УДК 631.372
AGRIS N01
https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЯТНА КОНТАКТА ПНЕВМОКОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ С ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ

©Липкань А. В., *ORCID:0000-0002-2769-6672, SPIN-код: 5598-3932, Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Благовещенск, Россия, lav-blg@mail.ru*
©Панасюк А. Н., *ORCID: 0000-0002-9884-2999, SPIN-код: 3531-7084, д-р техн. наук, Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Благовещенск, Россия, alex28rus@list.ru*
©Кашбулгаянов Р. А., *ORCID: 0000-0001-5567-1061, SPIN-код: 1131-2004, канд. техн. наук, Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Благовещенск, Россия, udacha7755@mail.ru*

RATIONALE FOR SELECTING A METHOD FOR DETERMINING PARAMETERS OF THE CONTACT SPOT OF PNEUMATIC WHEEL MOVER WITH SUPPORT BASE

©Lipkan A., *ORCID:0000-0002-2769-6672, SPIN-code: 5598-3932, Far Eastern Science-Research Institute of Mechanization and Electrification for Agriculture, Blagoveshchensk, Russia, lav-blg@mail.ru*
©Panasyuk A., *ORCID: 0000-0002-9884-2999, SPIN-code: 3531-7084, Dr. tech. Sciences, Far Eastern Science-Research Institute of Mechanization and Electrification for Agriculture, Blagoveshchensk, Russia, alex28rus@list.ru*
©Kashbulgayanov R., *ORCID: 0000-0001-5567-1061, SPIN-code: 1131-2004, PhD, Far Eastern Science-Research Institute of Mechanization and Electrification for Agriculture, Blagoveshchensk, Russia, udacha7755@mail.ru*

Аннотация. Существующий теоретический способ оценки контурной площади пятна контакта шины по математической модели В. Л. Бидермана через определение параметров универсальной характеристики шины (УХШ) предусматривает показатель нормы слойности, который в связи с внедрением в производство современных шин перестал отражать принятую взаимосвязь: чем больше норма слойности, тем выше жесткость шины. Поэтому при расчете контурной площади пятна контакта шины возможна погрешность до 28%. В связи с чем, нами проведены поисковые эксперименты уточняющие теоретический метод расчета пятна контакта для современных шин и предлагается сравнительная оценка четырех способов определения площади пятна контакта шины: 1) непосредственно измерением площади, используя цифровую фотографию отпечатка пятна контакта шины в среде программы «Kompas-3D» V13 с определением масштабирования и погрешности метода с помощью квадрата из миллиметровки 100×100 мм; 2) расчетом по формуле площади эллипса (*далее — по формуле*), используя длину и ширину пятна контакта шины, измеренные рулеткой непосредственно по полученному отпечатку; 3) расчетом по формуле, используя длину и ширину пятна контакта шины, определенные по его цифровой фотографии в среде программы «Kompas-3D» V13; 4) расчетом по формуле, используя длину и ширину пятна контакта шины, определенные расчетом с использованием параметров УХШ. В результате проведенных экспериментов установлено, что наиболее достоверен четвертый способ теоретического определения контурной площади пятна контакта шины с использованием

параметров УХШ, но при этом сходимость расчетной и экспериментальной контурных площадей пятна контакта шины должна обеспечиваться коэффициентом их соотношения.

Abstract. The existing theoretical method of assessing the contour area of the tire contact spot by the mathematical model of V. L. Biederman through the determination of the parameters of the universal characteristics of the tire (UCT) provides an indicator of the ply rate, which in connection with the introduction of modern tires no longer reflect the accepted relationship — the greater the ply rate, the higher the tire stiffness. Therefore, when calculating the contour area of the tire contact spot, an error of up to 28% is possible. In this connection, we have conducted exploratory experiments specifying the theoretical method for calculating the contact patch for modern tires. In this connection, we conducted search experiments clarifying the theoretical method of calculating the contact spot for modern tires and offers a comparative assessment of the four ways to determine the area of the contact spot tire: 1) directly by measuring the area using a digital photograph of the imprint of a contact tire in the Kompas-3D V13 program environment with scaling and method errors using a 100×100 mm square; 2) by calculation according to the formula of the area of the ellipse (hereinafter — according to the formula), using the length and width of the contact patch of the tire, measured by a tape measure directly from the received imprint; 3) by calculation using the formula, using the length and width of the tire contact patch, determined from its digital photograph in the Kompas-3D V13 software environment; 4) by the formula, using the length and width of the contact patch of the tire, determined by calculation using the UCT parameters. As a result of the experiments, it was found that the fourth most convenient method for theoretical determination of the contour area of a tire contact patch using UCT parameters, but the convergence of the calculated and experimental contour areas of a tire contact patch should be ensured by their ratio.

Ключевые слова: колесный движитель, универсальная характеристики шины, способ, пятно контакта, контурная площадь, опорное основание, максимальное давление, показатель воздействия движителя на почву.

Keywords: wheel mover, universal characteristics of the tire, method, contact spot, contour area, support base, maximum pressure, indicator of the impact of the mover on the soil.

Введение

Каждый пневмоколесный движитель характеризуется своим типоразмером шины и комплексом конструктивных параметров, номинальными нагрузками и соответствующими давлениями воздуха, обеспечивающими допустимый статический прогиб шины для различных условий эксплуатации, и, соответственно, номинальную контурную площадь пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием.

Для решения вопроса экологической оценки мобильного энергетического средства (МЭС) через показатель воздействия на почву U необходимо определять максимальное нормальное давление колесного движителя на почву q_{max}.

Рекомендуемый ГОСТ 26953-86 [1] способ определения максимального давления на почву колесных движителей, предусматривающий экспериментальное определение контурной площади пятна контакта протектора шины на плоском опорном основании $F_к$ по ГОСТ 7057-81 [2] является трудоемким и организационно сложным, ибо предполагает использование специального стенда, либо манипуляции с натурными образцами мобильных машин и, кроме того, четко регламентируя метод получения отпечатка контакта протектора шины, ни ГОСТ 7057 [2], ни ГОСТ 26953 [1] не дают четкой регламентации метода оценки

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

величины площади этого отпечатка.

Поэтому определение максимального давления и, соответственно, показателя воздействия движителей колесного трактора на почву U путем расчетного определения контурной площади пятна контакта протектора шины на жесткое опорное основание является актуальным и является целью данной работы.

Для моделирования взаимодействия шин с жестким опорным основанием наиболее полно и достоверно отражающей все показатели данного процесса с учетом конструктивных параметров шины, радиальной нагрузки и внутришинного давления является модель тракторных шин В. Л. Бидермана [3]. Известен расчетный способ оценки контурной площади пятна контакта протектора шины, основанный на данной математической модели процесса деформации шины, то есть на основе использования параметров универсальной характеристики шины, уравнение которой имеет вид

$$G_{\text{к}} = \frac{f^2}{c_1 + c_2 f \big/ \left(p_{\text{w}} + p_0\right)}, \tag{1}$$

где c_1, c_2 и p_0 — постоянные для данной шины коэффициенты, определяемые нами как параметры УХШ.

Величины c_1, c_2 и p_0 для данной шины могут быть определены по результатам статических испытаний шин, представленных для отечественных шин в ГОСТ 7463-2003 [4], для зарубежных шин на сайтах соответствующих производителей сельскохозяйственных шин.

Уравнение (1) справедливо для всех без исключения тракторных шин, при этом значения c_1 (м^2/кН), c_2 (1/м) и p_0 (кПа) могут быть определены из следующих зависимостей (М. И. Ляско, А. Г. Курденков) [3, с. 206]:

$$c_1 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} x_i^2 \sum\limits_{i=1}^{N} y_i - \sum\limits_{i=1}^{N} x_i \sum\limits_{i=1}^{N} x_i y_i}{N \sum\limits_{i=1}^{N} x_i^2 - \left(\sum\limits_{i=1}^{N} x_i\right)^2}; \tag{2}$$

$$c_2 = \frac{N \sum\limits_{i=1}^{N} x_i y_i - \sum\limits_{i=1}^{N} x_i \sum\limits_{i=1}^{N} y_i}{N \sum\limits_{i=1}^{N} x_i^2 - \left(\sum\limits_{i=1}^{N} x_i\right)^2}; \tag{3}$$

$$p_0 = 16,7n\left(\sqrt{\frac{D}{B}} - 1,4\right) - 28 \geq 0 \text{ (при } p_0 < 0 \text{ в расчетах принимают } p_0 = 0); \tag{4}$$

$$x_i = \left[f_{\text{ш}}\right] / \left(p_{\text{w}_i} + p_0\right); \quad y_i = \left[f_{\text{ш}}\right]^2 / G_{\text{к}_i}, \tag{5}$$

где n — норма слойности;

D, B — наружный диаметр и ширина профиля шины, м;

$[f_{\text{ш}}]$ — допустимый нормальный статический прогиб шины, м;

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

p_{w_i}, $G_{\text{к}_i}$ — внутреннее давление воздуха в шине (кПа) и соответствующая допустимая нагрузка (кН) по ГОСТ 7463-2003 [4];

$i = 1, 2, \ldots, N$ [здесь N — число ступеней нагрузки на шины (ГОСТ 7463-2003)].

Имея данные по параметрам УХШ — c_1, c_2 и p_0 из формулы (1) определяется нормальный статический прогиб шины $f_{\text{ш}_i}$ для любой нагрузки $G_{\text{к}_i}$ на колесо и давления воздуха p_{w_i} в шине:

$$f_{\text{ш}_i} = \frac{c_2 \cdot G_{\text{к}_i}}{2\left(p_{\text{w}_i} + p_0\right)} + \sqrt{\left[\frac{c_2 \cdot G_{\text{к}_i}}{2\left(p_{\text{w}_i} + p_0\right)}\right]^2 + c_1 \cdot G_{\text{к}_i}}\ . \tag{6}$$

Большинство исследователей диагональных и первых радиальных шин идентифицируют форму пятна контакта протектора шины с формой эллипса и предлагают рассчитывать контурную площадь пятна контакта шин по формуле площади эллипса:

$$F_{\text{к}_i} = \frac{\pi}{4} a_{\text{к}_i} b_{\text{к}_i}\ , \tag{7}$$

где $a_{\text{к}_i}$ и $b_{\text{к}_i}$ — длина и ширина пятна контакта протектора шины с ровным жестким основанием, м.

Размеры пятна контакта протектора шины с использованием параметров УХШ предлагается рассчитывать по формулам:

$$a_{\text{к}_i} = c_3\sqrt{D \cdot f_{\text{ш}_i} - f_{\text{ш}_i}^2}\ ; \quad b_{\text{к}_i} = 2\sqrt{2R_{\text{пр}} \cdot f_{\text{ш}_i} - f_{\text{ш}_i}^2}\ , \tag{8}$$

где D — наружный диаметр шины;

$R_{\text{пр}}$ — приведенный радиус профиля шины, м:

$$R_{\text{пр}} = (B + H)/2{,}5; \tag{9}$$

B — ширина профиля шины, м;

$H = (D - d)/2$ — высота профиля шины, м;

d — номинальный посадочный диаметр обода, м;

$$c_3 = \frac{20{,}5}{11{,}9 + \left|\frac{D}{B} - \frac{|n-9|}{2} - 3\right|}; \tag{10}$$

При этом размеры шин D, B и норма слойности n приведены в таблице А.1 ГОСТ 7463-2003 [4], а значение $[f_{\text{ш}}]$ можно ориентировочно определить по известной формуле

$$[f_{\text{ш}}] \approx D/2 - r_{\text{ст}}, \tag{11}$$

где $r_{\text{ст}}$ — статический радиус (ГОСТ 7463-2003).

Использование данного метода привлекательно тем, что параметры УХШ — коэффициенты c_1 (м^2/кН) и c_2 (1/м), определяемые расчетом по формулам (2)–(5) и из

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

линейного графика УХШ, построенного в системе координат (ХОУ), где $x = f/\left(p_{\text{w}} - p_0\right)$ и $y = f^2/G_к$, совместно с коэффициентом p_0 (кПа), определяемым нормой слойности n шины, являются для каждой шины постоянными. Они позволяют рассчитать нормальный прогиб шины, линейные размеры пятна контакта протектора шины: ширину $b_к$ и длину $a_к$ и контурную площадь пятна контакта на ровном жестком основании $F_к$ для любого сочетания нормальной нагрузки на шину $G_к$ и внутришинного давления воздуха p_{w}. При этом все точки нагрузочных режимов эксплуатации шины, определяемые сочетанием $G_к$ и p_{w}, располагаются на линейном графике УХШ. В основе определения параметров УХШ лежат данные статических испытаний шины, которые приведены в ГОСТ 7463-2003 [4], либо на сайтах производителей шин.

В тоже время недостатком данного способа является неопределенность такого параметра, как норма слойности шины n, для большинства современных радиальных шин производители не указывают данный параметр, а это осложняет возможность пользования данным способом и порождает определенную неуверенность в адекватности расчетов.

Исследователь А. Ю. Ребров предложил способ идентификации расчетного значения контурной площади пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием, введя вместо конструктивного параметра «нормы слойности n» условную величину n_{c}, характеризующую жесткость каркасы шины, и коэффициент идентификации k_{F} расчетного значения контурной площади ее действительному значению, номинальное значение которой дают, например, широко известные производители зарубежных шин.

А. Ю. Ребров выявил, что математическая модель В. Л. Бидермана хорошо описывает шину при ее относительной радиальной деформации 18–22%, в то время как шины IF и VF имеют существенно большие прогибы вследствие своей высокой эластичности.

По А. Ю. Реброву критерием сходимости результатов моделирования и реальных данных является равенство расчетной и действительной контурной площади пятна контакта шины с жестким основанием.

Коэффициенты c_1, c_2 и p_0 зависят от ряда параметров шины. Это наружный диаметр колеса (D), ширина профиля шины (B), статический радиус (r_{CT}), минимально допустимое давление в шине ($p_{\text{ш.min}}$), максимально допустимая нагрузка при минимально допустимом давлении (Q_{pmin}), максимально допустимое давление в шине ($p_{\text{ш.max}}$), максимально допустимая нагрузка при максимально допустимом давлении (Q_{pmax}), посадочный диаметр шины (d) и норма слойности (n). Учитывая, что показатель нормы слойности в технических данных для радиальных шин не указывается, А. Ю. Ребров предложил адаптировать модель тракторных шин В. Л. Бидермана, используя показатель контурной площади пятна контакта.

Однако, для шин IF и VF идентифицировать норму слойности таким образом, чтобы расчетная и действительная контурные площади пятна контакта шины с жестким основанием совпадали при нагружении шины по линии, соединяющей точки ($p_{\text{ш.min}}$; Q_{pmin}) и ($p_{\text{ш.max}}$; Q_{pmax}), то есть по ее нагрузочной характеристике не удавалось. Погрешность расчетов достигала 24%.

По А. Ю. Реброву первоначально в расчетах норма слойности для модели выбирается таким образом, чтобы исключить комплексные значения при расчетах по зависимости (1). После определения контурной площади пятна контакта шины с жестким основанием в соответствии с (1–10) определяется коэффициент:

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

$$k_F = \frac{F_{кр}}{F_{кн}}, \tag{12}$$

где $F_{кр}$ — расчетная контурная площадь пятна контакта шины (7);

$F_{кн}$ — номинальная контурная площадь пятна контакта шины, по данным испытаний производителя. Затем корректируется зависимости (9) и (10) следующим образом:

$$R_{пр} = \frac{B+H}{2,5 \cdot k_F}, \tag{13}$$

$$c_3 = \frac{\frac{20,5}{\sqrt{k_F}}}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - \frac{|n_c - 9|}{2} - 3 \right|} \tag{14}$$

Далее после замены выражений (9) и (10) на (13) и (14) численным методом определяется норма слойности n_c из уравнения:

$$\frac{F_{кр}}{10000} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\frac{20,5}{\sqrt{k_F}}}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - \frac{|n_c - 9|}{2} - 3 \right|} \cdot \sqrt{D \cdot f_ш - f_ш^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{B+H}{2,5 \cdot k_F} \cdot f_ш - f_ш^2}, \tag{15}$$

где $f_ш$ — статический прогиб шины.

Следует отметить, что по А. Ю. Реброву норма слойности n_c является условным показателем и может принимать любые (не обязательно целочисленные) значения. Значения номинальной контурной площади пятна контакта для одного и того же типоразмера шины с весьма близкими размерами может отличаться на величину до 40% [5]. Не всегда контурная площадь пятна контакта шин IF и VF больше, чем у обычных радиальных шин того же типоразмера. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо обращаться к данным производителя и проводить идентификацию. Идентифицированные значения коэффициента k_F показывают, что до корректирования зависимостей (9) и (10) расчетная контурная площадь пятна контакта может отличаться от действительной в большую и меньшую стороны. Таким образом, предложенный А. Ю. Ребровым метод идентификации тракторных сельскохозяйственных шин категорий IF и VF с использованием известной математической модели В. Л. Бидермана [3], построенной на универсальной нагрузочной характеристике шин, позволяет определить коэффициенты k_F, c_3 и n_c модели из условия равенства расчетной и действительной контурной площади пятна контакта шины с жестким опорным основанием $F_{кр} = F_{кн}$.

Предложенный метод идентификации радиальных шин, выполненных по традиционной технологии, а также шин категорий IF и VF, обладает высокой точностью. Разность между расчетной и действительной контурной площадью пятна контакта с жестким основанием при номинальной нагрузке составляет ±2 см^2 [5].

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

Таким образом, предложенный А. Ю. Ребровым метод корректен относительно номинальных режимов нагружения шины, соответствующих точкам нагрузочной характеристики, рекомендуемой производителями по условию допустимого статического прогиба шины, то есть при условии, что и площадь в этом случае является величиной постоянной, определяемой как «номинальная контурная площадь» контакта протектора шины с жестким опорным основанием. А будет ли подобный подход корректен в том случае, если потребуется рассчитать контурную площадь пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием, например, в режиме «недогрузки шины»? То есть, если при установленном давлении в шинах штатная нагрузка на нее будет меньше рекомендуемой, то следует оценить соответствует ли давление под данной шиной экологическим требованиям по воздействию на почву и, если не соответствует, тогда следует снизить внутришинное давление, но не ниже уровня допустимого статического прогиба и, соответственно, номинальной контурной площади пятна контакта протектора шины.

В тоже время критерием возможности использования предложенного расчетного метода определения контурной площади пятна контакта протектора шины с ровной жесткой поверхностью с использованием параметров УХШ является идентичность расчетного и действительного характеров влияния внутришинного давления воздуха на контурную площадь. Кроме того, следует оценить погрешность способов оценки значения контурной площади пятна контакта протектора шины, получаемого согласно рекомендуемому экспериментальному методу по ГОСТ 7057-81 [2]. А сегодня, как было сказано выше, метод оценки значения контурной площади пятна контакта протектора шины четко не регламентирован: это может быть как инструментальный метод измерения площади пятна контакта, так и метод расчета площади пятна контакта по замеренным инструментальными средствами линейным параметрам пятна контакта — $a_к$ и $b_к$.

Материал и методы исследования

Цель исследования. Снижение значения показателя воздействия движителя колесного трактора на почву применением рационального внутришинного давления воздуха, определяющим для фактической нормальной нагрузки на колесо максимальное значение контурной площади контакта протектора шины по условию допустимого нормального прогиба шины.

Задачи исследования

1. Определить экспериментально и теоретически с помощью метода с использованием параметров УХШ влияние внутришинного давления воздуха на линейные размеры и контурную площадь пятна контакта протектора шин с жестким опорным основанием.

2. Оценить погрешность инструментальных средств «Измерить расстояние» и «Измерить площадь» компьютерной программы «Kompas-3D» V13 и расчетных способов оценки линейных размеров и контурной площади пятна контакта протектора шины на жестком опорном основании.

Объекты исследований

Трактор — *МТЗ-1025.2:*

–шина ПЛК (переднее левое колесо) — 360/70R24 «Бел-89» ТУ 6700016217.178-2003 12,2-18 «Belshina» 2,5 bar maks 106R 000032;

–шина ЗПК (заднее правое колесо) — 18,4R34 мод. Ф-11 ГОСТ 7463 «Belshina» 2,5 bar maks 106R 000045.

Порядок проведения статических испытаний шины без демонтажа с трактора

1. Массу, создающую штатную нагрузку на отдельное колесо трактора определяли при эксплуатационной массе трактора поочередным взвешиванием каждого колеса трактора на тензометрической весовой площадке (ТВП), в то время, как другие три колеса установлены на брусках–опорах, имитирующих габариты ТВП в плане и по высоте с разницей ±5 мм. Поочередно, поднимая домкратом необходимое колесо и заменяя брусок–опору на ТВП, устанавливали центр ТВП под центр колеса, а на место ее предыдущего положения устанавливали имитатор (брусок–опору). Плавно опуская домкратом колесо на ТВП, убеждались в полной разгрузке штока домкрата и в этом положении с помощью информационно-измерительной системы БИК-М фиксировалась весовая нагрузка. Повторность измерения трехкратная. Положение колес соответствовало прямолинейному движению трактора. Рычаг переключения передач устанавливался на низшую передачу, а колеса ведущего моста были заблокированы и заторможены.

2. Пятно контакта для каждого объекта статических испытаний определялось по методике, изложенной в ГОСТ 7057-81 [2], для трех различных значений внутришинного давления в рекомендуемом диапазоне его изменения для данной шины.

3. Длину, ширину и условную контурную площадь пятна контакта протектора шины определяли непосредственно путем инструментального измерения размеров $a_к$ и $b_к$ полученного отпечатка пятна контакта шины, а также опосредованно, используя высокоточные программные инструментальные средства «Измерить расстояние» и «Измерить площадь», измерением на экране ПЭВМ по цифровой фотографии отпечатка, либо расчетным путем, идентифицируя линейные размеры пятна контакта (длину и ширину с соответствующими осями эллипса $a_к$ и $b_к$, за $b_к$ принимается наибольший размер отпечатка в плоскости, перпендикулярной направлению вращения колеса, по формуле (7).

4. Расчет линейных размеров пятна контакта протектора шины по способу с использованием параметров универсальной характеристики шины (УХШ) производился по формулам (8), при этом нормальный статический прогиб $f_{ш_i}$, соответствующий штатной статической нагрузке на колесо при соответствующем давлении воздуха в шине p_{w_i} определялся по формуле (6) и экспериментально по формуле, идентичной (11).

5. Статический радиус $r_{ст\,i}$ шины при заданном внутришинном давлении p_{w_i} определяли по ГОСТ 26000-83 [6] с помощью металлической линейки по вертикали при совмещении ее нулевой отметки с ровной опорной плоскостью. Измеренное значение статического радиуса определялось с точностью ±1 мм по точке на линейке от луча лазерного уровня «LEVELPRO3», установленного горизонтально с внешней стороны колеса и совмещенного предварительно до измерения с центрирующим отверстием на оси колеса.

Для решения поставленных задач нами проведено экспериментальное исследование по оценке влияния внутришинного давления на изменение линейных размеров и условной контурной площади пятна контакта протектора шин переднего и заднего моста трактора МТЗ-1025.2.

Определение линейных размеров $a_{к_i}$ и $b_{к_i}$, условной контурной площади контакта шин $F_{к_i}$ переднего левого колеса (ПЛК) и заднего правого колеса (ЗПК) трактора МТЗ-1025.2 при заданном внутришинном давлении воздуха p_{w_i} производилось путем снятия отпечатка шины на ровном опорном основании по методике согласно ГОСТ 7057-81 [2].

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

Поверхность жесткого основания, на котором получали отпечаток пятна контакта протектора шины имела уклон не более 1° в любую сторону, высота неровностей не превышала ±1,5 мм, а внутришинное давление колеса с противоположной стороны трактора устанавливалось одинаковым с шиной оцениваемого колеса на соответствующем мосту трактора.

Для получения отпечатка пятна контакта соответствующее колесо поднималось домкратом до отрыва от опорной поверхности и поверхность грунтозацепов шины смазывалась гуталином. Многократным опусканием колеса с его поворотом перед каждым опусканием на угол, соответствующий ширине грунтозацепа, получали сплошной отпечаток пятна контакта шины на плотной бумаге (Рисунок 1).

а ***б*** ***в***

г ***д*** ***е***

Рисунок 1. Образцы отпечатков контакта протектора шин колес трактора МТЗ-1025.2 под штатной нагрузкой и при различных значениях давления воздуха в шинах: переднего левого колеса (ПЛК) с шиной *360/70R24* – ***а***) p_w = 80 кПа; ***б***) p_w = 135 кПа; ***в***) p_w = 155 кПа и заднего правого колеса (ЗПК) с шиной *18,4R34* – ***г***) p_w = 80 кПа; ***д***) p_w = 110 кПа; ***е***) p_w = 145 кПа.

Размеры отпечатка (длина $a_к$ и ширина $b_к$) определялись непосредственным измерением с полученных отпечатков рулеткой и с помощью инструментальных средств «Измерить расстояние», а условная контурная площадь — «Измерить площадь» компьютерной программы «Kompas-3D» V13 с цифровой фотографии отпечатка. На отпечатке при его фотографировании закреплялся квадрат из миллиметровки размерами 100×100 мм, который служил для определения масштабирования и погрешности измерений размеров и площади отпечатка в среде программы «Kompas-3D» V13 (Рисунок 1).

Измеренные параметры сравнивались с теоретическим расчетами параметров пятна контакта протектора шин — длины $a_{к_i}$, ширины $b_{к_i}$ и площади $F_{к_i}$, полученных с использованием параметров УХШ, а относительная погрешность метода определялась по отношению к базовому методу.

В качестве последнего были приняты: для определения линейных размеров пятна контакта метод непосредственного измерения рулеткой с точностью ±1 мм, а для

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

определения условной контурной площади пятна контакта — метод опосредованного измерения по цифровой фотографии на экране персонального компьютера с помощью инструментального средства «Измерить площадь» в среде программы «Kompas-3D» V13.

В наших исследованиях оценка точности сравниваемых методов определения контурной площади пятна контакта шины осуществлялась для следующих способов:

1) непосредственно измерением, используя цифровую фотографию отпечатка пятна контакта шины в среде программы «Kompas-3D» V13 и ее инструментальное средство «Измерить площадь» с определением масштабирования с помощью квадрата из миллиметровки 100×100 мм;

2) расчетом по формуле (7), используя длину $a_{к\ 1}$ и ширину $b_{к\ 1}$ пятна контакта шины, измеренные рулеткой непосредственно по полученному отпечатку;

3) расчетом по формуле (7), используя длину $a_{к\ 2}$ и ширину $b_{к\ 2}$ пятна контакта шины, определенные по его цифровой фотографии в среде программы «Kompas-3D» V13 с определением масштабирования с помощью квадрата из миллиметровки 100×100 мм;

4) расчетом по формулам (7) и (8), используя длину $a_{к\ 3}$ и ширину $b_{к\ 3}$ пятна контакта шины, определенные расчетом с использованием параметров УХШ по формулам (2)–(6), (9)–(11).

Погрешность измерения размеров и площади данными способами оценивалась:

– по способу 1 измерения размеров — относительной погрешностью мерительного инструмента (металлической рулетки) при непосредственном измерении размеров полученного отпечатка пятна контакта шины, а по способу 1 измерения площади — относительной ошибкой определения площади квадрата из миллиметровки 100×100 мм (то есть известной площади — 10000 мм^2) с помощью инструментального средства «Измерить площадь» программы «Kompas-3D» V13;

– по способу 2 опосредованного измерения размеров — относительной ошибкой определения размеров квадрата из миллиметровки 100×100 мм с помощью инструментального средства «Измерить расстояние» программы «Kompas-3D» V13, а по расчетному способу 2 определения площади пятна контакта — относительной погрешностью относительно базового способа 1 измерения площади, как наиболее точно отражающего величину условной контурной площади пятна контакта;

– по 3 расчетному способу определения размеров пятна контакта — относительной погрешностью относительно базового способа 1 измерения размеров пятна контакта;

– по расчетным способам 3 и 4 — определения величины условной контурной площади пятна контакта — относительной ошибкой по отношению к величине контурной площади, определенной измерительным способом 1, принятым за базовый.

Для расчета взаимодействия ходовых систем тракторов с деформируемым опорным основанием при использовании предложенного метода и с учетом радиальной нагрузки и давления в шинах можно воспользоваться рекомендациями ГОСТ 26953 [1], согласно которому площадь контакта шины единичного колеса, приведенная к условиям работы на почвенном основании определяется по формуле [1 , с. 2]:

$$F_{кп} = F_к \cdot K_1 \ , \tag{16}$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса [1, с. 3]

Среднее расчетное $\bar{q}_к$ и максимальное давления для шин колесного трактора определяются по формулам [1, с. 3]:

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

$$\bar{q}_{к} = \frac{G_{к}}{F_{кп}} = \frac{m_{к} \cdot g}{10^3 \cdot F_{кп}} \; ; \tag{17}$$

$$q_{max}^{к} = \bar{q}_{к} \cdot K_2 = \frac{G_{к}}{F_{кп}} \cdot K_2 = \frac{G_{к} \cdot K_2}{F_{к} \cdot K_1} \; , \tag{18}$$

где K_2 — коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины, K_2 = 1,5 [1, с. 3].

Показатель воздействия на почву одиночного колеса U_i (кН/м), соответствующий максимальному нормальному давлению $q_{max}^{к}$ определяется по формуле [3, с. 207]:

$$U_i = 1,25 \cdot B \cdot q_{max}^{к} \tag{19}$$

Таким образом, погрешность определения условной контурной площади пятна контакта протектора шины с ровным жестким опорным основанием тем или иным методом по отношению к базовому определяет при прочих равных условиях и погрешность определения таких показателей воздействия на почву, как $q_{max}^{к}$ и U_i в случае использования при их определении этих методов.

Результаты и обсуждение

Результаты различных способов измерений и определения расчетом линейных размеров и площади отпечатков с оценкой сравнительной погрешности определения по отношению к базовому (основному) методу сведены в Таблицы 1 и 2. А на Рисунках 2 и 3 графики изменения данных параметров пятна контакта протектора шин для переднего (ПЛК) и заднего (ЗПК) мостов трактора МТЗ-1025.2 от внутришинного давления воздуха.

Таблица 1.

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПЯТНА КОНТАКТА ПРОТЕКТОРА ШИН ОТ ВНУТРИШИННОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ПЕРЕДНЕГО (ПЛК с шиной 360/70R24) И ЗАДНЕГО (ЗПК с шиной 18,4R34) МОСТОВ ТРАКТОРА МТЗ-1025.2, ОПРЕДЕЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ, С ОЦЕНКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО БАЗОВОГО СПОСОБА

Внутри-шинное давление воздуха	*Действительные линейные размеры отпечатка, мм*		*Измерение линейных размеров отпечатка в «Kompas», мм*		*Линейные размеры отпечатка по УХШ, мм*	
p_w, кПа	$a_{к1}$	$b_{к1}$	$a_{к2}$	$b_{к2}$	$a_{к3}$	$b_{к3}$
					n = 8	
ПЛК – 360/70R24 «Бел-89» ТУ 6700016217.178-2003 12,2-18 «Belshina» 2,5 bar maks 106R 000032						
80	302	320	303,6	320,7	354	272
	0	*0*	*0,53*	*0,22*	*17,22*	*−15,00*
135	256	305	259,5	307,6	333	258
	0	*0*	*1,37*	*0,85*	*30,08*	*−15,41*
155	255	292	255,2	290,5	329	255
	0	*0*	*0,08*	*−0,51*	*29,02*	*−12,67*
ЗПК 18,4R34 мод. Ф-11 ГОСТ 7463 «Belshina» 2,5 бар maks 106R 000045						
80	510	400	503,1	403,9	511	374

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

Внутри-шинное давление воздуха	*Действительные линейные размеры отпечатка, мм*		*Измерение линейных размеров отпечатка в «Kompas», мм*		*Линейные размеры отпечатка по УХШ, мм*	
p_w, кПа	$a_{к1}$	$b_{к1}$	$a_{к2}$	$b_{к2}$	$a_{к3}$	$b_{к3}$
					***n* = 8**	
	0	*0*	*−1,35*	*0,97*	*0,20*	*−6,50*
110	460	376	465,8	381,8	491	360
	0	*0*	*1,26*	*1,54*	*6,74*	*−4,26*
145	415	343	415,2	346,7	476	350
	0	*0*	*0,05*	*1,08*	*14,70*	*2,04*

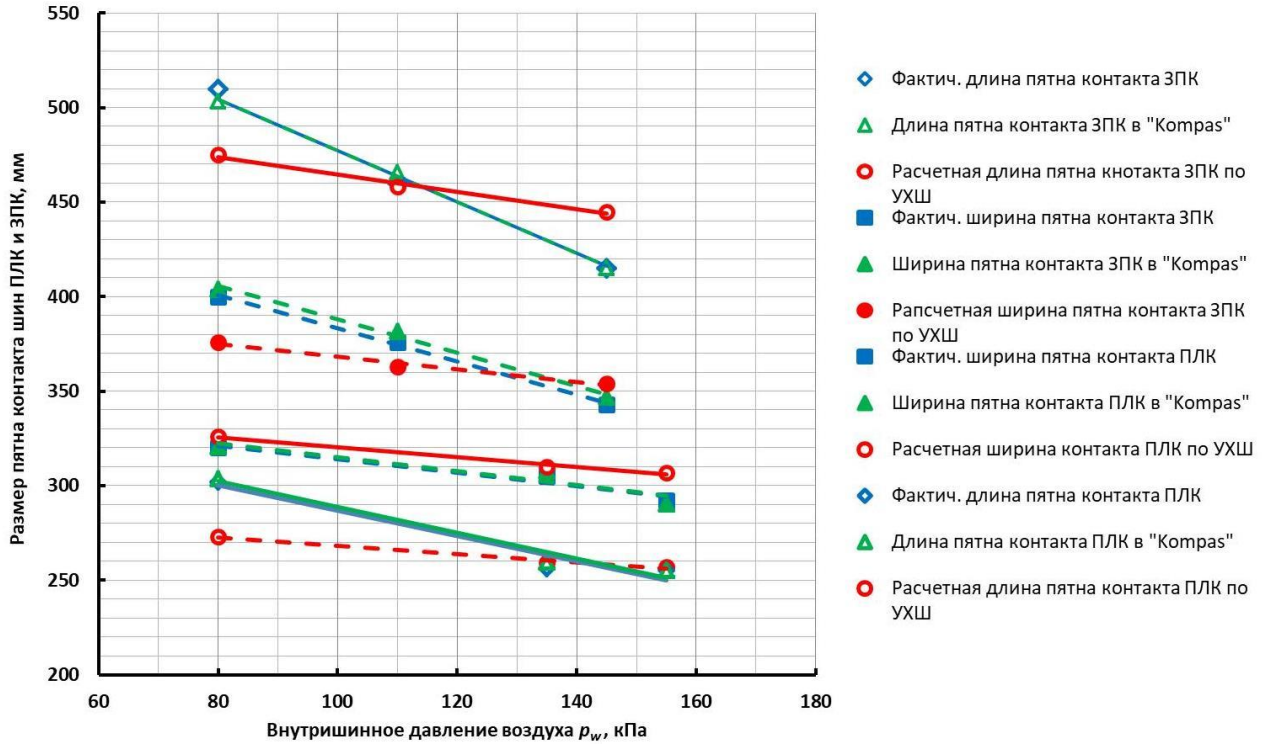

Рисунок 2. Изменение размеров пятна контакта протектора шин переднего (ПЛК — *360/70R24*) и заднего (ЗПК — *18,4R34*) мостов трактора МТЗ-1025.2, определенных различными способами: по Таблице 1: 1 способ, базовый инструментальный и 2 способ, опосредованный компьютерный, 3-й способ расчетный с использованием параметров УХШ.

Из анализа Таблицы 1 и Рисунка 2 следует, что опосредованный, компьютерный способ измерения в программе «Kompas» линейных размеров пятна контакта шин (столбцы 4 и 5) по цифровой его фотографии обеспечивает достаточно малую погрешность относительно базового, инструментального непосредственного способа измерения (столбцы 2 и 3). А расчетный способ определения линейных размеров отпечатка по параметрам УХШ (столбцы 6 и 7) дает погрешность с завышением размера по длине на 17,22 … 30,08% и с занижением по щирине на −12,67 … −15,41% для шины 360/70R24, а по шине 18,4R34 погрешность с завышением по длине пятна контакта изменяется от 0,20 до 14,70%, а по ширине пятна контакта от −6,50 до 2,04% при изменении внутришинного давления от 80 до 145 для ПЛК и до 155 кПа для ЗПК.

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

Таблица 2.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПЯТНА КОНТАКТА ПРОТЕКТОРА ШИН ОТ ВНУТРИШИННОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ПЕРЕДНЕГО (ПЛК с шиной *360/70R24*) И ЗАДНЕГО (ЗПК с шиной *18,4R34*) МОСТОВ ТРАКТОРА МТЗ-1025.2, ОПРЕДЕЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ, С ОЦЕНКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО БАЗОВОГО СПОСОБА

Внутри-шинное давление воздуха	*Измерение площади в «Kompas», мм²*		*Расчет площади по действительным линейным размерам, мм²*		*Расчет площади по линейным размерам отпечатка в «Kompas», мм²*		*Расчет площади по линейным размерам, определенным по УХШ, мм²*	$\frac{F_{к\,4}}{F_{к\,1}}$	$\frac{F_{к\,2}}{F_{к\,1}}$
p_w, кПа	$F_{к\,1}$	$F_{100\,1}$	$F_{к\,2}$	$F_{100\,2}$	$F_{к\,3}$	$F_{100\,3}$	$F_{к\,4}$ $n = 8$	k_F	k_F
ПЛК — 360/70R24 «Бел-89» ТУ 6700016217.178-2003 12,2-18 «Belshina» 2,5 bar maks 106R 000032								$k_{F\,1}$	$k_{F\,2}$
80	82222,0	10111,4	75900,9	10000	76469,9	10056,0	75273	0,92	0,92
	0	*1,11*	*−7,69*	*0*	*−7,0*	*0,56*	*−8,45*		
135	65301,3	10003,8	61323,9	10000	62692,2	10011,0	67526	1,03	0,94
	0	*0,04*	*−6,09*	*0*	*−4,0*	*0,11*	*3,41*		
155	60710,7	10000,3	58480,7	10000	58226,0	10048,1	65980	1,09	0,96
	0	*0,003*	*−3,67*	*0*	*−4,09*	*0,48*	*8,68*		
ЗПК 18,4R34 мод. Ф-11 ГОСТ 7463 «Belshina» 2,5 бар maks 106R 000045								$k_{F\,3}$	$k_{F\,4}$
80	169925,8	10030,7	160221,2	10000	159594,5	9998,0	150081	0,88	0,94
	0	*0,31*	*−5,71*	*0*	*−6,08*	*−0,002*	*−11,68*		
110	142534,5	10042,6	135842,5	10000	139677,1	10023,0	138833	0,97	0,95
	0	*0,43*	*−4,70*	*0*	*−2,0*	*0,23*	*−2,60*		
145	114878,6	10019,9	111797,5	10000	113057,9	9926,1	130762	1,14	0,97
	0	*0,20*	*−2,68*	*0*	*−1,58*	*−0,74*	*13,83*		

Большая величина погрешности при определении линейных размеров расчетными способами для шины меньшего диаметра, очевидно, связана с тем, что отпечаток пятна контакта в задней его части в меньшей степени адекватен форме эллипса по сравнению с шиной большего диаметра (Рисунок 1).

Величины контурной площади пятна контакта протектора оцениваемых шин в зависимости от внутришинного давления воздуха для 4 различных способов ее оценки представлены в Таблице 2 первой строкой, соответствующей определенному давлению в шине, а во второй строке, выделенной курсивом представлены ошибки ее определения 4 способами относительно 1 базового способа (условная ошибка определения равна нулю) ее опосредованного определения с помощью компьютерной программы.

Графики изменения площади пятна контакта, определенные 4 способами для обеих шин представлены на Рисунке 3.

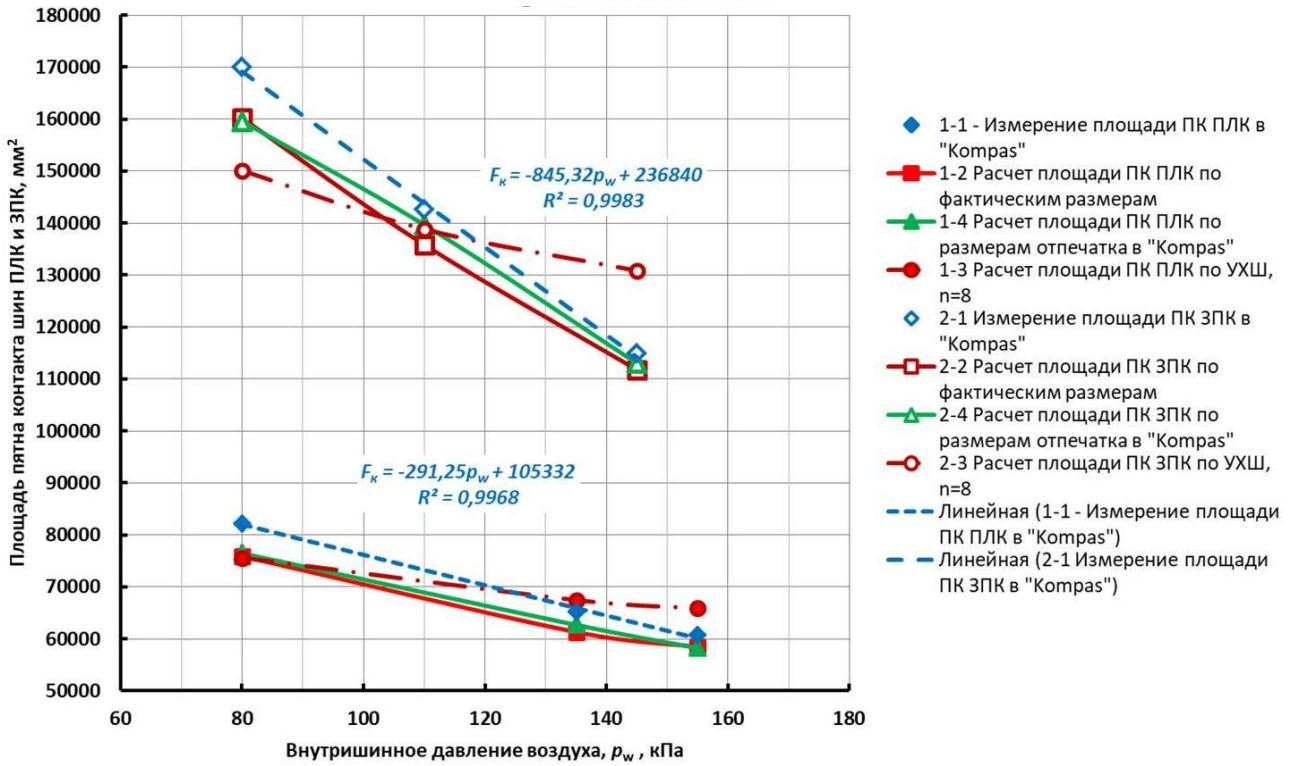

Рисунок 3. Изменение контурной площади пятна контакта шин переднего (ПЛК — *360/70R24*) и заднего (ЗПК — *18,4R34*) мостов трактора МТЗ-1025.2 на жестком опорном основании, определенной различными 4 способами.

Характер зависимости контурной площади обратный, близкий к линейному, то есть с ростом внутришинного давления величина контурной площади контакта снижается, а для шины 360/70R24 стремится к некоторой стабилизации, но, тем не менее, на всем исследованном диапазоне давления может быть аппроксимирован линейной зависимостью для обеих шин, о чем свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации R2 = 0.9968 … 0.9983 линий тренда (прерывистые линии) зависимости по базовому способу определения Fк 1. При уменьшении давления со 155 и 145 кПа до 80 кПа величина контурной площади пятна контакта увеличивается для шины переднего моста на 35,43%, а для шины заднего моста — на 47,92%, что, соответственно, определяет снижение величины максимального нормального давления на почву. Основной способ определения контурной площади отпечатка в программе «Kompas» (столбец 3 Таблицы 2), как и расчетный способ определения контурной площади отпечатка по его линейным размерам, определенным в «Kompas» (столбец 7 Таблицы 2), характеризуются примерно одинаковой низкой погрешностью определения данными способами площади квадрата 100×100 мм, закрепленном в центре отпечатка при его фотографировании (Таблица 2, столбцы 3 и 7) относительно площади квадрата, определенной расчетом по его фактическим размерам (Таблица 2, столбец 5). Погрешность определения площади данными способами не превышает 1,5%, уровня регламентируемого ГОСТ 7057-81 [2].

Существенно большая погрешность расчетных способов определения контурной площади отпечатка (столбцы 4, 6, и 8 Таблицы 2) по отношению к измерительному опосредованному способу (столбец 2 Таблицы 2), принятому за базовый, самому характеризуемому точностью определения площади квадрата 100×100 мм данным способом (столбец 3 Таблицы 2), связана, в основном, с некоторой неадекватностью идентификации фактической формы отпечатка с формой эллипса. При этом погрешность (столбцы 4 и 6

Т. 5. №6. 2019
DOI: 10.33619/2414-2948/43

Таблицы 2) достигает в сторону занижения — 7,69% для шины 360/70R24, а для шины 18,4R34 она равна — 6,08%.

Расчеты площади отпечатков по 4 способу с использованием параметров УХШ и погрешность ее определения по отношению к основному методу (столбец 8 Таблицы 2) произведены для данных шин при норме слойности n = 8 и показывают несколько большую погрешность. Причем в начале исследуемого диапазона внутришинного давления воздуха значения контурной площади контакта шины 360/70R24 по 4 способу занижаются на −8,45%, а в конце диапазона почти симметрично завышаются (+8,68%). Для шины 18,4R34 в начале исследованного диапазона давления воздуха в шине pw занижение площади Fк 4 составляет −11,68%, а в конце диапазона завышение составляет +13,83%. В середине диапазона погрешность определения площади контакта 4-м способом для шины 360/70R24 не превышает +3,41%, а для шины 18,4R34 — не превышает −2,60%.

Таким образом, как видно из столбцов 9 и 10 Таблицы 2, в которых рассчитан коэффициент идентификации расчетных 2 и 4 способов определения контурной площади пятна контакта видно, что в случае «недогруза» коэффициент kF, предлагаемый Ребровым А. Ю., является величиной переменной и может быть аппроксимирован линейной зависимостью (Рисунок 4), о чем свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации R2 = 0,862 … 0,998.

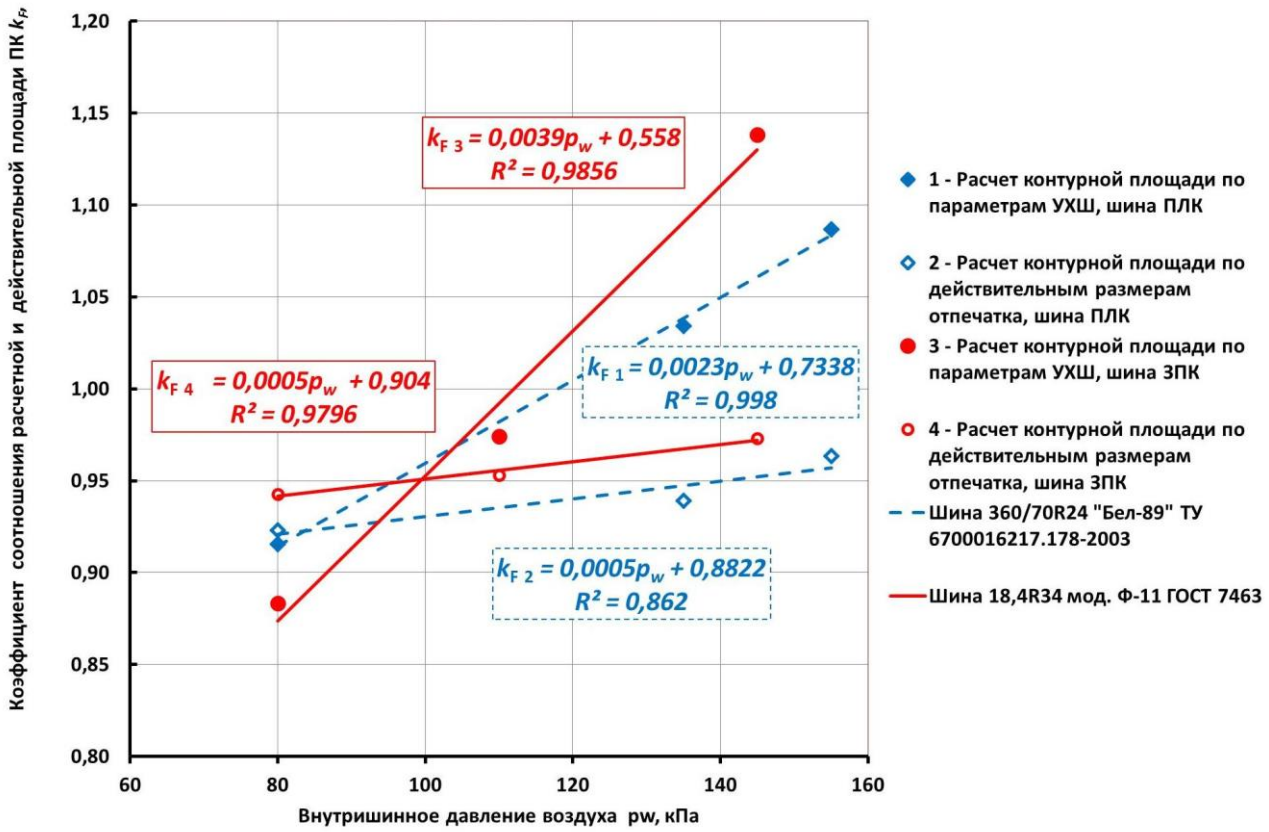

Рисунок 4. Зависимость коэффициента идентификации k_F расчетного способа оценки контурной площади пятна контакта протектора шины на жестком опорном основании от внутришинного давления p_w при $n = 8$ для штатной нагрузки на мосты трактора МТЗ-1025.2.

Выводы

1. Действительный и расчетный по модели Л. В. Бидермана характер изменения контурной площади пятна контакта протектора шины от внутришинного давления

показывают их обратную линейную зависимость. При этом уменьшая внутришинное давление в шинах со 155 и 145 кПа до 80 кПа при штатных нагрузках для испытанного трактора МТЗ-1025.2, можно увеличить площадь контакта с жестким опорным основанием и, соответственно, максимальное нормальное давление q_{max} и показатель воздействия на почву U для передних колес с шинами 360/70R24 на 35,43%, а для колес заднего моста с шинами 18,4R34 — на 47,92%.

2. С достаточной для инженерной практики точностью при определении контурной площади контакта шин (и, как следствие, определении максимального давления на почву q_{max} и показателя воздействия на почву колесного движителя U), можно воспользоваться нетрудоемким *четвертым способом* — расчетом f и соответственно контурной площади пятна контакта протектора шины на жестком опорном основании при известных константах УХШ, даже при условности определения нормы слойности современных радиальных шин *360/70R24* и *18,4R34* — ошибка при этом не превышает 8,7% и 13,8% .

3. Для полной идентификации данных расчетов контурной площади пятна контакта протектора современных тракторных шин с их действительной контурной площадью на жестком опорном основании, то есть для минимизации погрешности теоретического определения уровня воздействия пневмоколесных движителей на почву можно воспользоваться методическим подходом А. Ю. Реброва, как в режиме номинального нагружения шины, так и в случае «недогруза», аппроксимируя в последнем случае коэффициент идентификации принятого расчетного способа прямой линейной зависимостью.

4. Разработана в среде ППП Microsoft Excel программа расчета площади пятна контакта шины с жестким опорным основанием на основе расчета параметров универсальной характеристики шины и методика экспериментальной оценки контурной площади контакта шины без демонтажа с трактора, соответствующие 4 расчетному и 1 базовому способам определения контурной площади пятна контакта шины.

Проведенная оценка возможности использования метода расчетного определения условной контурной площади шины с использованием параметров универсальной характеристики шины показала, что он вполне может быть использован для сравнительной оценки техногенного механического воздействия на почву, завышая их значения при нижних значения рекомендуемых давлений воздуха в шине и занижая при верхних значениях рекомендуемого диапазона воздуха в ней, но не более 8 … 14%, что является вполне приемлемым для инженерных расчетов, так как вооружает инженера–исследователя методом определения контурной площади контакта протектора шины для любых, а не только номинальных режимов сочетаний нормальной нагрузки на шину и давлений воздуха в ней.

Для более точного заключения о распространении данных выводов и на другие сельскохозяйственные шины необходимо провести дополнительные исследования и расчеты для большого числа шин различного типа и размеров, что является одной из задач дальнейших исследований.

Список литературы:

1. ГОСТ 26953-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. М.: Издательство стандартов, 1986. 11 с.

2. ГОСТ 7057-81 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы испытания тракторов. М.: Издательство стандартов, 1981. 7 с.

3. Ксеневич И. П., Скотников В. А., Ляско М. И.. Ходовая система-почва-урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.

4. ГОСТ 7463-2003 Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 24 с.

5. Ребров Ю. А., Мигущенко Р. П. Использование информационных технологий при идентификации показателей инновационных тракторных сельскохозяйственных шин категорий IF и VF // Механіка та машинобудування. 2015. №1. С. 98-105.

6. ГОСТ 26000-83 Шины пневматические. Метод определения основных размеров. М.: Издательство стандартов, 1984. 3 с.

References:

1. GOST 26953-86 (1986) Agricultural mobile machinery. Methods for determining force produced by propelling agents on soil. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 11. (in Russian).

2. GOST 7057-81 (1981) Agricultural tractors. Test methods. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 7. (in Russian).

3. Ksenevich, I. P., Skotnikov, V. A., & Lyasko, M. I. (1985). Running system-soil-crop. Moscow, Agropromizdat, 304. (in Russian).

4. GOST 7463-2003 (2004) Pneumatic tyres for tractors and agricultural machinery. Specifications. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 24. (in Russian).

5. Rebrov Yu. A., & Miloshenko, G. P. (2015) Ispol'zovaniye informatsionnykh tekhnologiy pri identifikatsii pokazateley innovatsionnykh traktornykh sel'skokhozyaystvennykh shin kategoriy IF i VF. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*, (1), 98-105. (in Russian)

6. GOST 26000-83 (1983) Pneumatic tyre. Method of identifing of main sizes. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 3. (in Russian).

Работа поступила в редакцию 13.05.2019 г.

Принята к публикации 17.05.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Липкань А. В., Панасюк А. Н., Кашбулгаянов Р. А. Обоснование выбора способа определения параметров пятна контакта пневмоколесного движителя с опорным основанием // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №6. С. 212-228. https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27

Cite as (APA):

Lipkan, A., Panasyuk, A., & Kashbulgayanov, R. (2019). Rationale for Selecting a Method for Determining Parameters of the Contact Spot of Pneumatic Wheel Mover With Support Base. *Bulletin of Science and Practice, 5*(6), 212-228. https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27 (in Russian).