

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-133657>

Оригинальное исследование



Расчет нормальной жесткости и параметров пятен контакта шин сверхнизкого давления для сельскохозяйственной техники

Е.В. Балакина¹, З.А. Годжаев², А.А. Коньшин¹, М.С. Кочетов¹¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация;² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Воздействие шин на деформируемую опорную поверхность определяет не только возможности машины по передвижению, но и давление на грунт через геометрические характеристики пятен контакта. Давление на грунт нормируется и ограничивается условиями сохранности его агрофизических свойств. Поэтому, при создании машин различного назначения для передвижения по деформируемым опорным поверхностям или их прицепах требуется в процессе проектирования рассчитывать давление на грунт. Однако, на сегодняшний день отсутствуют универсальные зависимости для расчета указанных параметров шин сверхнизкого давления. Это относится и к вертикальному, и к наклонному расположению шин.

Цель работы – разработка и реализация универсальных методик расчета нормальной жесткости и параметров пятен контакта шин сверхнизкого давления для сельскохозяйственной техники.

Материалы и методы. При моделировании использовались программные продукты: Excel; MatLab; Curve Expert Professional.

Результаты. Получена универсальная расчетно-экспериментальная зависимость для определения нормальной жесткости шин сверхнизкого давления, в том числе при возможном наклоне оси вращения колеса. Зависимость учитывает давление в шине, нормальную нагрузку на колесо, угол наклона оси вращения и геометрические характеристики шины. Получена формула для определения контурной площади пятна контакта шины сверхнизкого давления. Она позволяет рассчитывать текущее давление на грунт, которое не должно превышать нормируемой величины.

Заключение. Разработана и реализована методика расчета нормальной жесткости и параметров пятна контакта для шин сверхнизкого давления: длины контакта, контурной площади и давления в контакте. Методика является универсальной для всех шин сверхнизкого давления.

Ключевые слова: шина сверхнизкого давления; нормальная жесткость; длина пятна контакта; контурная площадь пятна контакта; методики расчета.

Для цитирования:

Балакина Е.В., Годжаев З.А., Коньшин А.А., Кочетов М.С. Расчет нормальной жесткости и параметров пятен контакта шин сверхнизкого давления для сельскохозяйственной техники // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-133657>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-133657>

Original Study Article

Calculation of normal stiffness and contact patch of ultra-low pressure tires for agricultural machinery

Ekaterina V. Balakina¹, Zahid A. Godzhaev², Alexander A. Konshin¹, Mikhail S. Kochetov¹

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation;

² Federal Scientific Institution Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The impact of tires on a deformable ground surface determines not only the ability of a vehicle to move, but also the pressure on ground through the contact patch geometric characteristics. The pressure on soil is normalized and limited by the conditions for the preservation of its agrophysical properties. Therefore, when creating vehicles for various purposes for their movement or movement of their trailers on deformable ground surfaces, it is required to calculate the pressure on ground in the design process. However, currently there are no universal dependencies for calculation of the mentioned parameters of ultra-low pressure tires. This applies to both vertical and inclined tire arrangement.

AIMS: Development and implementation of universal methods for calculation of normal stiffness and contact patch parameters of ultra-low-pressure tires for agricultural machinery.

MATERIALS AND METHODS: Software products such as MS Excel, MATLAB and Curve Expert Professional were used in modeling.

RESULTS: The universal analytical-experimental dependence has been obtained to determine the normal stiffness of ultra-low pressure tires, including a possible inclination of the wheel rotation axis. The dependence takes into account tire pressure, normal wheel load, an inclination angle of the rotation axis and tire geometric characteristics. The formula is obtained for determining the contact patch contour area of an ultra-low pressure tire. It helps to calculate the current pressure on ground, which should not exceed the specified value.

CONCLUSIONS: The method for calculation of normal stiffness and contact patch parameters such as contact length, contour area and contact pressure for ultra-low pressure tires has been developed and implemented. The method is universal for all ultra-low pressure tires.

Keywords: *ultra-low pressure tire; normal stiffness; contact patch length, contour area of contact patch, calculation methods.*

Cite as:

Balakina EV, Godzhaev ZA, Konshin AA, Kochetov MS. Calculation of normal stiffness and contact patch of ultra-low pressure tires for agricultural machinery. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(1): 49–58. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-133657>

Received: 24.01.2023

Accepted: 01.03.2023

Published: 15.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

Шины транспортных средств по различному воздействию на твердую и деформируемую опорные поверхности. Их воздействие на твердую опорную поверхность [1–3] определяет их контактные сцепные и геометрические характеристики. Эти характеристики влияют на безопасность движения транспортного средства (устойчивость, управляемость, тормозные свойства).

Воздействие шин на деформируемую опорную поверхность [4–6] определяет не только возможности машины по передвижению, но и давление на грунт через геометрические характеристики пятен контакта. Давление на грунт нормируется и ограничивается условиями сохранности его агрофизических свойств.

Поэтому, при создании машин различного назначения для передвижения по деформируемым опорным поверхностям или их прицепах требуется в процессе проектирования рассчитывать давление на грунт. Как известно, этот параметр связан не только с нормальной нагрузкой на колесо, но и с контурной площадью пятна контакта шины [7–10]. Чем эта площадь больше, тем ниже давление на грунт. Контурная площадь определяется упругими свойствами шины, а именно, нормальной жесткостью. Для увеличения контурной площади при сохранении прочностных свойств и долговечности шин применяют шины сверхнизкого давления [11, 12]. Для определения длин и контурных площадей пятен контакта при проектном моделировании машины требуются расчетные зависимости. Такие

зависимости существуют для легковых и грузовых шин обычного назначения [13–15]. Упругие свойства шин обычных и сверхнизкого давления изучались в работах [16–22]. Однако, на сегодняшний день отсутствуют универсальные зависимости для расчета указанных параметров шин сверхнизкого давления. Это относится и к вертикальному, и к наклонному расположению шин.

ЦЕЛЬ

Целью данного исследования является разработка и реализация универсальных методик расчета нормальной жесткости и параметров пятен контакта шин сверхнизкого давления для сельскохозяйственной техники.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С участием авторов проведено экспериментальное определение упругих свойств шин сверхнизкого давления. Теоретическое исследование основано на результатах этих экспериментов. Были измерены 7 шин сверхнизкого давления, фотографии которых показаны на рис. 1.

Под общим руководством чл.-корр. РАН З.А. Годжаева на экспериментальном стенде определялись нагрузочные характеристики этих шин при разных значениях внутреннего давления. Эти зависимости между нагрузкой и деформацией имели вид пар экспериментальных точек (P_z ; Z) при каждом значении давления.



Рис. 1. Фотографии исследуемых шин.
Fig. 1. Photographs of the studied tires.

С помощью программного продукта Curve Expert Professional измеренные нагрузочные характеристики были аппроксимированы, и построены расчетно-экспериментальные зависимости вида $P_z = f(Z)$ для каждого значения давления в шине. Для примера, полученные зависимости представлены на рис. 2 в графическом виде.

Авторами разработана методика построения универсальной расчетно-экспериментальной зависимости для определения нормальной жесткости произвольной шины сверхнизкого давления. В основе методики лежат исходные экспериментальные нагрузочные характеристики $P_z = f(Z)$ различных шин сверхнизкого давления. Суть предлагаемой методики можно охарактеризовать следующими этапами:

1. Аппроксимация для каждой опытной шины сверхнизкого давления экспериментальных нагрузочных характеристик $P_z = f(Z)$ функциями одинакового вида $P_z = a_i \cdot Z^{b_i}$ для каждого давления p_i в данной шине. Здесь a_i , b_i – постоянные коэффициенты.
2. Аппроксимация зависимости полученных коэффициентов a и b от давления в шине p для каждой исследуемой шины сверхнизкого давления. В результате получаем дополнительные функции:

$$a = f(p) \text{ и } b = f(p).$$

Они имеют вид:

$$a = k_1 \cdot p; \quad b \approx \text{const}.$$

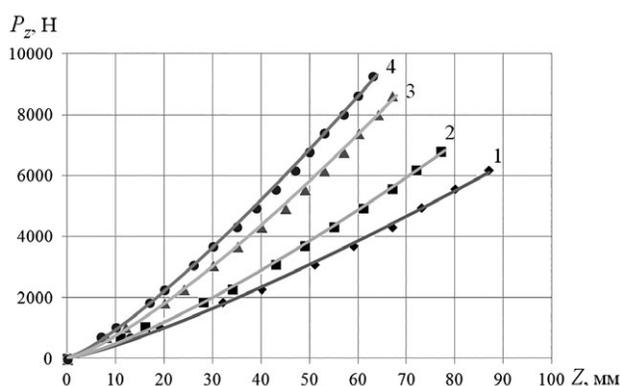


Рис. 2. Расчетно-экспериментальные нагрузочные характеристики шины 1300x600-533: 1 – $p=20$ кПа; 2 – $p=30$ кПа; 3 – $p=60$ кПа; 4 – $p=70$ кПа.

Fig. 2. Analytical-experimental load characteristics for the 1300x600-533 tire: 1 – $p=20$ kPa; 2 – $p=30$ kPa; 3 – $p=60$ kPa; 4 – $p=70$ kPa.

В итоге для каждой шины сверхнизкого давления получены выражения:

$$P_z = a \cdot Z^b \text{ или } P_z = k_1 \cdot p \cdot Z^b.$$

3. По определению, коэффициент нормальной жесткости шины (нормальная жесткость) – есть первая производная от нормальной нагрузки колеса по нормальному прогибу шины. Поэтому, необходимо дифференцирование полученной формулы нормальной нагрузки по нормальному прогибу. Оно позволяет получить выражение для нормальной жесткости каждой шины сверхнизкого давления:

$$C_{tz} = \frac{\partial P_z}{\partial Z} = \frac{\partial (a \cdot Z^b)}{\partial Z} = a \cdot b \cdot Z^{b-1} = k_1 \cdot p \cdot b \cdot Z^{b-1}.$$

Вводя новые обозначения $k_0 = k_1 \cdot b$; $d = b - 1$ получим выражение:

$$C_{tz} = k_0 \cdot p \cdot Z^d. \quad (1)$$

Пример расчета нормальной жесткости показан на рис. 3 в графическом виде.

4. Избавление от неизвестной величины Z в правой части уравнения (1) для каждой шины сверхнизкого давления:

$$C_{tz} = k_0 \cdot p \cdot Z^d; \quad C_{tz} = k_0 \cdot p \cdot \left(\frac{P_z}{C_{tz}} \right)^d;$$

$$C_{tz}^1 = \frac{k_0 \cdot p \cdot P_z^d}{C_{tz}^d}; \quad C_{tz}^{(1+d)} = k_0 \cdot p \cdot P_z^d;$$

$$C_{tz} = k_0^{\frac{1}{1+d}} \cdot p^{\frac{1}{1+d}} \cdot P_z^{\frac{d}{1+d}}.$$

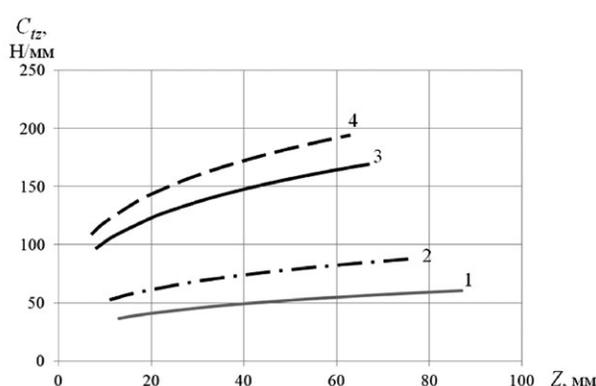


Рис. 3. Нормальная жесткость шины 1300x600-533: 1 – $p=20$ кПа; 2 – $p=30$ кПа; 3 – $p=60$ кПа; 4 – $p=70$ кПа.

Fig. 3. Normal stiffness for the 1300x600-533 tire: 1 – $p=20$ kPa; 2 – $p=30$ kPa; 3 – $p=60$ kPa; 4 – $p=70$ kPa.

Обозначим

$$k = k_0^{1+d} = (k_1 \cdot b)^{\frac{1}{1+(b-1)}} = (k_1 \cdot b)^{\frac{1}{b}}; n_1 = \frac{1}{1+d} = \frac{1}{b};$$

$$n_2 = \frac{d}{1+d} = \frac{b-1}{b}.$$

В результате выражение (1) примет общий вид:

$$C_{tz} = k \cdot p^{n_1} \cdot P_z^{n_2}. \tag{2}$$

где p – давления в шине; P_z – нормальная нагрузка на шину; k, n_1, n_2 – постоянные коэффициенты, характеризующие конструкцию данной шины.

Таким образом, удалось избавиться от неизвестной величины нормального прогиба Z в формуле (1) для расчета коэффициента нормальной жесткости.

Теперь в этом выражении присутствуют условия: давление в шине p , нормальная нагрузка на шину P_z и постоянные коэффициенты k, n_1, n_2 , характеризующие конструкцию данной шины.

В табл. 1 приведены расчетные постоянные коэффициенты для 7 моделей шин сверхнизкого давления.

5. Получение универсальной расчетно-экспериментальной зависимости для нормальной жесткости шины сверхнизкого давления.

В табл. 2 приведены геометрические характеристики, рассматриваемых шин сверхнизкого давления, и полученные постоянные коэффициенты уравнения (2) для расчета нормальной жесткости.

Анализ соответствия полученных постоянных коэффициентов k, n_1, n_2 разным характеристикам шин выявил взаимосвязи вида:

Таблица 1. Постоянные коэффициенты уравнения (2)

Table 1. Constant coefficients of the equation (2)

Полученные постоянные коэффициенты	№ шины						
	1	2	3	4	5	6	7
k_1	0,829	0,738	0,650	0,675	0,642	0,695	1,152
b	1,358	1,263	1,420	1,380	1,302	1,336	1,282
k_0	1,126	0,934	0,923	0,931	0,836	0,929	1,476
d	0,358	0,263	0,420	0,380	0,302	0,336	0,282
k	1,091	0,947	0,945	0,949	0,871	0,946	1,255
n_1	0,736	0,792	0,704	0,725	0,768	0,749	0,780
n_2	0,264	0,208	0,296	0,275	0,232	0,251	0,220

Таблица 2. Характеристики шины и полученные коэффициенты

Table 2. Tire properties and obtained coefficients

№ Шины	Характеристики шины				Полученные коэффициенты			
	$[P_z], Н$	$D_0, мм$	$H_t, мм$	$B_t, мм$	$\frac{H_t}{B_t}$	k	n_1	n_2
1	4000	1300	380	530	0,717	1,091	0,736	0,264
2	6000	1300	380	600	0,633	0,947	0,792	0,208
3	8000	1300	345	700	0,493	0,945	0,704	0,296
4	8000	1300	345	700	0,493	0,949	0,725	0,275
5	6000	1200	330	600	0,550	0,871	0,768	0,232
6	8000	1300	345	700	0,493	0,946	0,749	0,251
7	8000	1300	345	700	0,493	1,255	0,780	0,220

$$k = f\left(\frac{H_t}{B_t}\right); n_1 = f\left(\frac{H_t}{B_t}\right); n_2 = f\left(\frac{H_t}{B_t}\right),$$

где H_t – высота профиля шины в мм; B_t – ширина профиля шины в мм.

Аппроксимация указанных зависимостей позволила получить следующую систему универсальных коэффициентов:

$$\begin{cases} k = 6,1 + 17,4 \cdot \frac{H_t}{B_t} - 14,6 \left(\frac{H_t}{B_t}\right)^2; \\ n_1 = -0,67 + 4,82 \cdot \frac{H_t}{B_t} - 4 \left(\frac{H_t}{B_t}\right)^2; \\ n_2 = 1,65 + 4,764 \cdot \frac{H_t}{B_t} - 3,94 \left(\frac{H_t}{B_t}\right)^2. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 4 представлены результаты расчета значений безразмерных коэффициентов k, n_1, n_2 по выражениям (3) в графическом виде. Точки показывают значения соответствующих коэффициентов для разных шин из табл. 2.

По результатам расчета коэффициентов k, n_1, n_2 для шины с заданным соотношением $\frac{H_t}{B_t}$ появляется возможность вычисления нормальной жесткости шины сверхнизкого давления по выражению (2):

$$C_{tz} = k \cdot p^{n_1} \cdot P_z^{n_2}.$$

Реализация разработанной математической модели выполнялась в средах MatLab и Excel.

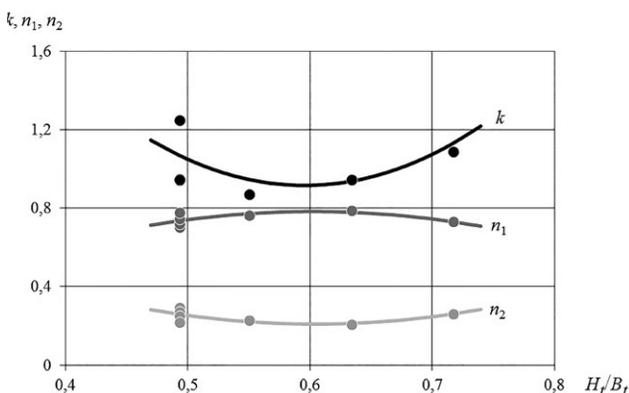


Рис. 4. Коэффициенты для расчета нормальной жесткости шин сверхнизкого давления: линии – расчет по зависимостям (3); точки – эксперимент.

Fig. 4. Coefficients for calculation of normal stiffness of ultra-low pressure tires: lines – values calculated with the formulae (3); points – experimental values.

Формулы (2) и (3) относятся к случаю вертикального расположения главной плоскости колеса. При его наклонном расположении требуется корректировка уравнения (2):

$$C_{tz_{\alpha \neq 0}} = K_{\alpha z} \cdot C_{tz}, \quad (4)$$

где $C_{tz_{\alpha \neq 0}}$ – коэффициент нормальной жесткости при наклонном расположении; α – угол наклона оси вращения колеса; $K_{\alpha z}$ – коэффициента коррекции нормальной жесткости шины.

Для расчета $K_{\alpha z}$ авторами получена приближенная зависимость

$$K_{\alpha z} \approx 1 - 0,052\alpha + 0,00026\alpha^2 + 0,00044\alpha^3 - 0,00005\alpha^4. \quad (5)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, получены расчетно-экспериментальные выражения (2) и (3) для определения нормальной жесткости шин сверхнизкого давления. Формулы (2) и (3) являются универсальными для всех шин сверхнизкого давления. Они учитывают давление в шине, нормальную нагрузку на нее в конкретных условиях и ее геометрические характеристики: высоту и ширину профиля. Полученные коэффициенты k, n_1, n_2 являются функциями отношения геометрических характеристик профиля (H_t/B_t). Зависимостей указанных коэффициентов от других геометрических параметров шины не выявлено. Коэффициенты k, n_1, n_2 можно вычислить по выражению (3).

По значению нормальной жесткости можно рассчитать нормальную деформацию и геометрические характеристики пятна контакта шины сверхнизкого давления с грунтом, а также давление на грунт.

$$Z = \frac{P_z}{C_{tz}}, \quad (6)$$

где Z – нормальная деформация (прогиб); P_z – нормальная нагрузка.

Длину пятна контакта можно вычислить согласно работе [13] по следующей формуле

$$l_c = 2 \cdot k_l \sqrt{Z \cdot (2R_0 - Z)}, \quad (7)$$

где k_l – экспериментальный коэффициент уменьшения длины пятна контакта, рассчитанный по формуле Хедэкея ($k_l \approx 0,7$).

Формула (7) справедлива при паспортном давлении в шине или отличающемся от него не более чем на 20%.

Контурную площадь пятна контакта шин больших размеров с грунтовым основанием можно приближенно вычислить по полученной авторами зависимости от паспортной нагрузки по выражению

$$F_c \approx K(a \cdot P_z + b \cdot P_z^2), \quad (8)$$

где K – коэффициент учета грунтового основания, зависящий от наружного диаметра шины колеса (табл. 3); $a = 0,335$; $b = -0,0000645$; P_z – нормальная нагрузка в кГс (0,1Н); F_c – контурная площадь пятна контакта в см² (0,0001 м²).

Таблица 3. Коэффициент K

Table 3. Values of the K coefficient

Наружный диаметр шины, 10 ⁻³ м (мм)	K
< 600	1,60
600 ... 800	1,40
1000 ... 1200	1,20
1200 ... 1500	1,15
> 1500	1,10

Давление на грунт

$$p_c = \frac{P_z}{F_c}. \quad (9)$$

Воспользовавшись формулами (6), (8) и (9) можно рассчитать давление на грунт. Оно не должно превышать нормируемого значения, ограничиваемого условиями сохранности агрофизических свойств грунта. В случае превышения указанного значения, требуется выбирать шину с меньшей нормальной жесткостью.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и реализована методика расчета нормальной жесткости и параметров пятна контакта для шин сверхнизкого давления: длины контакта, контурной площади и давления в контакте. Методика является универсальной для всех шин сверхнизкого давления.
2. Получена расчетно-экспериментальная зависимость для определения нормальной жесткости шин сверхнизкого давления, в том числе, при возможном наклоне оси вращения колеса. Зависимость учитывает давление в шине, нормальную нагрузку на колесо, угол наклона оси вращения и геометрические характеристики шины: высоту и ширину профиля. В полученном выражении три безразмерных

коэффициента являются функциями отношения высоты и ширины профиля шины.

3. Получена универсальная расчетно-экспериментальная зависимость для определения контурной площади пятна контакта шины сверхнизкого давления. Зависимость позволяет рассчитывать текущее давление на грунт, которое не должно превышать нормируемой величины.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. *Е.В. Балакина* — разработка концепции, разработка теоретической методик, общее руководство теоретическими исследованиями, подготовка статьи; *З.А. Годжаев* — разработка концепции, разработка экспериментальной методик, общее руководство экспериментальными исследованиями, подготовка статьи; *А.А. Коньшин* — обработка результатов экспериментов, теоретические расчеты, подготовка статьи; *М.С. Кочетов* — участие в получении формулы (5), библиографический поиск, подготовка статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00004, <https://rscf.ru/project/23-21-00004/>.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors contribution. *E.V. Balakina* — concept development, development of a theoretical methodology, general management of theoretical research, writing the text of the manuscript; *Z.A. Godzhaev* — concept development, development of an experimental methodology, general management of experimental studies, writing the text of the manuscript; *A.A. Konshin* — processing of experimental results, theoretical calculations, writing the text of the manuscript; *M.S. Kochetov* — participation in obtaining the formula (5), search for publications, writing the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest.

Funding source. The study was supported by the grant from the Russian Science Foundation № 23-21-00004, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pacejka H.B. *Tire and Vehicle Dynamics*. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8
2. Тарасик В.П. *Теория движения автомобиля*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022.
3. Балакина Е.В., Кочетков А.В. *Коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием*. М.: Инновационное машиностроение, 2017.
4. Brunotte J., Lorenz M. *Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Wunschraum oder bereits Realität?* // Tagungsband „Jahr des Bodens“. Würzburg: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2015. P. 11–17. Дата обращения: 24.01.2022. Режим доступа: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/jahr-des-bodens-2015_tagung_tagungsband.pdf
5. Прядкин В.И., Шапиро В.Я., Годжаев З.А. и др. *Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления*. Воронеж: Изд-во ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2019.
6. Годжаев З.А., Гончаренко С.В., Артёмов А.В. и др. *Расчетно-экспериментальная оценка воздействия на почву шин сверхнизкого давления мобильных энергосредств* // Тракторы и сельхозмашины. 2020. Т. 87, № 3. С. 35–47. doi: 10.31992/0321-4443-2020-3-35-47
7. Ревенко В.Ю., Годжаев З.А., Русанов А.В. *Методы оценки площади контакта колесных движителей с опорным основанием* // Тракторы и сельхозмашины. 2019. Т. 86, № 5. С. 48–54. doi: 10.31992/0321-4443-2019-5-48-54
8. Leiva-Villacorta F., Vargas-Nordbeck A., Aguiar-Moya J.P. et al. *Influence of Tire Footprint Area and Pressure Distribution on Pavement Responses* // *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*. Cham: Springer, 2016. P. 685–700. doi: 10.1007/978-3-319-42797-3_45
9. Minca C. *The determination and analysis of tire contact surface geometric parameters* // *Review of the Air Force Academy*. 2015. Vol. 13, N 1(28). P. 149–154. Дата обращения: 24.01.2022. Режим доступа: https://www.afahc.ro/ro/revista/2015_1/149.pdf
10. Ivanov V. *Analysis of tire contact parameters using visual processing* // *Advances in Tribology*. 2010. Vol. 2010. P. 491723. doi: 10.1155/2010/491723
11. Котляренко В.И., Гончаренко С.В., Годжаев З.А. и др. *Шина сверхнизкого давления – оптимальный движитель для транспортных средств на слабонесущих грунтах* // Тракторы и сельхозмашины. 2014. Т. 81, № 2. С. 17–21. doi: 10.17816/0321-4443-65619
12. Шапиро В.Я., Дмитриев В.Н., Годжаев З.А. и др. *Исследование шин сверхнизкого давления для снегоболотоходов* // Труды НАМИ. 2009. № 241. С. 123–131.
13. Balakina E.V., Zadvornov V.N., Sarbaev D.S. et al. *The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface* // *IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng.* 2019. Vol. 632. doi: 10.1088/1757-899X/632/1/012022
14. Khaleghian S., Ghasemalizadeh O., Taheri S. *Estimation of the tire contact patch length and normal load using intelligent tires and its application in small ground robot to estimate the tire-road friction* // *Tire Science and Technology*. 2016. Vol. 44, N 4. P. 248–261. Дата обращения: 24.01.2022. Режим доступа: <http://hdl.handle.net/10919/75187>
15. Tomaraee P., Mardani A., Mohebbi A., et al. *Relationships among the contact patch length and width, the tire deflection and the rolling resistance of a free-running wheel in a soil bin facility* // *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2015. Vol. 13, N 2. doi: 10.5424/sjar/2015132-5245
16. Гончаренко С.В., Годжаев З.А., Артёмов А.В. и др. *Упругие характеристики шины сверхнизкого давления. Вертикальные нагрузки* // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 8. С. 18–21.
17. Гончаренко, С.В. *Упругие характеристики шины сверхнизкого давления. боковые и тангенциальные нагрузки* / С.В. Гончаренко, З.А. Годжаев, В.И. Прядкин и др. // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 10. С. 32–36.
18. Кристальный С.Р., Балакина Е.В., Попов Н.В. *Трение в контакте ошипованного колеса с твердой обледенелой опорной поверхностью* // *Трение и износ*. 2022. Т. 43, №1. С. 92–104. doi: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104
19. Балакина Е.В., Задворнов В.Н., Березовский М.С. и др. *Исследование коэффициентов жёсткости шин. Коэффициент радиальной жёсткости* // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 8. С. 7–10.
20. Балакина Е.В., Задворнов В.Н., Березовский М.С. и др. *Исследование коэффициентов жёсткости шин. Коэффициент боковой жёсткости* // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 9. С. 18–20.
21. Сальников В.И., Барашков А.А., Задворнов В.Н. и др. *Расчетно-экспериментальные универсальные зависимости для определения радиальной жесткости шин* // *Автомобильная промышленность*. 2014. № 7. С. 13–14.
22. Задворнов В.Н., Балакина Е.В., Мищенко Н.А. *Прогнозирование износа протектора по жесткостным характеристикам шин* // *Трение и износ*. 2020. Т. 41, №4. С. 485–490.

REFERENCES

1. Pacejka HB. *Tire and Vehicle Dynamics*. Waltham: Butterworth-Heinemann; 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8
2. Tarasik VP. The theory of car movement. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2022. (in Russ).
3. Balakina EV, Kochetkov AV. Coefficient of adhesion of the tire to the road surface. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie; 2017. (in Russ).
4. Brunotte J, Lorenz M. Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Wunschtraum oder bereits Realität? In: *Tagungsband „Jahr des Bodens“*. Würzburg: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2015. P. 11–17. Accessed: 24.01.2022. Available from: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/jahr-des-bodens-2015_tagung_tagungsband.pdf
5. Pryadkin VI, Shapiro VYa, Godzhaev ZA, et al. *Transport and technological means on tires of ultra-low pressure*. Voronezh: IZD-VO VGLTU im. G.F. Morozova; 2019. (in Russ).
6. Godzhaev ZA, Goncharenko SV, Artyomov AV. Calculation and experimental assessment of the impact on the soil of tires of ultra-low pressure of mobile power equipment. *Tractors and agricultural machinery*. 2020;87(3):35–47. (in Russ). doi: 10.31992/0321-4443-2020-3-35-47
7. Revenko VYu, Godzhaev ZA, Rusanov AV. Methods for estimating the contact area of wheel propellers with a support base. *Tractors and agricultural machinery*. 2019;86(5):48–54. (in Russ). doi: 10.31992/0321-4443-2019-5-48-54
8. Leiva-Villacorta F, Vargas-Nordbeck A, Aguiar-Moya JP, et al. Influence of Tire Footprint Area and Pressure Distribution on Pavement Responses. In: *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*. Cham: Springer; 2016:685–700. doi: 10.1007/978-3-319-42797-3_45
9. Minca C. The determination and analysis of tire contact surface geometric parameters. *Review of the Air Force Academy*. 2015;13(1(28)):149–154. Accessed: 24.01.2022. Available from: https://www.afahc.ro/ro/revista/2015_1/149.pdf
10. Ivanov V. Analysis of tire contact parameters using visual processing. *Advances in Tribology*. 2010. Vol. 2010. P. 491723. doi: 10.1155/2010/491723
11. Kotlyarenko VI, Goncharenko SV, Godzhaev ZA, et al. Ultra-low pressure tire – the optimal propulsion vehicle for vehicles on weakly bearing soils. *Tractors and agricultural machinery*. 2014;81(2):17–21. (in Russ). doi: 10.17816/0321-4443-65619
12. Shapiro VYa, Dmitriev VN, Godzhaev ZA, et al. Study of ultra-low pressure tires for snow and swamp vehicles. *Trudy NAMI*. 2009;241:123–131. (in Russ).
13. Balakina EV, Zadvornov VN, Sarbaev DS, et al. The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface. *IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng.* 2019;632. doi: 10.1088/1757-899X/632/1/012022
14. Khaleghian S, Ghasemalizadeh O, Taheri S. Estimation of the tire contact patch length and normal load using intelligent tires and its application in small ground robot to estimate the tire-road friction. *Tire Science and Technology*. 2016;44(4):248–261. Accessed: 24.01.2022. Available from: <http://hdl.handle.net/10919/75187>
15. Tomaraee P, Mardani A, Mohebbi A, et al. Relationships among the contact patch length and width, the tire deflection and the rolling resistance of a free-running wheel in a soil bin facility. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2015;13(2). doi: 10.5424/sjar/2015132-5245
16. Goncharenko SV, Godzhaev ZA, Artyomov AV, et al. Elastic characteristics of ultra-low pressure tires. Vertical loads. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;8:18–21. (in Russ).
17. Goncharenko SV, Godzhaev ZA, Pryadkin VI, et al. Elastic characteristics of ultra-low pressure tires. lateral and tangential loads. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;10:32–36. (in Russ).
18. Kristalny SR, Balakina EV, Popov NV. Friction in contact of a studded wheel with a hard icy bearing surface. *Journal of Friction and wear*. 2022;43(1):92–104. (in Russ). doi: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104
19. Balakina EV, Zadvornov VN, Berezovsky MS, et al. Investigation of tire stiffness coefficients. Radial stiffness coefficient. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;8:7–10. (in Russ).
20. Balakina EV, Zadvornov VN, Berezovsky MS, et al. Investigation of tire stiffness coefficients. Lateral stiffness coefficient. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;9:18–20. (in Russ).
21. Salnikov VI, Barashkov AA, Zadvornov VN, et al. Calculation and experimental universal dependences for determining the radial stiffness of tires. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2014;7:13–14. (in Russ).
22. Zadvornov VN, Balakina EV, Mishchenkov NA. Predicting tread wear from tire stiffness. *Journal of Friction and wear*. 2020;41(4):485–490. (in Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Балакина Екатерина Викторовна,**

д-р техн. наук,
профессор кафедры «Техническая эксплуатация
и ремонт автомобилей»;
адрес: Российская Федерация, 400005, Волгоград,
пр. Ленина, д. 28;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>;
eLibrary SPIN: 2595-2802;
e-mail: fahrgestell@yandex.ru

Годжаев Захид Адыгезалович,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук;
заместитель директора по инновационной
и внедренческой деятельности;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

Коньшин Александр Александрович,

аспирант кафедры «Техническая эксплуатация
и ремонт автомобилей»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7786-5913>;
eLibrary SPIN: 3503-9285;
e-mail: alex.tiger.vd.1999@gmail.com

Кочетов Михаил Сергеевич,

н.с. кафедры «Техническая эксплуатация
и ремонт автомобилей»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-6890>;
eLibrary SPIN: 9405-4356;
e-mail: kochetov_m.s.1995@mail.ru

*Автор для переписки

AUTHORS' INFO

***Ekaterina V. Balakina,**

Dr. Sci (Tech.),
Professor of the Technical Operation and Maintenance
of Vehicles Department;
address: 28 Lenin avenue, 400005 Volgograd,
Russian Federation;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>;
eLibrary SPIN: 2595-2802;
e-mail: fahrgestell@yandex.ru

Zahid A. Godzhaev,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Tech.),
Deputy Director for Innovational and Implemental Activities;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

Alexander A. Konshin,

postgraduate student of the Technical Operation
and Maintenance of Vehicles Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7786-5913>;
eLibrary SPIN: 3503-9285;
e-mail: alex.tiger.vd.1999@gmail.com

Mikhail S. Kochetov,

Researcher of the Technical Operation and Maintenance
of Vehicles Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-6890>;
eLibrary SPIN: 9405-4356;
e-mail: kochetov_m.s.1995@mail.ru

*Corresponding author