

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ШИНАМИ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДАТЛИВУЮ ОПОРНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

*Балакина Е.В., Коньшин А.А., Коньшин В.А.*

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

**Ключевые слова:** шина сверхнизкого давления, податливая опорная поверхность, нормальная жесткость шины, разработка методики расчета.

**Аннотация.** Взаимодействие шины транспортного средства как с твердой, так и с податливой опорной поверхностью, может повлиять на безопасность движения транспорта, на сохранность дорожных одежд и (или) на его способность передвигаться по разным типам поверхностей. Для транспортных машин, передвигающихся вне твердых дорог, важно не погрузиться в мягкий грунт или рыхлый снег. В сельском хозяйстве, например, нежелательно чрезмерное уплотнение почвы. Поэтому при проектировании машин и прицепов важно учитывать давление, которое они будут оказывать на опорную поверхность. Но без знания геометрических характеристик пятна контакта шин с поверхностью, таких как площадь и длина, рассчитать этот параметр невозможно. Он зависит от деформации шины, которая в свою очередь определяется нагрузкой на неё. Упругие свойства шин сверхнизкого давления являются недостаточно изученными. Какие-либо зависимости для их описания на сегодняшний день отсутствуют. Это не обеспечивает возможности корректного проектного расчета воздействия таких шин на грунт. Цель исследования – разработка и программная реализация универсальной методики расчета воздействия на почву транспортного средства на шинах сверхнизкого давления. Разработана универсальная методика расчета воздействия на податливую опорную поверхность техники на шинах сверхнизкого давления. Получена универсальная расчетно-экспериментальная зависимость для определения нормальной жесткости шин сверхнизкого давления. Она учитывает давление в шине, нормальную нагрузку в конкретных условиях и геометрические характеристики.

## MODELING THE IMPACT OF A VEHICLE WITH ULTRA-LOW PRESSURE TIRES ON A SOFT SUPPORT SURFACE

*Balakina E.V., Konshin A.A., Konshin V.A.*

*Volgograd State Technical University, Volgograd*

**Keywords:** ultra-low-pressure tire, soft support surface, normal tire stiffness, development of calculation method.

**Abstract.** The interaction of a vehicle tire with both a hard and soft supporting surface can affect vehicle safety, the safety of road surfaces and (or) its ability to move on different types of surfaces. For vehicles not traveling on hard roads, it is important not to sink into soft ground or friable snow. In agriculture, for example, excessive soil compaction is undesirable. Therefore, when designing machines and trailers, it is important to consider the pressure they will exert on the supporting surface. But without knowing the geometric characteristics of the tire contact patch with the surface, such as area and length, it is impossible to calculate this parameter. It depends on the tire deformation, which in turn is determined by the load on it. The elastic properties of ultra-low-pressure tires have not been sufficiently studied. There are currently no dependencies to describe them. This does not provide the possibility of a correct design calculation of the impact of such tires on the ground. The purpose of the study is the development and software implementation of a universal method for calculating the impact on the soil of vehicles on ultra-low-pressure tires. A universal method has been developed for calculating the impact on the pliant supporting surface of vehicles on ultra-low-pressure tires. A universal calculation-experimental dependence has been obtained to determine the normal stiffness of ultra-low-pressure tires. It takes into account tire pressure, normal load in specific conditions and geometric characteristics.

### Введение

Воздействие шин на деформируемую опорную поверхность определяет способность транспортного средства (ТС) двигаться, а также влияет на уплотнение почвы, что может быть нежелательным в сельском хозяйстве [1-5]. Сельскохозяйственное ТС не должно создавать чрезмерного давления на почву. ТС высокой проходимости не должны погружаться в мягкий грунт или рыхлый снег. Поэтому при проектном моделировании движения в таких случаях важно рассчитать определенный параметр. Этот параметр невозможно рассчитать, не зная

геометрических характеристик пятна контакта [6-9], он зависит от нормальной деформации шины при нормальной нагрузке. Чтобы рассчитать эти характеристики, необходимо иметь универсальные зависимости для определения нормальной жесткости шины. Такие зависимости существуют для шин различного назначения [10-13]. Однако упругие свойства шин сверхнизкого давления остаются малоизученными. В настоящее время не существует универсальных зависимостей для их описания. Это не дает возможности корректного расчета влияния таких шин на почву.

Цель исследования – разработка и программная реализация универсальной методики расчета воздействия на почву ТС на шинах сверхнизкого давления.

### Методика исследований

В работе были исследованы шины сверхнизкого давления. В ходе исследования измерялись их нагрузочные характеристики при разном давлении  $p$  в шинах. После этого они приняли вид пары экспериментальных точек ( $P_z; Z$ ), где  $P_z$  – нормальная нагрузка на шину, а  $Z$  – нормальная деформация шины. Затем после аппроксимирования были получены и построены экспериментальные зависимости  $P_z = f(Z)$ .

Полученные зависимости для одной из шин представлены графически на рисунке 1.

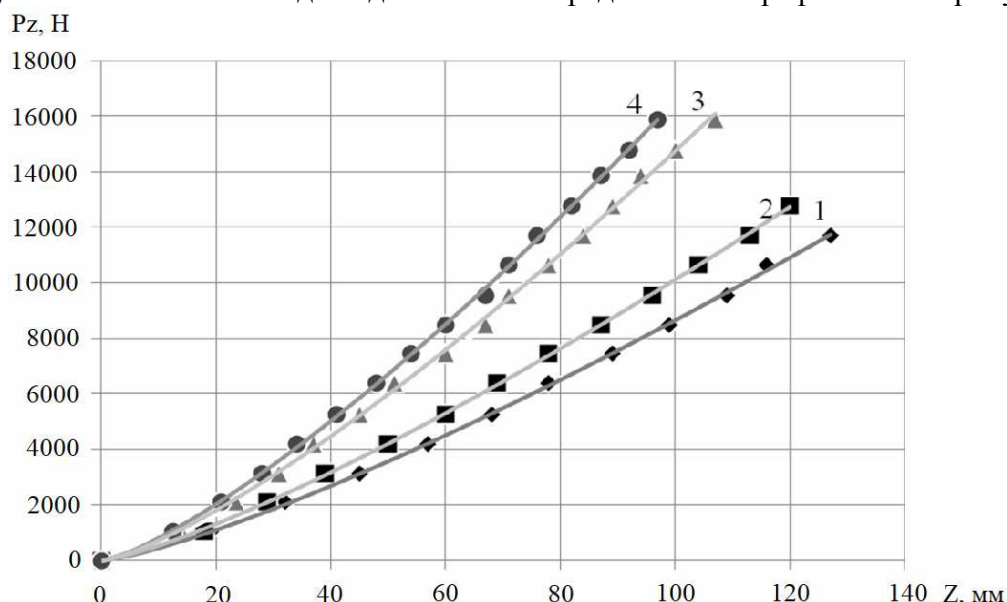


Рис. 1. Пример аппроксимации экспериментальных нагрузочных характеристик шины сверхнизкого давления 49x23,5-21LT: 1 –  $p = 15$  кПа; 2 –  $p = 20$  кПа; 3 –  $p = 35$  кПа; 4 –  $p = 40$  кПа

Предлагается методика определения коэффициента нормальной жесткости по экспериментальным нагрузочным характеристикам  $P_z = f(Z)$  для различных шин сверхнизкого давления.

Во-первых, необходимо провести для каждой из шин аппроксимацию экспериментальных характеристик  $P_z = f(Z)$  с помощью функций одинакового вида для каждого давления  $p_i$ . В итоге для каждой из шин появится набор функций вида  $P_z = a_i \cdot Z^{b_i}$  для каждого  $p_i$  внутри неё. Здесь  $a_i, b_i$  – постоянные коэффициенты, полученные при аппроксимации.

Во-вторых, необходима аппроксимация зависимости полученных коэффициентов  $a$  и  $b$  от давления  $p$  в шине для каждой из них. В результате будут получены дополнительные функции для каждой шины:  $a = f(p)$  и  $b = f(p)$ .

Они имеют вид:

$$a = k_1 \cdot p; b \approx const.$$

В результате ранее полученная функция преобразована в другой вид:

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

В-третьих, дифференцирование формулы нормальной нагрузки по нормальному прогибу, позволяет получить выражение для нормальной жесткости шины сверхнизкого давления:

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

Введение новых обозначений  $k_0 = k_1 \cdot b$ ;  $d = b - 1$  дает новое выражение:

$$C_{tz} = k_0 \cdot p \cdot Z^d, \tag{1}$$

где  $k_0 = k_1 \cdot b$ ;  $d = b - 1$ .

Графический пример расчёта нормальной жесткости приведен на рисунке 2.

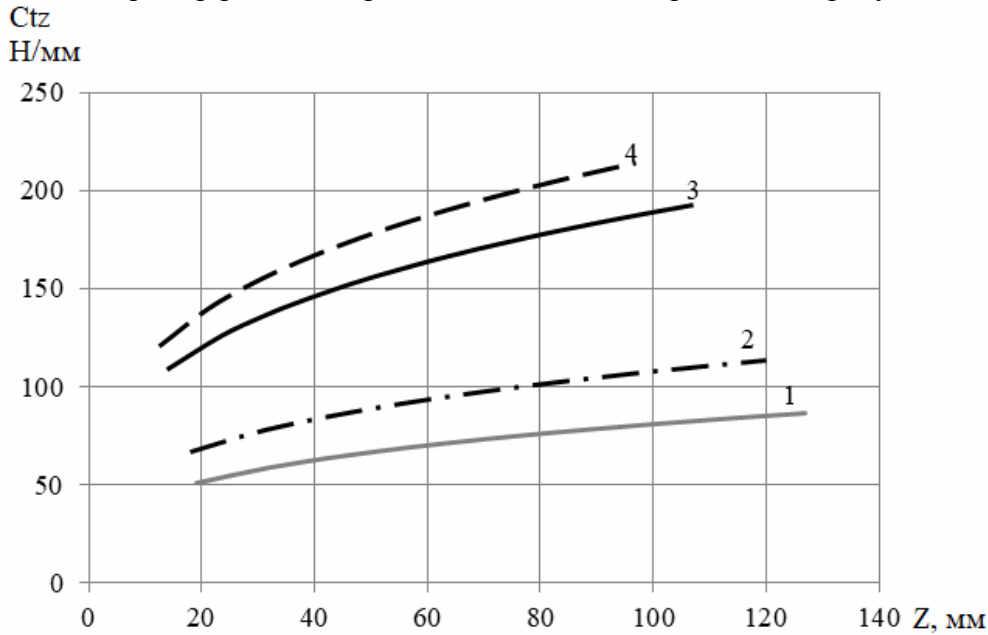


Рис. 2. Графический пример расчёта коэффициента нормальной жесткости шины сверхнизкого давления 49x23,5-21LT: 1 –  $p = 15$  кПа; 2 –  $p = 20$  кПа; 3 –  $p = 35$  кПа; 4 –  $p = 40$  кПа

В-четвертых, для упрощения расчётов, необходимо избавиться от неизвестного значения  $Z$  из правой части уравнения.

$$C_{tz} = k_0 \cdot p \cdot Z^d;$$

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

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

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

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

Введем замену

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

$$n_1 = \frac{1}{1+d} = \frac{1}{b}; \quad n_2 = \frac{d}{1+d} = \frac{b-1}{b}.$$

В результате выражение (1) примет общий вид

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

где  $k, n_1, n_2$  – постоянные коэффициенты, обусловленные конструкцией шины.

Избавившись от неизвестной величины нормального прогиба  $Z$  в формуле (1) в выражении теперь присутствуют известные условия, не требующие дополнительных измерений.

В-пятых, необходимо получить универсальную зависимость для определения коэффициента нормальной жесткости шины сверхнизкого давления. Приведены геометрические характеристики шин сверхнизкого давления и полученные постоянные коэффициенты уравнения для расчета нормальной жесткости (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики шины и полученные коэффициенты

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

Были выявлены взаимосвязи постоянных коэффициенты  $k, n_1, n_2$  с отношением высоты к ширине шин:

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

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

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

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

Аппроксимация указанных зависимостей позволила получить следующую систему универсальных коэффициентов:

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

Теперь возможно рассчитать нормальную жёсткость шины сверхнизкого давления по выражению  $C_{zr} = k \cdot p^n \cdot P_z^{n_2}$ , используя вычисленные коэффициенты  $k, n_1, n_2$  для шины с определенным соотношением  $\frac{H_t}{B_t}$ .

## Результаты и обсуждение

Для определения нормальной жесткости шин сверхнизкого давления была получена расчетно-экспериментальная зависимость (2). Она учитывает геометрические характеристики шин, давление внутри, нормальную нагрузку при определенных условиях. Коэффициенты

$k, n_1, n_2$  участвующие при расчёте вычисляются по выражению (3) и являются функциями от отношения геометрических характеристик профиля  $\left(\frac{H_t}{B_t}\right)$ .

Используя зависимости (2) и (3) возможно определять геометрические характеристики пятна контакта, нормальную деформацию, а также давление на грунт.

К примеру, длину пятна контакта можно рассчитать [10] по расчетно-экспериментальной зависимости

$$l_c = 2 \cdot k_l \sqrt{Z \cdot (2R_0 - Z)}, \quad (4)$$

где  $k_l$  – экспериментальный коэффициент уменьшения длины пятна контакта, рассчитанной по формуле Хедэкеля ( $k_l = 0,6$  для низкопрофильных шин и  $0,7$  – для всех остальных).

Эта формула справедлива при паспортном давлении в шине или отличающемся от него не более чем на 20%.

### Выводы

Разработанная расчетно-экспериментальная зависимость позволяет определить нормальную жесткость шин сверхнизкого давления без проведения натурального эксперимента. Для расчета необходимы лишь известные параметры, а именно давление внутри шины, нормальная нагрузка на неё и геометрические характеристики.

Создана универсальная методика расчета воздействия на почву ТС с шинами сверхнизкого давления. Имеется ее программная реализация в среде Excel.

### Список литературы

1. Балабин И.В., Путин В.А., Чабунин И.С. Автомобильные и тракторные колеса и шины – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – 920 с.
2. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
3. Расајка Н.В. Tire and Vehicle Dynamics. – Published by Elsevier Ltd, USA, 2012. – 672 p.
4. Балакина Е.В., Кочетков А.В. Коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 292 с.
5. Прядкин В.И., Шапиро В.Я., Годжаев З.А., Гончаренко С.В. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2019. – 492 с.
6. Котляренко В.И., Гончаренко С.В., Годжаев З.А. Шина сверхнизкого давления – оптимальный движитель для транспортных средств на слабонесущих грунтах // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 2. – С. 17-21.
7. Годжаев З.А., Гончаренко С.В., Артемов А.В., Прядкин В.И., Годжаев Т.З. 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.
8. 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.
9. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Прядкин В.И. Выбор параметров шин сверхнизкого давления для мобильных средств химизации // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 14-17.
10. Balakina E.V., Zadvornov V.N., Sarbaev D.S., Sergienko I.V., Kozlov Yu.N. The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 632, p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012022.
11. Балакина Е.В., Задворнов В.Н., Березовский М.С., Блажинский В.Р., Коньшин А.А., Юсупкина А.С. Исследование коэффициентов жёсткости шин. Коэффициент боковой жёсткости // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 9. – С. 18-20.
12. 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.org/10.17816/0321-4443-133657.
13. 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. Balabin I.V. Putin V.A., Chabunin I.S. Automobile and tractor wheels and tires – М.: MSTU "MAMI", 2012. – 920 p.
2. Tarasik V.P. Motoring theory. – SPb.: BHV-Petersburg, 2022. – 576 p.

3. Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics. – Published by Elsevier Ltd, USA, 2012. – 672 p.
4. Balakina E.V., Kochetkov A.V. The coefficient of adhesion of the tire to the road surface – M.: Innovative Engineering, 2017. – 292 p.
5. Pryadkin V.I., Shapiro V.Ya., Godzhaev Z.A., Goncharenko S.V. Transport and technological means on ultra-low pressure tires – Voronezh: Publ. house of the Voronezh State Forestry University n.a. G.F. Morozov, 2019. – 492 p.
6. Kotlyarenko V.I., Goncharenko S.V., Godzhaev Z.A. Ultra-low pressure tire – optimal propulsion for vehicles on low-bearing soils // Tractors and agricultural machines. 2014, no. 2, pp. 17-21.
7. Godzhaev Z.A., Goncharenko S.V., Artyomov A.V., Pryadkin V.I., Godzhaev T.Z. Computational and experimental assessment of the impact of ultra-low pressure tires of mobile power facilities on soil // Tractors and agricultural machinery. 2020, vol. 87, no. 3, pp. 35-47. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-3-35-47.
8. Revenko V.Yu., Godzhaev Z.A., Rusanov A.V. Methods for estimating the contact area of wheel propellers with a support base // Tractors and agricultural machinery. 2019, vol. 86, no. 5, pp. 48-54. DOI: 10.31992/0321-4443-2019-5-48-54.
9. Godzhaev Z.A., Izmailov A.Yu., Pryadkin V.I. The choice of parameters of ultra-low pressure tires for mobile means of chemicalization // Tractors and agricultural machines. 2014, no. 4, pp. 14-17.
10. Balakina E.V., Zadvornov V.N., Sarbaev D.S., Sergienko I.V. Kozlov Yu.N. The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 632, p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012022.
11. Balakina E.V., Zadvornov V.N., Berezovsky M.S., Blazhinsky V.R., Konshin A.A., Yusupkina A.S. Investigation of tire stiffness coefficients. Coefficient of lateral stiffness // Automotive industry. 2020, no. 9, pp.18-20.
12. Balakina E.V., Godzhaev Z.A., Konshin A.A., Kochetov M.S. Calculation of normal stiffness and parameters of contact spots of ultra-low pressure tires for agricultural machinery // Tractors and agricultural machinery. 2023, vol. 90, no. 1, pp. 49-58. doi.org/10.17816/0321-4443-133657.
13. Zadvornov V.N., Balakina E.V., Mishchenkov N.A. Forecasting tread wear by the stiffness characteristics of tires // Friction and wear. 2020, vol. 41, no. 4, pp. 485-490.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Балакина Екатерина Викторовна</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей»	<b>Balakina Ekaterina Viktorovna</b> – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department «Technical operation and car repairs»
<b>Коньшин Александр Александрович</b> – аспирант	<b>Konshin Aleksandr Aleksandrovich</b> – postgraduate student
<b>Коньшин Владимир Александрович</b> – бакалавр alex.tiger.vd.1999@gmail.com	<b>Konshin Vladimir Aleksandrovich</b> – bachelor's degree

*Получена 11.04.2024*