  – коэффициент податливости шины;

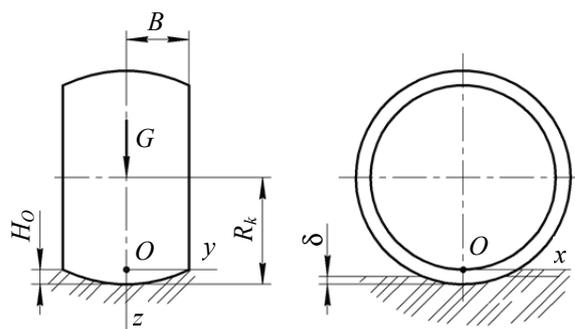
$H_0$  – глубина погружения колеса в грунт;

$G$  – нагрузка на колесо;

$M_f$  – момент сопротивления качению колеса;

$h$  – толщина первого слоя;

$L, H$  – периоды изменения координат  $x$  и  $y$ .



Расчетная схема

На рисунке показана расчетная схема, ниже представлена последовательность расчетов.

Определяем постоянные коэффициенты и периоды изменения координат  $x$  и  $y$ :  $z = 4R_k, H = 4B$ .

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-\sigma)}; \lambda^* = \frac{E^*\sigma^*}{(1+\sigma^*)(1-\sigma^*)}; \quad (1)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}; \mu^* = \frac{E^*}{2(1+\sigma^*)}; k = \frac{\lambda}{\mu}; k^* = \frac{\lambda^*}{\mu^*}; \quad (2)$$

$$A = -\frac{k+1}{k+3}, A^* = -\frac{k^*+1}{k^*+3}; \quad (3)$$

$$N = \frac{(1+A^*)(\lambda^*+2\mu^*)}{(1+A)(\lambda+2\mu)}; M = cP_w + \frac{a_{00}}{4}. \quad (4)$$

При  $k$  и  $i = 1, 2, 3, \dots, 10$  находим:

$$e_i(h) = e^{-\frac{i\pi}{H}h}; e_k(h) = e^{-\frac{k\pi}{z}h}; \quad (5)$$

$$e(h) = e^{-\pi\sqrt{\frac{k^2+i^2}{z^2+H^2}}h}; e = 2,71. \quad (6)$$

Определяем вид функции  $f(x, y)$  и абсциссы границ пятна контакта  $x_1(y), x_2(y)$ :

$$f(x, y) = H_0 - R_k + \sqrt{(R_k - \alpha y^4)^2 - x^2}; \quad (7)$$

$$x_1(y) = -\sqrt{2(R_k - \alpha y^4)(H_0 - \alpha y^4)\delta - (H_0 - \alpha y^4)^2\delta^2};$$

$$x_2(y) = \sqrt{(R_k - \alpha y^4)^2 - (R_k - H_0)^2}. \quad (8)$$

Находим коэффициенты разложения в ряд функции  $f(x, y)$ :

$$a_{ki} = \frac{1}{zH} \int_{x_1(y)-B}^{x_2(y)} \int_{-B}^B f(x, y) c_k(x) dx \cdot c_i(y) dy;$$

$$b_{ki} = \frac{1}{zH} \int_{x_1(y)-B}^{x_2(y)} \int_{-B}^B f(x, y) c_k(x) dx \cdot s_i(y) dy;$$

$$\alpha_{ki} = \frac{1}{zH} \int_{x_1(y)-B}^{x_2(y)} \int_{-B}^B f(x, y) c_i(x) dx \cdot s_k(y) dy;$$

$$\beta_{ki} = \frac{1}{zH} \int_{x_1(y)-B}^{x_2(y)} \int_{-B}^B f(x, y) s_i(x) dx \cdot s_k(y) dy. \quad (9)$$

Определяем коэффициенты разложения в ряд постоянной  $M = \frac{a_{00}}{4} + cP_w$ :

$$\delta_{ki} = \frac{2M}{zH} \int_{-B}^B \int_{x_1(y)}^{x_2(y)} c_k(x) dx [c_i(y)] dy;$$

$$\gamma_{ki} = \frac{2M}{zH} \int_{-B}^B \int_{x_1(y)}^{x_2(y)} c_k(x) dx [s_i(y)] dy;$$

$$\varepsilon_{ki} = \frac{2M}{zH} \int_{-B}^B \int_{x_1(y)}^{x_2(y)} s_k(x) dx [c_i(y)] dy;$$

$$\mu_{ki} = \frac{2M}{zH} \int_{-B}^B \int_{x_1(y)}^{x_2(y)} s_k(x) dx [s_i(y)] dy. \quad (10)$$

Находим коэффициенты разложения в ряд функции  $\varphi_3(x, y, z)$ .

Поскольку эта функция является гармонической, то решение удобно представить в виде ряда Фурье [11].

Находим функцию  $\varphi_3(x, y, 0)$  и при  $z = 0$  строим форму поверхности контакта:

$$\varphi_3(x, y, 0) = \sum_{i=1}^{10} [A_{0i} c_i(y) + B_{0i} s_i(y)] e_i(z) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^{10} [A_{ki} c_k(x) c_i(y) + B_{ki} c_k(x) s_i(y)] e(z) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{10} [c_{k0} s_k(x) + D_{k0} c_k(x)] e_k(z) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^{10} [c_{ki} c_i(y) s_k(x) + D_{ki} s_i(y) s_k(x)] e(z). \quad (11)$$

Определяем давление в контакте  $P_{zz_0}$ :

$$P_{zz_0} = - \sum_{i=1}^{10} [P_{1i} c_i(y) + P_{2i} s_i(y)] -$$

$$- \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^{10} [Q_{1ik} c_k(x) c_i(y) + Q_{2ik} c_k(x) s_i(y)] -$$

$$- \sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^{10} [E_{1ik} s_k(x) c_i(y) + E_{2ik} s_k(x) s_i(y)] -$$

$$- \sum_{k=1}^{10} [F_{1k} c_k(x) + F_{2k} s_k(x)]. \quad (12)$$

Находим нагрузку на колесо  $G$ :

$$G = \iint_{(F)} P_{zz_0} dF. \quad (13)$$

Определяем момент сопротивления качению  $M_f$ :

$$M_f = \iint_{(F)} P_{zz_0} x dF. \quad (14)$$

**Заключение.** В результате проведенных исследований получено решение, позволяющее определять величину и характер распределения усилий, а также момент сопротивления качению колеса и его зависимость от свойств взаимодействующих тел.

### Список литературы

1. Уменьшение отрицательного воздействия мобильных агрегатов на почву / И. С. Рабочев [и др.] // Вестник сельскохозяйственной науки. 1979. № 4. С. 90–94.
2. Гапоненко В. С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву // Влияние сельскохозяйственной техники на почву. 1981. С. 56–61.
3. Алексейчик Н. А. Будько Ю. В., Терехов Б. А. Повышение проходимости сельскохозяйственных машин. Минск: Урожай, 1979. 139 с.
4. Орнатский Н. В. Механика грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1962. 435 с.
5. Кацыгин В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий // Вопросы земледельческой механики. 1975. Т. 8. С. 3–142.
6. Бабков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механика грунтов. М.: Высшая школа, 1976. 325 с.
7. Золотаревская Д. И. Зависимость между сжимающими напряжениями и осадкой почв // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1980. № 2. С. 30–32.

8. Ксеневиц И. П., Скотников В. А., Ляско М. И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
9. Филоненко-Бородич М. М. Теория упругости. М.; Л.: ОГИЗ, 1947. 295 с.
10. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1968. Ч. 1. 436 с.
11. Романовский П. И. Ряды Фурье. М.: Наука, 1973. 334 с.

#### References

1. Rabochev I. S., Bakhtin P. U., Gavalov I. V., Aksenenko V. D. 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. Gaponenko V. S. On ways to reduce the sealing effect of machine-tractor aggregates on the soil. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na pochvu* [Influence of agricultural machinery on soil], 1981, pp. 56–61 (In Russian).
3. Alekseychik N. A., Budko Yu. V., Terekhov B. A. *Povysheniye prokhozimosti sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Raising the passability of agricultural machines]. Minsk, Urozhay Publ., 1979. 139 p.
4. Ornatskiy N. V. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, MGU Publ., 1962. 435 p.
5. Katygin V. V. Fundamentals of the theory of choosing the optimal parameters of mobile agricultural machinery and implements. *Voprosy zemledel'cheskoy mekhaniki* [Agricultural mechanics issues], 1975, Vol. 8, pp. 3–142 (In Russian).
6. Babkov V. F., Bezruk V. M. *Osnovy gruntovedeniya i mekhanika gruntov* [Fundamentals of soil science and soil mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. 325 p.
7. Zolotarevskaya D. I. The relationship between compressive stresses and soil sediment. *Mekhanizatsia i elektrifikatsia sel'skogo khozyaystva* [Agricultural mechanization and electrification], 1980, no. 2, pp. 30–32 (In Russian).
8. Ksenevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. *Khodovaya sistema – pochva – urozhay* [Running system – soil – harvest]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
9. Filonenko-Borodich M. M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, OGIЗ Publ., 1947. 295 p.
10. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoy sredy. Chast' I* [Continuum mechanics. Part 1]. Moscow, MGU Publ., 1968. 436 p.
11. Romanovskiy P. I. *Ryady Fur'ye* [Fourier Series]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 334 p.

#### Информация об авторах

**Ким Юрий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

**Насковец Михаил Трофимович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: naskovets@belstu.by

**Жарков Николай Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: zharkov@belstu.by

**Гиль Виталий Иванович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v.gil@belstu.by

#### Information about the authors

**Kim Yuriy Alekseevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Ya. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igmp\_atf@bntu.by

**Naskovets Mikhail Trofimovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: naskovets@belstu.by

**Zharkov Nikolay Ivanovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Senior Researcher of the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zharkov@belstu.by

**Gil Vitaliy Ivanovich** – PhD (Engineering), Senior Lecture, the Department of Engineering Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.gil@belstu.by

Поступила 13.03.2021