

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>

Оригинальное исследование



# Методика рационального выбора комплекта пневматических шин для сельскохозяйственного трактора

Н.Л. Анисимов<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Петербургский тракторный завод, Санкт-Петербург, Российская Федерация<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Методика рационального выбора комплекта шин для сельскохозяйственного трактора является инструментом, позволяющим сравнить и выбрать комплект шин с лучшими характеристиками, анализировать особенности взаимодействия колесного движителя с почвой, оценивать целесообразность установки предлагаемого комплекта шин и выявлять пути совершенствования конструкции трактора. Актуальность выбора оптимального комплекта шин для машин, работающих в сельском хозяйстве, обусловлена уплотнением почвы ходовыми системами, ведущим к изменению ее структуры и снижению урожайности сельскохозяйственных культур, а также низкими тягово-сцепными показателями, что повышает расход топлива, снижает производительность и ускоряет износ шин при движении по мягким грунтам с буксованием колес.

**Цель работы.** Целью исследования является повышение эффективности работы сельскохозяйственного трактора в составе машинно-тракторного агрегата с комплектом пневматических шин, выбранных по разработанной методике. Предмет исследования – влияние конструктивных характеристик шин на эксплуатационные показатели трактора.

**Материалы и методы.** В работе представлена методика, позволяющая выбрать пневматические шины из широкой номенклатуры разных моделей и производителей по известным и доступным техническим характеристикам, для вновь проектируемого или модернизируемого сельскохозяйственного трактора. Отличительной особенностью методики является получение обобщенного показателя работы трактора и сравнение по нему колесного движителя с разными шинами вместо сравнения по отдельно взятым показателям. В расчете используются пневматические шины ведущих колес разных типоразмеров и технических характеристик для колесного полноприводного трактора общего назначения. Методика включает аналитическое определение агротехнического, технического, технико-экономического эксплуатационных показателей трактора и экономическую составляющую: максимальное давление на почву; угол поперечной статической устойчивости трактора; коэффициент буксования; стоимость комплекта шин. По расчетным показателям и стоимости шин определяется обобщенный параметр методом Харрингтона, по которому выбирается комплект пневматических шин.

**Результаты.** В результате применения методики определен комплект шин для сельскохозяйственного трактора серии К-7М «Кировец»: 710/70R42 с учетом основных эксплуатационных показателей трактора и 710/70R38 с учетом основных эксплуатационных показателей трактора, а также учитывая стоимость шин.

**Заключение.** Предложенная методика рационального выбора комплекта шин позволяет выбрать комплект шин с лучшим сочетанием эксплуатационных показателей при проектировании новых моделей или модернизации серийных сельскохозяйственных тракторов, провести оценку ходовой системы и выявить пути совершенствования конструкции.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственный трактор; оптимальный комплект пневматических шин; методика выбора пневматических шин; модели взаимодействия шины с почвой.

## Для цитирования:

Анисимов Н.Л. Методика рационального выбора комплекта пневматических шин для сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 6. С. 421–429. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>

Рукопись получена: 24.07.2022

Рукопись одобрена: 17.08.2022

Опубликована: 15.12.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>

Original Study Article

# The method of reasonable selection of a pneumatic tire set for an agricultural tractor

Nikolay L. Anisimov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Petersburg Tractor Plant, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The method of reasonable selection of an agricultural tractor tire set is a tool to compare and choose a tire set with the best properties, to analyze the features of tire-soil interaction, to evaluate the feasibility of installing the proposed tire set and to identify ways of tractor design improvement. The relevance of tire set optimal selection for vehicles operating in agriculture is related to the soil compaction by chassis that lead to a change of its structure and agricultural yield reduction. In addition, it is related to low traction properties which increases fuel consumption, reduces performance and accelerate tire wear during operation on soft soils with wheel slip.

**AIMS:** The aim of the study is to increase the operation efficiency of an agriculture tractor as part of a machine-tractor unit with the pneumatic tire set selected with the developed method. The research subject is the influence of tire design properties on the tractor operational indicators.

**METHODS:** The article presents the method that allows to choose pneumatic tires from a wide range of different models and manufactures according to known and available technical properties for a newly-developed or modified agricultural tractor. A specific feature of method is determination of a generalized parameter of tractor operation and using it for comparison of different tires instead of using individual indicators. Driving wheels pneumatic tires of different sizes and properties for a four-wheel drive general purpose tractor are used in calculation. The method includes analytical determination of agrotechnical, technical, technical-and-economic operational indicators of tractor as well as economic components such as: maximum pressure on soil; a transverse static stability angle of a tractor, a slipping ratio, tire set cost. According to the calculated indicators and tire set cost, a generalized parameter is determined with the Harrington method and used for selection of pneumatic tire set.

**RESULTS:** As a result of the method application, tire sets for the K-7M "Kirovets" agricultural tractor were determined such as: the 710/70R42 tires regarding the main operational indicators of the tractor and the 710/70R38 tires regarding the main operational indicators of the tractor and tire set cost.

**CONCLUSIONS:** The given method can be proposed to tractor manufactures for tire set selection, chassis evaluation and identification of ways of design improvement.

**Keywords:** *agricultural tractor; optimal pneumatic tire set; pneumatic tire selection method; tire-soil interaction models.*

## Cite as:

Anisimov NL. The method of reasonable selection of a pneumatic tire set for an agricultural tractor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6):421–429. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109895>

Received: 24.07.2022

Accepted: 17.08.2022

Published: 15.12.2022

## ВВЕДЕНИЕ

На ведущие колеса сельскохозяйственных тракторов устанавливаются шины низкого давления с рисунком протектора повышенной проходимости R1, R1-W, R2 (в соответствии с международной классификацией *Tire and Rim Association*). В последние годы в сельскохозяйственной отрасли все более широкое распространение находят радиальные шины. В сравнении с шинами диагональной конструкции радиальные обладают большей эластичностью, создают большую опорную поверхность в пятне контакта с почвой, меньшую глубину колеи и плечо приложения нормальной реакции. Поэтому коэффициент сопротивления качению радиальной шины на сельскохозяйственных фонах меньше, чем диагональной [1]. Кроме того, благодаря большему пятну контакта снижается давление на почву, улучшая экологическую совместимость и повышаются тягово-сцепные свойства трактора.

Комплектация колесной техники рациональным комплектом пневматических шин имеет важное значение, позволяя улучшить эксплуатационные показатели трактора. Актуальность выбора оптимального комплекта пневматических шин для машин, работающих в сельском хозяйстве, обусловлена уплотнением почвы ходовыми системами, ведущим к изменению ее структуры и снижению урожайности сельскохозяйственных культур, а также низкими тягово-сцепными показателями, что повышает расход топлива, снижает производительность и ускоряет износ шин при движении по мягким грунтам с буксованием колес. Для получения максимальной урожайности с наименьшими эксплуатационными расходами необходима сельскохозяйственная техника, обладающая высокими экологическими и тягово-экономическими свойствами, которые обеспечиваются в значительной степени характеристиками шин. Также при комплектации трактора необходимо учитывать стоимость комплекта шин, которая влияет на стоимость трактора.

Существуют несколько разных методов подбора тракторных шин. Шины выбираются по грузоподъемности с учетом рекомендуемого давления воздуха в ней [2]. В статье [3] представлена методика подбора шин для сельскохозяйственных тракторов и вездеходных транспортных средств по показателям уплотняющего воздействия, определенных по аналитическим зависимостям, при заданной нагрузке и максимальной скорости движения. Метод определения типоразмера шин в зависимости от тягового усилия с использованием номограммы описан автором в работе [4]. В книге [5] приведены формулы определения оценочных показателей работы колеса. Рассмотренные методы позволяют выбрать шины по одному или нескольким показателям. Выбор шин по одному критерию, а также по нескольким критериям одного аспекта, например, экологическая безопасность, не позволяет учесть многие другие особенности работы сельскохозяйственного трактора,

к которому предъявляются многочисленные требования. Сравнение каждого отдельного оценочного показателя из обширного перечня для нескольких рассматриваемых шин затрудняет выбор шины с наилучшим сочетанием характеристик.

Таким образом, необходима методика, позволяющая получить расчетным путем обобщенный показатель работы трактора с выбранными шинами, учитывая численные параметры, характеризующие особенности его работы.

**Целью исследования** является повышение эффективности работы сельскохозяйственного трактора в составе машинно-трактора агрегата за счет установки рационального комплекта пневматических шин. Для достижения указанной цели необходимо разработать методику, позволяющую определить обобщенный параметр на основе некоторых эксплуатационных показателей функционирования системы и сравнить по нему комплектации сельскохозяйственного трактора с различными вариантами шин вместо простого сравнения по отдельно взятым показателям. Одним из наиболее удобных способов выступает обобщенная функция желательности Харрингтона. Для определения обобщенного параметра эксплуатационные показатели могут быть рассчитаны по известным аналитическим зависимостям, представленным в данной работе, по полученным опытным путем или по результатам моделирования взаимодействия шины с почвой методом конечных элементов [6].

**Объектом исследования** является колесный движитель с шинами разных размерностей трактора серии К-7М «Кировец» производства АО «Петербургский тракторный завод». В качестве исходных данных используются геометрические и эксплуатационные характеристики шин, приведенные в табл. 1, теоретические данные о физико-механических свойствах опорного основания и технические характеристики трактора.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная методика представляет комплексный подход к выбору комплекта пневматических шин для сельскохозяйственного трактора. На начальном этапе определяются вертикальные нагрузки, действующие на колеса трактора. Затем по аналитическим зависимостям определяются агротехнический, технический, технико-экономический эксплуатационные показатели трактора и экономическая составляющая: максимальное давление на почву; угол поперечной статической устойчивости трактора; коэффициент буксования; стоимость комплекта шин. На основе расчетных эксплуатационных показателей и стоимости шин определяется обобщенный показатель с использованием функции желательности Харрингтона, по которому сравниваются рассматриваемые шины и выбирается рациональный комплект пневматических шин.

Согласно методике определения рационального комплекта шин, проведен расчет для сельскохозяйственного трактора К-7М "Кировец", предназначенного для выполнения следующих сельскохозяйственных работ: пахоты, боронования, культивации, посева, лущения, дискования, плантажа, снегозадержания, транспортных работ по полевым и грунтовым дорогам и дорогам с твердым покрытием. Основные технические характеристики рассматриваемого трактора: эксплуатационная масса 14000 кг; номинальная мощность двигателя 220 кВт при 1900 об/мин; номинальное тяговое усилие 50 кН. Конструктивными особенностями трактора являются шарнирно-сочлененная рама с четырьмя одинаковыми ведущими колесами. В табл. 1 указаны технические характеристики выбранных для расчета шин.

### Определение вертикальных нагрузок на колеса

При рассмотрении процесса взаимодействия пневматической шины с почвой необходимо определить вертикальные нагрузки, действующие на колеса трактора. Принимая, что трактор движется равномерно по горизонтальному полю с навесным сельскохозяйственным орудием

без воздействия воздушного сопротивления и динамический радиус колеса равен статическому  $r_{ст}$ , можно получить расчетную схему, представленную на рис. 1.

Обозначения на схеме:  $G_T$  – вес трактора, Н;  $P_{ном}$  – номинальное тяговое усилие, Н;  $P_{кр}$  – тяговое усилие на крюке, Н;  $\alpha$  – угол приложения  $P_{кр}$ ;  $P_y$  – вертикальная составляющая тягового усилия на крюке;  $N_1$  и  $N_2$  – нормальные реакции почвы на колесах передней и задней оси, Н;  $X_1$  и  $X_2$  – горизонтальные реакции почвы (толкаящая реакция) на колесах передней и задней оси, Н;  $r_{ст}$  – статический радиус колес, м;  $L$  – база трактора, м;  $l_1$  – расстояние от  $G_T$  до т.  $O_2$ ;  $l_2$  и  $l_3$  – расстояния от точки приложения тягового усилия до т.  $O_2$ , м.

Уравнение сил относительно оси  $y$ :

$$\sum F_y = N_1 + N_2 - G_T - P_{ном} \cdot \text{tg}(\alpha) = 0. \quad (1)$$

Уравнение моментов относительно т.  $O_2$ :

$$\sum M_{O_2} = G_T \cdot l_1 - N_1 \cdot L - P_{ном} \cdot l_2 - P_{кр} \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot l_3 - (N_1 - N_2) \cdot f \cdot r_{ст} = 0, \quad (2)$$

Таблица 1 Технические характеристики шин

Table 1. Tire technical properties

№ шины	Типоразмер	$D$ , м	$B$ , м	$r_{ст}$ , м	$d$ , дюйм	ИН	ИС
1	28,1 R26	1,735	0,718	0,785	26	158	A8
2	30.5 R32	1,830	0,775	0,830	32	172	A8
3	710/70R38	1,922	0,703	0,892	38	169	A8
4	710/70R42	2,055	0,740	0,936	42	176	D

Принятые обозначения в таблице 1:  $D$  – наружный диаметр шины;  $B$  – ширина профиля шины;  $r_{ст}$  – статический радиус шины;  $d$  – посадочный диаметр шины; ИН – индекс нагрузки; ИС – индекс скорости.

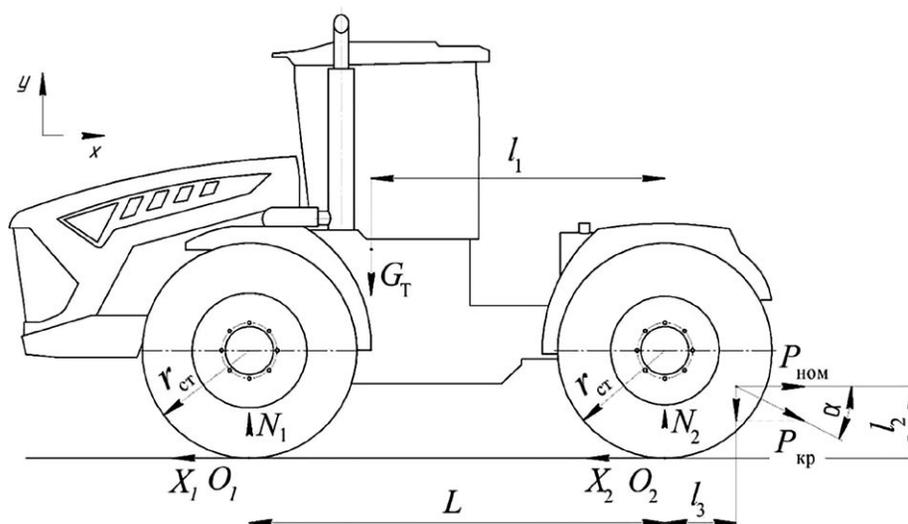


Рис. 1. Расчетная схема определения нормальных реакций опорной поверхности.

Fig. 1. Analytical scheme of normal forces determination.

где  $N_i \cdot f \cdot r_{ст}$  – момент сопротивления движению колес, Н·м.

Устанавливая на трактора колеса большего размера, необходимо иметь в виду, что увеличение ширины и диаметра колеса сопровождается увеличением его массы и, соответственно, веса трактора:

$$G_T = (m_{ТБК} + z \cdot m_K) \cdot g, \quad (3)$$

где  $m_{ТБК}$  – масса трактора без учета массы колес, кг;  $z$  – количество колес;  $m_K$  – масса колеса в сборе, кг. В случае отсутствия данных, массу колеса в сборе можно приближенно определить, используя уравнение [7]:

$$m_K(B, D) = -549,04 + 0,33 \cdot B + 0,39 \cdot D, \quad (4)$$

где  $B, D$  в мм.

Уравнения (1), (2) с учетом (3), (4) решаются относительно нормальных реакций почвы  $N_1$  и  $N_2$ . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

В дальнейших расчетах примем:  $G_{Ki} = N_i / 2$  – вертикальная нагрузка на опорное основание единичного колесного движителя  $i$  моста, Н.

### Статическая поперечная устойчивость от опрокидывания

Установка шины большей размерности на трактор приводит к увеличению высоты центра тяжести, что влияет на устойчивость. Опрокидывание трактора вследствие потери поперечной устойчивости происходит чаще, чем от потери продольной устойчивости [1]. В качестве оценочного показателя поперечной устойчивости трактора принимают предельный угол поперечной статической устойчивости  $\beta_{пред}$ , при котором трактор может стоять без опрокидывания.

На расчетной схеме (рис. 2) приняты следующие обозначения:  $G_T$  – вес трактора, Н;  $h_{ц.т.}$  – высота расположения центра тяжести трактора относительно почвы;  $B_K$  – колея передней и задней оси трактора;  $\beta_{пред}$  – угол поперечного уклона;  $r_{ст}$  – статический радиус колеса, м;  $e$  – боковое смещение центра тяжести, м.

Для случая, когда центр тяжести лежит на продольной плоскости трактора ( $e = 0$ ), формула выглядит:

$$\beta_{пред} = \arctg\left(\frac{B_K}{2 \cdot h_{ц.т.}}\right). \quad (5)$$

Для колесного трактора принимают, что точка возможного опрокидывания лежит на середине ширины профиля колеса т. О, как показано на рис. 2.

Анализируя формулу вычисления  $\beta_{пред}$  (5), можно отметить, что статическая поперечная устойчивость

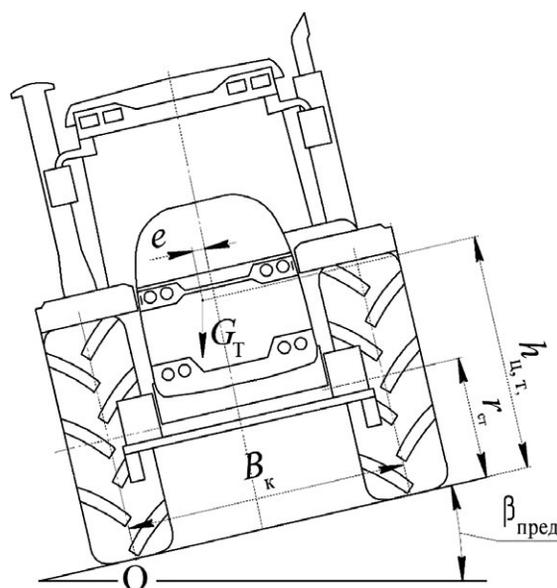


Рис. 2. Расчетная схема для определения предельного угла поперечной статической устойчивости.

Fig. 2. Analytical scheme of maximal transverse static stability angle.

трактора повышается при увеличении колеи  $B_K$  и снижении центра тяжести  $h_{ц.т.}$ . Результаты расчетов предельного статического угла по формуле (4) с принятыми допущениями приведены в табл. 2.

Согласно ГОСТ 12.2.019-2015 [8], угол поперечной статической устойчивости для тракторов тяговых классов 0,9 и более при транспортной комплектации и колее должен быть не менее 35 градусов.

### Максимальное давление колес на почву

Одним из общепринятых критериев оценки уплотняющего воздействия на почву ходовых систем является максимальное давление. Для определения максимального давления колесного движителя на почву можно использовать формулу [9], кПа:

$$q_{max} = q_{cp} \cdot K_2, \quad (6)$$

где  $K_2$  – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины,  $K_2 = 1,5$  [9];  $q_{cp}$  – среднее давление колесного движителя на почву, кПа:

$$q_{cp} = \frac{G_K}{F_{кп}}, \quad (7)$$

где  $G_K$  в кН;  $F_{кп}$  – площадь контакта шины с почвой, м<sup>2</sup>;

$$F_{кп} = F_K \cdot K_1, \quad (8)$$

где  $K_1$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса. Для шин с наружным диаметром

свыше 1,5 м коэффициент  $K_1 = 1,1$  [9];  $F_k$  – контурная площадь пятна контакта на жестком основании. Отпечаток пятна контакта представлен в форме эллипса:

$$F_k = \frac{\pi}{4} \cdot B_{\text{п}} \cdot L_{\text{п}}, \quad (9)$$

где  $B_{\text{п}}$  – ширина пятна контакта, м. Примем  $B_{\text{п}} = B$ ;  $L_{\text{п}}$  – длина пятна контакта на жестком основании, м.

Длина контакта шины на жестком опорном основании определим по зависимости:

$$L_{\text{п}} = 2 \cdot r_0 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{r_0 - f_{\text{ш}}}{r_0} \right)^2}, \quad (10)$$

где  $r_0 = D/2$  – радиус ненагруженной шины, м;  $f_{\text{ш}}$  – нормальный прогиб шины на жестком основании, м.

В источнике [10] приведена зависимость определения прогиба шины сельскохозяйственного трактора:

$$f_{\text{ш}} = 0,121 \cdot \frac{G_{\text{к}}^{0,476}}{P_{\text{в}}^{0,570}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{в}}$  – внутреннее давление воздуха в шине, кПа.

Производители шин рекомендуют устанавливать различные значения давления воздуха в шинах в зависимости от нагрузки и скорости движения.

Результаты расчета максимального давления разных шин на почву, выполненного по зависимости (6) с учетом зависимостей (7) – (11), приведены в таблице 2.

Допускаемые значения максимального давления на почву регламентированы по ГОСТ Р 58655-2019 [11] для суглинистой и глинистой почв в зависимости от сезона (весна, лето, осень) и влажности почвы.

## Буксование движителя

Буксование движителей сельскохозяйственной техники является важным показателем, характеризующим правильность подбора состава машинно-тракторного агрегата (МТА) и выбора режима выполнения сельскохозяйственных работ. Важной характеристикой для определения тяговых возможностей трактора является зависимость буксования от тягового усилия на крюке, получаемая при тяговых испытаниях. Эталонным

фоном для экспериментального определения тягового класса по ГОСТ 27021-86 [12] является невалушенная стерня озимых колосовых. Для вновь проектируемого трактора на практике используют расчетные зависимости для определения буксования.

Для оценки тягово-сцепных свойств трактора выбранными зависимостями, учитывающими конструктивные параметры трактора, шин и физико-механических свойств почвы. Зависимость определения буксования, полученная в результате осреднения опытных данных [13]:

$$\delta = \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{A}{\Phi_{\text{кр max}} - \Phi_{\text{кр}}}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$  – коэффициенты, зависящие от типа трактора, типа и состояния опорной поверхности;  $\Phi_{\text{кр max}}$  – максимальное удельное тяговое усилие на крюке;  $\Phi_{\text{кр}}$  – текущее значение удельного тягового усилия на крюке:

$$\Phi_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{ф}}}{G_{\text{сц}}},$$

где  $G_{\text{сц}} = \lambda \cdot G$  – нормальная нагрузка, приходящаяся на ведущие колеса, Н. Для трактора со всеми ведущими колесами 4К46:  $\lambda = 1$ ;  $P_{\text{ф}}$  – сила сопротивления качению трактора, Н.

Автором работы [14] предложена формула определения  $P_{\text{ф}}$ , учитывающая нормальную нагрузку на колесо и его размеры. Для двусосного трактора  $P_{\text{ф}}$  примет вид:

$$P_{\text{ф}} = \sum_{i=1}^2 \frac{G_{\text{к}i}^2}{K \cdot B \cdot D_{\text{пр}}^2},$$

где  $K$  – коэффициент объемной деформации грунта, Н/м<sup>2</sup>;  $D_{\text{пр}}$  – приведенный диаметр, м.

Для трактора компоновочной схемы 4К46 и случая движения по стерни [13]:  $A = 0,708$ ,  $B = 7,15$ ,  $\Phi_{\text{кр max}} = 0,67$ .

В расчете принят режим работы двигателя при максимальном крутящем моменте. Режим работы коробки передач выбран, исходя из скорости движения трактора при пахоте 9–10 км/ч.

Результаты расчетов буксования тракторов с разными шинами приведены в табл. 2.

**Таблица 2** Результаты определения эксплуатационных показателей

**Table 2.** Results of operational indicators defining

№ шины	$G_T$ , кН	$G_{K1}$ , кН	$G_{K2}$ , кН	$\beta_{\text{пред}}$ , °	$q_{1\text{max}}$ , кПа	$q_{2\text{max}}$ , кПа	$\delta$ , %	$C$ , руб.
1	135	33,7	41,3	42	175	213	13,3	139 400
2	137	34,3	41,8	41	150	179	12,7	188 770
3	138	33,9	42,4	39	146	184	10,9	155 510
4	140	34,9	42,6	38	146	170	10,5	212 490

## Стоимость шин

Наряду с величинами, показывающими степень уплотняющего воздействия шин на почву, тягово-сцепные свойства шин и угла поперечной устойчивости, стоимость имеет большую значимость при выборе определенной модели, которая может привести к удорожанию трактора. Стоимость шин одного типоразмера может значительно варьироваться в зависимости от модели, типоразмера производителя. В табл. 2 приведена ориентировочная стоимость пневматических шин рассматриваемых моделей [15].

## Определение обобщенного параметра

Оценка результатов функционирования трактора является многокритериальной задачей и для ее решения могут использоваться различные методы построения обобщенного параметра. Одним из наиболее удобных способов выступает обобщенная функция желательности Харрингтона [16]. Этот метод является универсальным по отношению к входным параметрам разной физической природы и может применяться в различных областях.

В основе метода лежит идея преобразования полученных значений в безразмерную шкалу желательности. Для этого используется функция Харрингтона (функция желательности). Эта функция была получена эмпирическим путем и представлена следующей зависимостью:

$$d = \exp[-\exp(-Y)],$$

где  $d$  – ось ординат, называемая шкалой желательности;  $Y$  – ось абсцисс, называемая шкалой частных показателей,  $Y \in [-2; +5]$ .

Шкала желательности в интервале от 0 до 1 имеет пять стандартных отметок: [0; 0,2] – «очень плохо», [0,2; 0,37] – «плохо», [0,37; 0,63] – «удовлетворительно», [0,63; 0,8] – «хорошо», [0,8; 1,0] – «очень хорошо».

Входные параметры сравниваемых систем распределяются в масштабе, соответствующем предъявляемым

к ним требованиям, на промежутке эффективных значений шкалы частных показателей. Затем соответствующие им показатели пересчитываются в отметки на шкале желательности. Полученное  $d_i$  для каждого  $i$ -го показателя пересчитывается вместе с другими в обобщенный параметр (значение обобщенной функции желательности):

$$D = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k d_i(Y)}.$$

В методике определяются два обобщенных параметра. Первый  $D_1$  определяется на основе следующих показателей работы системы: угол поперечной статической устойчивости трактора; максимальное давление задних колес на почву (как наиболее нагруженных); коэффициент буксования. Второй  $D_2$  дополняется стоимостью шин. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Все рассмотренные в расчете пневматические шины могут быть установлены на трактор К-7М «Кировец» без изменения конструкции, обеспечивая необходимую грузоподъемность и максимальную скорость движения 40 км/ч.

При определении вертикальных нагрузок на колесо получено, что масса трактора, работающего с тяговым усилием, перераспределяется по его осям: передняя ось разгружается, задняя – нагружается. Кроме того, задняя ось догружается за счет вертикальной составляющей тягового усилия.

Полученные расчетным путем значения угла статической поперечной устойчивости  $\beta_{\text{пред}}$  составляют не менее допустимого угла  $35^\circ$ , установленного стандартом по безопасности труда в процессе эксплуатации трактора [8]. С точки зрения повышения запаса статической поперечной устойчивости, предпочтительны шины с меньшим наружным диаметром: 28,1 R26 и 30.5 R32.

**Таблица 3.** Результаты определения обобщенного показателя

**Table 3.** Results of generalized indicator defining

№ шины	Типоразмер	$d_1(\beta_{\text{пред}})$	$d_2(q_{2\text{max}})$	$d_3(\delta)$	$d_4(C)$	$D_1$	$D_2$
1	28,1 R26	0,946	0,494	0,751	0,740	0,706	0,714
2	30.5 R32	0,894	0,671	0,753	0,647	0,767	0,735
3	710/70R38	0,772	0,638	0,911	0,712	0,765	0,752
4	710/70R42	0,740	0,687	0,942	0,609	0,782	0,735

**Принятые обозначения в табл. 3:**  $d_1(\beta_{\text{пред}})$  – значение функции желательности для предельного угла поперечной статической устойчивости;  $d_2(q_{2\text{max}})$  – значение функции желательности для максимального давления колеса задней оси на почву;  $d_3(\delta)$  – значение функции желательности для буксования трактора;  $d_4(C)$  – значение функции желательности для стоимости шин;  $D_1$  – обобщенный показатель, определенный по основным эксплуатационным показателям ( $\beta_{\text{пред}}$ ,  $q_{2\text{max}}$ ,  $\delta$ );  $D_2$  – обобщенный показатель, определенный по основным эксплуатационным показателям и стоимости шин ( $C$ ).

На максимальное давление колес на почву под колесами влияют вертикальная нагрузка на колесо и площадь пятна контакта. Шины 710/70R38 и 710/70R42 за счет большей длины и ширины пятна контакта оказывают наименьшее влияние на почву. Максимальное давление заднего колеса с шиной 710/70R38 с действующей вертикальной нагрузкой 42,4 кН и давлением воздуха в шине 100 кПа соответствует нормам по ГОСТ Р 58655-2019 при влагоемкости суглинистой почвы 0,5 НВ и менее в летне-осенний период. Максимальное давление заднего колеса с шиной 710/70R42 с действующей вертикальной нагрузкой 42,6 кН и давлением воздуха в шине 100 кПа соответствует нормам по ГОСТ Р 58655-2019 при влагоемкости суглинистой почвы 0,5 НВ и менее весенний период и при влагоемкости свыше 0,5 НВ до 0,6 в летне-осенний период.

Для заданного режима работы получены коэффициенты буксования трактора с разными шинами. Для снижения эксплуатационных расходов, связанных с низкой производительностью, износом шин, перерасходом топлива, коэффициент буксования должен быть наименьшим. Тракторы, оборудованные шинами 710/70R38, 710/70R42, имеют коэффициенты буксования 10,9% и 10,5% соответственно.

Также необходимо отметить, что цена шины является немало значимой при комплектации трактора. Цены на шины одной размерности могут варьироваться в широком диапазоне в зависимости от модели и производителя. Среди сравниваемых шин наибольшую стоимость имеют 710/70R42 (212 490 руб.), наименьшую – 28,1 R26 (139 400 руб.).

Основываясь на полученных результатах обобщенных параметров, можно выбрать комплект шин. Для получения высоких эксплуатационных показателей, рассмотренных в работе, на выбранный трактор могут быть установлены шины 710/70R42 ( $D_1 = 0,782$ ). Однако при комплектации трактора необходимо учитывать стоимость шин, в противном случае это может привести к значительному удорожанию трактора. С этой точки зрения, для базовой комплектации трактора наиболее оптимальным вариантом являются шины 710/70R38 ( $D_2 = 0,752$ ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства. Москва: КолосС, 2004. 504 с.
2. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2009. 751 с.
3. Котиев Г.О., Шарипов В.М., Щетинин Ю.С., Хашем М.Ш. Подбор шин низкого давления для сельскохозяйственных тракторов и вездеходных транспортных средств // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7–2. С. 46–51.
4. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов: выбор и обоснование некоторых параметров. Москва: Машиностроение, 1966. 195 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика рационального выбора комплекта шин для сельскохозяйственного трактора позволяет выбрать комплект шин с лучшим сочетанием эксплуатационных показателей при проектировании новых моделей или модернизации серийных, анализировать особенности взаимодействия колесного двигателя с почвой, оценивать целесообразность установки предлагаемого комплекта шин и выявлять пути совершенствования конструкции трактора. Развитие методики может быть направлено на расширение номенклатуры оценочных показателей, а также адаптацию к применению для других типов транспортных средств.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад автора.** Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автором разработана концепция, проведено исследование и подготовлена статья).

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author's contribution.** The author confirms that his authorship complies with the international *ICMJE* criteria (the author developed the concept, conducted a study and prepared an article).

**Competing interests.** The author declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

5. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные двигатели: теория и расчет. Москва: Машиностроение, 1972. 184 с.
6. Li H., Schindler C. Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2013. Vol. 227, N 3. P. 275–291. doi: 10.1177/1464419313486627
7. Андрианов А.В. Повышение технико-экономических показателей колесного трактора совершенствованием двигателя при выполнении весенних полевых работ (на примере ХТЗ-150К-09): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2015. 24 с.

8. ГОСТ 12.2.019-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>. Дата обращения: 15.12.2022.
9. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., и др. Тракторы: теория / под общ. ред. В.В. Гуськова. Москва: Машиностроение, 1988. 376 с.
10. Saarihahti M. Soil interaction model. Appendix report No 7. 3: Tyre/soil models for predicting rut formation and soil compaction. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 15 p.
11. ГОСТ Р 58655-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200169432>. Дата обращения: 15.12.2022.

12. ГОСТ 27021-86. Государственный стандарт Союза ССР. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>. Дата обращения: 15.12.2022.
13. Городецкий К.И., Парфенов А.П., Лавлинский А.М. Обобщенные тяговые показатели сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 2. С. 3–8.
14. Гуськов А.В. Определение тягово-сцепных качеств шин ведущих колес трактора // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2007. № 37. С. 71–74.
15. UPTIRE.ru [интернет]. Шины, диски и камера для сельскохозяйственной техники. Режим доступа: <http://uptire.ru/>. Дата обращения: 15.12.2022.
16. Адлер Ю.А., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1976. 279 с.

## REFERENCES

1. Kutkov GM. Tractors and automobiles: Theory and technological properties. Moscow: KolosS; 2004. 504 p. (In Russ).
2. Sharipov VM. Construction and dismemberment tractor. 2nd revised and updated. Moscow: Mashinostroenie; 2009. 751 p. (In Russ).
3. Kotiev GO, Sharipov VM, Shchetinin YuS, Hashem MSh. Selection of low-pressure tires for agricultural tractors and all-terrain vehicles. *Modern trends in the development of science and technology*. 2016;(7–2):46–51. (In Russ).
4. Guskov VV. Optimal parameters of agricultural tractors: Selection and justification of some parameters. Moscow: Mashinostroenie; 1966. 195 p. (In Russ).
5. Ageikin YaS. All-terrain wheeled and combined propellers: Theory and calculation. Moscow: Mashinostroenie; 1972. 184 p. (In Russ).
6. Li H, Schindler C. Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K. *Journal of Multi-body Dynamics*. 2013;227(3):275–291. doi: 10.1177/1464419313486627
7. Andrianov AV. Improving the technical and economic indicators of a wheeled tractor by improving the propulsion when performing spring field work (using the example of HTZ-150K-09) [dissertation abstract]. Chelyabinsk; 2015. 24 p. (In Russ).
8. GOST 12.2.019-2015. Interstate standard. Occupational safety standards system. Agricultural tractors and self-propelled machines. General safety requirements. (In Russ). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>. Accessed: 15.12.2022.
9. Guskov VV, Velev NN, Atamanov YuE, et al. Tractors: theory. Ed. by V.V. Guskov. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 376 p. (In Russ).
10. Saarihahti M. Soil interaction model. Appendix report No 7. 3: Tyre/soil models for predicting rut formation and soil compaction. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management; 2002. 15 p.
11. GOST R 58655-2019. National Standard of the Russian Federation. Agricultural mobile machinery. Rates of force produced by propelling agents on soil. (In Russ). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200169432>. Accessed: 15.12.2022.
12. GOST 27021-86. The state standard of the USSR. Agricultural and forestry tractors. Towing classes. (In Russ). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>. Accessed: 15.12.2022.
13. Gorodetsky KI, Parfenov AP, Lavlinsky AM. Generalized traction indicators of agricultural tractors. *Tractors and agricultural machinery*. 2017;(2):3–8. (In Russ).
14. Guskov AV. Determination of traction-coupling qualities of tires of tractor driving wheels. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University*. 2007;(37):71–74. (In Russ).
15. UPTIRE.ru [Internet]. Tires, wheels and a camera for agricultural machinery. (In Russ). Available from: <http://uptire.ru/>. Accessed: 15.12.2022.
16. Adler YuA, Markova EV, Granovsky YuV. Experiment planning in the search for optimal conditions. 2nd ed., revised and updated. Moscow: Nauka; 1976. 279 p. (In Russ).

## ОБ АВТОРЕ

### Анисимов Николай Леонидович,

аспирант, ведущий инженер-конструктор;  
адрес: Российская Федерация, 198097, Санкт-Петербург,  
пр. Стачек, д. 47;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1270-1093>;  
eLibrary SPIN: 4958-4651;  
e-mail: [anisimovnl05@mail.ru](mailto:anisimovnl05@mail.ru)

## AUTHOR'S INFO

### Nikolay L. Anisimov,

Postgraduate student, Leading Design Engineer;  
address: 47 Stachek avenue, 198097 Saint Petersburg, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1270-1093>;  
eLibrary SPIN: 4958-4651;  
e-mail: [anisimovnl05@mail.ru](mailto:anisimovnl05@mail.ru)