

Тип статьи: научная
УДК 629.032; 631.373
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-86-94

АЛГОРИТМ ЭКСПЕРСС-ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ПРИЦЕПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Валерий Юрьевич Ревенко¹, Виктор Иосифович Скорляков²

^{1,2} Росинформагротех, р.п. Правдинский, Московская обл., Российская Федерация

¹ skskniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0336-5323>

² skorlv@yandex.ru

Автор ответственный за переписку: Валерий Юрьевич Ревенко, skskniish@rambler.ru
Corresponding author: Valerij Revenko, skskniish@rambler.ru

Реферат. Достоверная оценка уровня воздействия на почву движителей мобильной сельскохозяйственной техники возможна только при точном измерении контурной площади контактной поверхности шины с опорным основанием. Данный показатель лежит в основе всех стандартных методик по определению максимального нормального давления, максимальных напряжений и других показателей в системе «колесо-почва». Авторами предложен упрощенный алгоритм определения площади пятна контакта шин, который можно использовать как при оценке уровня давления на почву существующих прицепных сельскохозяйственных транспортных средств, так и вновь разрабатываемых. В первом случае достаточно измерить размерные параметры шины, установленной на прицеп: диаметр, ширину профиля, величину деформации под воздействием осевой вертикальной нагрузки. Во втором – достаточно взять эти данные из каталогов с техническими характеристиками шин конкретных производителей. В основе алгоритма лежит математическая модель, используемая при определении площади сечения цилиндра плоскостью опорной поверхности, находящейся от края колеса на расстоянии равном прогибу шины. Предлагаемая методика была апробирована путем сравнения результатов расчета с результатами натурных испытаний 22 образцов сельскохозяйственных шин, устанавливаемых на различные виды транспортно-тракторных агрегатов: тележек, прицепов, бункеров-перегрузчиков. В результате исследований было получено достаточно высокое значение критерия эффективности моделирования (0,989), свидетельствующее о высоком уровне сходимости между прогнозными (расчетными) и наблюдаемыми (измеренными) значениями площадей контакта изучаемых образцов шин. Простота в использовании, универсальность и достаточная для инженерных расчетов точность делают предложенный алгоритм удобным для широкого практического использования.

Ключевые слова: колесный движитель, диаметр шины, ширина профиля, деформация шины, пятно контакта, площадь, расчетный алгоритм.

THE ALGORITHM OF EXPRESS ASSESSMENT OF IMPACT ON SOIL OF RUNNING SYSTEMS OF TRACTOR-TRANSPORT UNITS

Valery Revenko¹, Victor Skorlyakov²

^{1,2} Rosinformagrotekh, Pravdinsky Township, Moscow Region, Russian Federation

¹ skskniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0336-5323>

² skorlv@yandex.ru

Abstract. A reliable assessment of the level of impact on the soil from the propulsors of mobile agricultural machinery is possible only with an accurate measurement of the contour area of the contact surface of the tire with the support base. This indicator underlies all standard methods for determining the maximum normal pressure, maximum stresses and other indicators in the “wheel-soil” system. A simplified algorithm for determining the area of the contact patch of tires, which can be used both when

assessing the level of pressure on the soil of existing trailed agricultural vehicles and newly developed ones, was proposed by the authors. In the first case, it is enough to measure the dimensional parameters of the tire mounted on the trailer: diameter, profile width, the amount of deformation under the influence of axial vertical load. In the second case, it is enough to take this data from catalogs with the technical characteristics of tires from specific manufacturers. The mathematical model used to determine the cross-sectional area of the cylinder by the plane of the supporting surface located from the edge of the wheel at a distance equal to the tire deflection is the basis of the algorithm. The proposed methodology was tested by comparing the calculation results with the results of full-scale tests of 22 samples of agricultural tires installed on various types of transport and tractor units: carts, trailers, transfer bins. As a result of the research, a fairly high value of the modeling efficiency criterion was obtained (0.989), indicating a high level of convergence between the predicted (calculated) and observed (measured) values of the contact areas of the studied tire samples. Ease of use, versatility and accuracy sufficient for engineering calculations make the proposed algorithm convenient for wide practical use.

Keywords: wheel drive, tire diameter, profile width, tire deformation, contact spot, area, calculation algorithm.

Для цитирования: Ревенко В.Ю., Скорляков В.И. Алгоритм экспресс-оценки воздействия на почву ходовых систем прицепных транспортных средств // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 70, № 4. С. 86-94. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-86-94>.

For citation: Revenko V., Skorlyakov V. The algorithm of express assessment of impact on soil of running systems of tractor-transport units. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 70(4): 86-94. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-86-94>.

Введение. Современное высокопроизводительное сельскохозяйственное производство невозможно представить без прицепной транспортной техники, оснащенной кузовами большой ёмкости. Данный тип транспорта предназначен для перевозки больших объемов сельскохозяйственных грузов (зерно, сенаж, зеленая масса, силос и т.д.) по всем типам дорог, включая полевые, и непосредственно по полям. Практически все производители тракторных прицепов, полуприцепов, бункеров-перегрузчиков в своей номенклатуре имеют модели с ёмкостью кузова достигающей 50-60 м³. Полная масса подобной техники доходит до 40 тонн и имеет тенденцию дальнейшего роста [1]. В результате, у некоторых образцов нагрузка на один колесный движитель доходит до 7 тонн.

Производители транспортных машин, с целью снижения негативного влияния движителей на почву, оснащают их широкопрофильными шинами с увеличенными размерами резинокордной оболочки. В отличие от традиционных сельскохозяйственных шин (тракторных, комбайновых и др.), шины для прицепной транспортной техники имеют низкую высоту почвозацепов, более насыщенный рисунок протектора, адаптированный, в том числе к воздействию стерни. Кроме того, данный тип шин отличает стабильность и плавность при движении по жесткому покрытию, хорошая самоочищаемость на увлажненной почве, более низкое сопротивление качению. Увеличенная ширина протектора и большой объем каркаса гарантируют высокую несущую способность и удовлетворительную проходимость при низком давлении воздуха в шине. Однако, увеличение размеров шин в настоящее время не в полной мере компенсирует возросшие вертикальные нагрузки, что приводит к глубокому проникновению в нижние горизонты почвы силовых воздействий, со всеми вытекающими негативными последствиями для почвенной структуры [2].

Несмотря на то, что данный вид техники широко используется на полях, фактические показатели воздействия на почву прицепных тракторно-транспортных средств остаются малоизученными. Ликвидировать указанный пробел можно путем сравнения величин максимального нормального давления, возникающих в зоне контакта колеса с почвой у разного типа прицепной транспортной техники. Но, данный показатель невозможно определить без точного определения величины контурной площади пятна контакта движителя с опорной поверхностью. При этом, её размер можно получить как в результате измерения, так и в результате расчета. В последнем случае используются различные математические модели, каждая

из которых, по мнению их авторов, является наиболее точной и достоверной. Однако, практическое использование данных моделей в подавляющем большинстве случаев чрезвычайно затруднено, вследствие их высокой сложности и низкой точности [3].

Цель исследования – разработать алгоритм оценки воздействия на почву движителей прицепной сельскохозяйственной транспортной техники, с использованием имеющейся на филиале уникальной базы данных, связывающей силовые, размерные и физические параметры шин (в рамках системы «колесо-грунт») с площадью их контактной поверхности с жестким опорным основанием.

В результате изысканий необходимо создать экспресс-метод, позволяющий с достаточной для инженерных расчетов точностью спрогнозировать размеры контурной площади пятна контакта с опорой транспортных шин сельскохозяйственного назначения, с учетом размерных параметров резинокордной оболочки и ее деформации под действием вертикальной нагрузки на ось колеса.

Материалы и методы исследования. Для решения поставленной задачи были проанализированы существующие отечественные и зарубежные методы расчетной оценки уровня воздействия техники на почву, а также экспериментальные данные по «вертикальному обжатию» шин, предназначенных для использования на сельскохозяйственном транспорте. В последнем случае были задействованы результаты испытаний натуральных образцов наиболее распространенных шин, которыми комплектуются тракторные прицепы, бункеры-перегрузчики и другая прицепная транспортная техника, используемая для перевозки сельскохозяйственных грузов: зерна, силоса, сенажа, зеленой массы и пр.

Исследовались шины размерности: 445/65R22,5, 560/65R22,5, 600/55-22,5, 600/50R22,5, 700/55-22,5, 710/70R22,5, 600/55R26,5 и другие (всего 22 варианта). Площади отпечатков каждого из образцов шин были получены при регламентируемом заводом-изготовителем внутришинном давлении и соответствующей этому давлению величине допустимой вертикальной нагрузки. Некоторые из исследуемых образцов шин оценивали при различных значениях осевой нагрузки (10 – 50 кН) и различных вариациях давления воздуха в шинах.

Контурный отпечаток получали в соответствии с ГОСТ Р 58656-2019 путем многократного подъема и опускания колеса на жесткое опорное основание, с обязательным проворотом колеса после каждого подъема на угол, соответствующий ширине грунтозацепа протектора.

Диаметр ненагруженной шины рассчитывали по длине условной окружности, проходящей по центральной линии протектора. Ширину профиля определяли, как средний результат замера по 4-м равнорасположенным на боковинах точкам. Статический радиус деформированной шины оценивали с помощью лазерного дальномера, замеряя расстояние от центра оси колеса до опорной поверхности.

На рисунке 1 приведены варианты проведения процесса измерений: слева – с использованием специального стенда, справа – без демонтажа шин с прицепа.



Рисунок 1 - Варианты измерения контурной площади контакта

Результаты и обсуждение. При разработке модели был проанализирован опыт предыдущих исследований в данной области, проводимых в России и за рубежом. Среди изучаемых – общеизвестна модель Ляско М.И. (1994) [4], описывающая связь между прогибом f шины и

контурной площадью контакта S , широко используемая в практических расчетах эмпирическая формула Станкевича Э.Б. [5] (1985) и другие. Из зарубежных - были проанализированы наиболее известные в данной области исследования работы следующих ученых: Krick (1969), Dwyer (1984) [6], Pillai & Fielding (1986) [7], Febo (1987) Ziani, (1990), Godbole (1993), Grečenko (1996) [8], Prikner (2014) [9] и др.

В результате проведенного мониторинга выявлено, что в некоторых работах предлагались математические модели, которые довольно точно описывали процесс взаимодействия колес сельскохозяйственной техники с почвой. Однако, наиболее приемлемыми и корректными для нашего случая явились работы, проводимые под руководством профессора Русанова В.А. (ВИМ), исследования которого легли в основу стандартизованной методики расчета контурной площади контакта шин с жестким основанием. В вышеуказанных работах рекомендуется рассчитывать площадь пятна контакта шины из следующего соотношения [10]:

$$S = K_{сш} \cdot S_p, \quad (1)$$

где $K_{сш}$ – коэффициент, равный отношению действительной (S) и расчетной (S_p) площадей, S_p – площадь сечения цилиндра плоскостью опорной поверхности, находящейся от края колеса на расстоянии прогиба шины:

$$S_p = 2B \sqrt{f(D - f)}, \quad (2)$$

где B – ширина профиля шины, м;

D – наружный диаметр ненагруженной шины, м;

f – нормальный прогиб шины, м.

$K_{сш}$ – предлагается определять из следующей эмпирической зависимости:

$$K_{сш} = 0,724 - 8,3 \frac{B}{D\lambda} - 0,176 \frac{B}{H^2} + 4,1 \cdot 10^5 D\lambda^2 \quad (3)$$

где B и D – здесь и далее – те же параметры, что и формуле (2);

H – высота профиля шины;

λ – относительная деформация профиля шины: $\lambda = \frac{f}{H}$.

Анализ имеющейся на филиале базы данных по показателям площади опорной поверхности различных образцов шин транспортного назначения показал, что высокий уровень сходимости расчетных по формуле (1) величин, с результатами натуральных испытаний был получен при коэффициенте $K_{сш} = 1$. Кроме того, при проведении измерений было отмечено, что форма пятна контакта подавляющего большинства исследуемых образцов шин транспортного назначения близка к прямоугольной, особенно при высоких деформациях резинокордной оболочки. В этом случае контурную площадь пятна контакта шины i -го колеса транспортного средства F_{ki} (m^2) можно рассчитать, используя следующую зависимость:

$$F_{ki} = B_i \cdot \sqrt{f_i \cdot (D_i - f_i)}, \quad (4)$$

где B_i и H_i – соответственно ширина, и высота профиля i -й шины, м; D_i – свободный диаметр, м; f_i – нормальный прогиб, м.

Нормальный прогиб шины f_i , можно определить по разнице между свободным и статическим радиусом $R_{ст i}$:

$$f_i = \frac{D_i}{2} - R_{ст i}, \quad (5)$$

Таким образом, в предлагаемом нами экспресс-методе расчетной оценки контурной площади пятна контакта шины, в качестве исходных используются следующие параметры шины: свободный диаметр, ширина профиля и величина его деформации под действием вертикальной нагрузки.

Для оценки адекватности предлагаемого алгоритма определения размеров пятна контакта воспользуемся показателем оценки достоверности модели – критерием Нэша-Сатклиффа (Nash and Sutcliffe) [11].

Эффективность моделирования по критерию Нэша-Сатклиффа (NSE) – это статистический показатель, сравнивающий сумму абсолютных квадратов разностей между прогнозными (расчетными) и наблюдаемыми (измеренными) значениями, с дисперсией наблюдаемых значений.

В нашем случае наблюдаемые значения – контурные площади отпечатков протекторов исследуемых образцов шин, полученные в результате измерений.

NSE определяется по известной формуле [12]:

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{pi} - X_{ср})^2} \right], \quad (6)$$

где X_{pi} – наблюдаемое значение исследуемого параметра;

X_{mi} – прогнозируемое значение исследуемого параметра;

$X_{ср}$ – среднее реальное значение исследуемого параметра;

n – число наблюдений.

Графическая интерпретация оценки по критерию NSE показывает, насколько близко измеренные (реальные) и смоделированные данные приближаются к линии $Y=x$, которая соответствует точному совпадению реальных значений с прогнозируемыми.

Реальные значения исследуемого параметра (площади пятна контакта шины с жестким опорным основанием) были получены в результате проведения исследований на натуральных образцах шин, устанавливаемых на различные виды транспортных средств сельскохозяйственного назначения.

На рисунке 2 приведены результаты измерения контурной площади контакта шины размерности 710/40-22,5, полученные при различных уровнях вертикальной нагрузки (10, 20, 30, 40 и 50 кН) и величинах внутришинного давления в 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 кПа. Приведенные диаграммы наглядно подтверждают общеизвестные факты:

а) с уменьшением внутришинного давления площадь контакта протектора с жесткой опорной поверхностью возрастает нелинейно;

б) рост вертикальной нагрузки на ось колеса вызывает соответствующую деформацию его резинокордной оболочки и практически линейное увеличение размера контактирующей плоскости контакта колеса с грунтом.

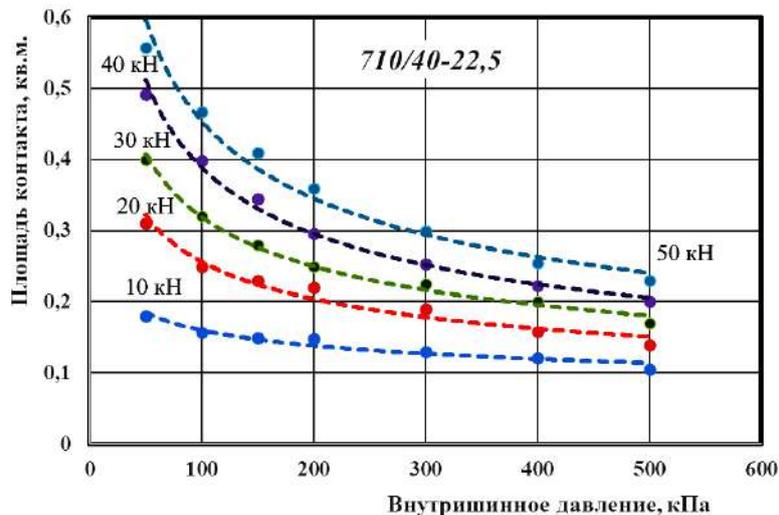


Рисунок 2 - Варианты измерения контурной площади контакта

В таблице 1 приведен фрагмент базы данных, содержащей размерные параметры шин транспортного назначения с результатами измерения контурной площади контакта протектора при соответствующих уровнях вертикальной нагрузки и внутришинного давления. Фрагмент содержит показатели колес с диаметром обода 22,5 дюйма.

Расшифровка наименования колонок таблицы 1 следующая: P_w – внутришинное давление в кПа; G_k – вертикальная нагрузка на колесо, кН; D – диаметр ненагруженной шины, м; B_n – ширина

профиля шины, м; R_{st} – статический радиус нагруженной вертикальной нагрузкой шины, м; $\square h$ – деформация профиля резинокордной оболочки, м; $S_{изм.}$ – измеренная контурная площадь контакта шины с плоскостью, м².

Таблица 1 – Размерные параметры и площади контакта шин при соответствующих уровнях вертикальной нагрузки и внутришинного давления

Размерность шины	P_w	G_k	D	B_n	R_{st} , м	Dh	$S_{изм.}$
295/75R22,5	441	34,5	1,019	0,269	0,452	0,058	0,070
385/65R22,5	400	42,4	1,084	0,384	0,467	0,075	0,093
445/65R22,5	518	67,2	1,163	0,440	0,498	0,084	0,125
445/65-22,5	590	64,9	1,170	0,457	0,525	0,060	0,120
500/60R22,5	380	68,1	1,180	0,513	0,517	0,073	0,157
560/65R22,5	380	61,3	1,251	0,570	0,536	0,089	0,186
600/50R22,5	380	66,9	1,181	0,616	0,510	0,081	0,184
600/55-22,5	262	46,3	1,270	0,602	0,541	0,094	0,203
700/50-22,5	245	53,1	1,270	0,697	0,541	0,094	0,234
710/70R22,5	380	49,7	1,210	0,721	0,515	0,090	0,217

На рисунке 3 по критерию NSE приведена сравнительная оценка расчетных (по формуле 4) показателей, с результатами измерений площади контакта шин с опорой, полученными нами в ходе натурных испытаний.

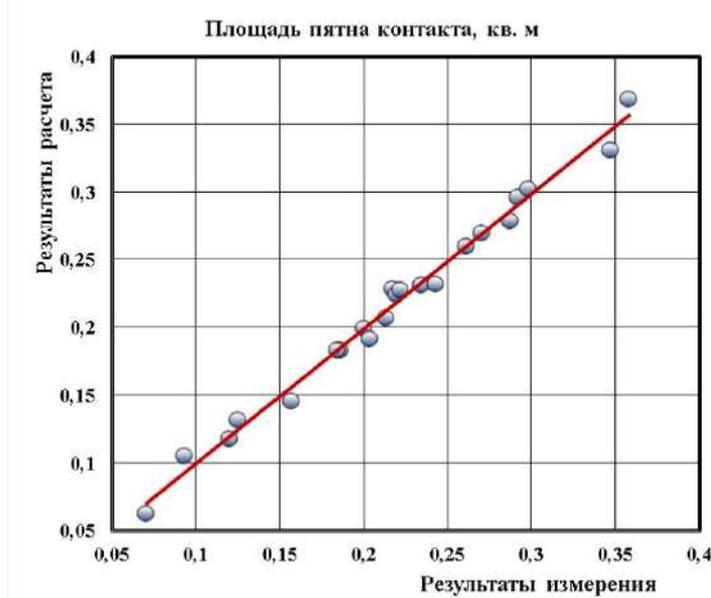


Рисунок 3 – Результаты сравнения расчетных (по формуле 4) и натурных измерений площадей контакта шин по критерию NSE

Группировка точек диаграммы вдоль линии $y=x$ (линии полного равенства прогнозируемых и реальных значений исследуемого параметра), наглядно свидетельствует об адекватности предлагаемой полуэмпирической модели для расчета размера контактирующей поверхности шин. При этом, величина коэффициента эффективности моделирования по критерию NSE составила 0,989.

Для сравнения, приведем результаты расчета коэффициента NSE для одной из анализируемых в процессе нашего исследования зарубежных моделей, наиболее корректно описывающей связь

размерно-деформационных параметров шин с площадью их пятна контакта. Это модель исследователей Pillai & Fielding [7], имеющая следующий вид:

$$F_{ki} = 1,85 \cdot B_i \cdot f_i^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

где B_i – ширина i -й шины, м; D_i – свободный диаметр, м; f_i – нормальный прогиб (деформация шины), м.

На рисунке 4 приведена оценка сходимости результатов измерения площади контакта пневматических шин различных типоразмеров с результатами расчета по формуле 7. Из рисунка следует, что расчётные значения исследуемого параметра несколько ниже наблюдаемых показателей, о чем свидетельствует группа точек, в основном лежащих ниже линии $Y=x$. Критерий эффективности моделирования в данном случае составил $NSE= 0,976$, что несколько ниже аналогичного показателя, характерного для модели проф. Русанова.

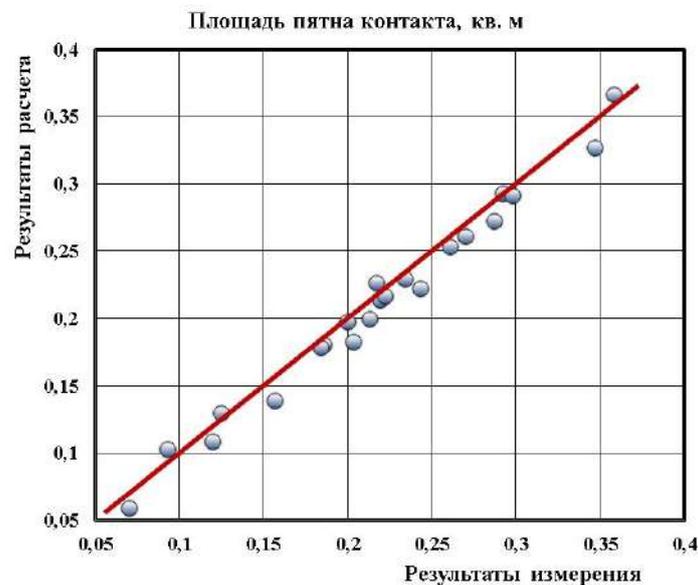


Рисунок 4 – Сходимость расчётных (по формуле 7) и измеренных показателей площадей контакта шин

Сравнение обеих расчетных алгоритмов показало, что более высокое значение критерия эффективности моделирования было получено в первом варианте расчета (по формуле 4), который более точно описывал процесс изменения площади опоры резинокордной оболочки колесного движителя при её нагружении. Более того, расхождения между расчетными и измеренными параметрами в среднем составляли 2,7 %, и в отдельных случаях не превышали 6-ти процентов, что позволяет утверждать о возможности использования предлагаемой методики расчета для проведения инженерных расчетов.

Таким образом, предложенная математическая модель является вполне приемлемым инструментом и эффективным решением проблемы определения величины давления на почву колесных движителей современных транспортных средств. Данный алгоритм можно использовать при определении контурной площади контакта шин с жестким опорным основанием как существующей, так и вновь разрабатываемой сельскохозяйственной транспортной техники. В первом случае достаточно измерить размерные параметры шины, установленной на прицеп: диаметр, ширину профиля, величину деформации под воздействием осевой вертикальной нагрузки. Во втором – достаточно взять эти данные из каталогов с техническими характеристиками шин конкретных производителей и произвести расчеты по формуле 4.

Выводы. В результате проведенных исследований проведен анализ существующих методов и способов расчета контурной площади контакта шин сельскохозяйственного назначения,

применяемых в отечественной и зарубежной инженерной практике. Применительно к шинам прицепных транспортных средств наиболее приемлемым является расчетный алгоритм, предложенный профессором Русановым и уточненный нами в процессе исследований.

Предложенный упрощенный экспресс-метод связывает размерные характеристики деформированной резинокордной оболочки шины с величиной её контурной площади контакта на жестком опорном основании. В его основе – формула для определения площади сечения условного цилиндра (имеющего те же габаритные размеры, что и шина) плоскостью, отстоящей от его центра на величину статического радиуса.

Высокий показатель критерия эффективности моделирования ($NSE = 0,989$) характеризует предлагаемый алгоритм расчета, как имеющий достаточную степень достоверности и степень пригодности для практического применения, при определении площади контакта шин любого типоразмера, устанавливаемых на прицепные транспортные средства сельскохозяйственного назначения.

Список источников

1. Keller T., Lamandé M., Arvidsson J., Berli M., Ruiz S., Schjønning P., Selvadurai A. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: comparing measurements with simulations // *Soil & Tillage Research*. 2014. V.140, P. 106–117.
2. Schjønning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics // *Soil & Tillage Research*. 2015. V. 152. P. 52–66.
3. Saarilahti M. Soil Interaction model. Modelling of the Wheel and Tyre Soil. ECO031.DOC VERSION 23.01.03 University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. May 2002: 40 p.
4. Lyasco M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *Journal of Terramechanics* 1994. Vol. 31(4): p. 239–242.
5. Станкевич Э. Б. Экспериментальные исследования деформации тракторных шин от нормальной нагрузки // *Тракторы и сельхозмашины*. – 1985. – № 5. – С. 2–24.
6. Krick G. Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tyres operating on yielding soils with consideration of tyre deformation. *Journal of Terramechanics* 1969. Vol.6(3): p.73–98.
7. Pillai P.S. Empirical equation for tire footprint area. *Rubber Chem. Tech.* 1986. Vol. 59(1): p. 155–159.
8. Grečenko A., Prikner P. Tire rating based on soil compaction capacity. *J Terramech.* 2014. Vol. 52, p. 77–92.
9. Grečenko A. Tire compaction capacity rating on non-standard soil. *J Terramech.* 2016. Vol. 66, p. 59–61.
10. Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.
11. Уточненная методика определения площади опорной поверхности шин современной сельскохозяйственной техники / В. Ю. Ревенко, С. С. Фролов, А. Н. Ткаченко, А. Б. Иванов // *Техника и оборудование для села*. – 2021. – № 7(289). – С. 10–15.
12. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Хриτοфоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. № 1 (375). С. 176–189.

References

1. Keller T., Lamandé M., Arvidsson J., Berli M., Ruiz S., Schjønning P., Selvadurai A. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: comparing measurements with simulations // *Soil & Tillage Research*. 2014. V.140, P. 106–117.
2. Schjønning P., Stettler M., Keller T., Lassen P., Lamandé M. Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics // *Soil & Tillage Research*. 2015. V. 152. P. 52–66.

3. Saarilahti M. Soil Interaction model. Modelling of the Wheel and Tyre Soil. ECO031.DOC VERSION 23.01.03 University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. May 2002: 40 p.
4. Lyasco M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. Journal of Terramechanics 1994. Vol. 31(4): p. 239-242.
5. Stankevich E. B. Experimental studies of deformation of tractor tires from normal load // Tractors and agricultural machines. - 1985. – No. 5. – pp. 2-24.
6. Krick G. Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tyres operating on yielding soils with consideration of tyre deformation. Journal of Terramechanics 1969. Vol.6(3): p.73-98.
7. Pillai P.S. Empirical equation for tire footprint area. Rubber Chem. Tech. 1986. Vol. 59(1): p. 155-159.
8. Grečenko A., Prikner P. Tire rating based on soil compaction capacity. J Terramech. 2014. Vol. 52, p. 77–92.
9. Grečenko A. Tire compaction capacity rating on non-standard soil. J Terramech. 2016. Vol. 66, p. 59–61.
10. Rusanov V. A. Problems of soil re-compaction by movers and effective ways to solve it. – M.: VIM, 1998. – 368 p.
11. A refined method for determining the area of the bearing surface of tires of modern agricultural machinery / V. Yu. Revenko, S. S. Frolov, A. N. Tkachenko, A. B. Ivanov // Machinery and equipment for the village. – 2021. – № 7(289). – Pp. 10-15.
12. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Hritoforov A.V. The effectiveness of modeling and forecasting river flow // Hydrometeorological studies and forecasts. 2020. No. 1 (375). pp. 176-189.

Информация об авторах

В.Ю. Ревенко – кандидат технических наук; В.И. Скорляков – кандидат технических наук.

Information about the authors

V. Revenko – Candidate of Technical Sciences; V. Skorlyakov – Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 13.07.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.08.2024