Тип статьи: научная
УДК 629.032; 631.372
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-4-74-83

ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА ШИНЫ С ОПОРОЙ, КАК ФУНКЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ И ВНУТРИШИННОГО ДАВЛЕНИЯ

Валерий Юрьевич Ревенко [1]***, Виктор Иосифовч Скорляков*** [2]***, Артем Борисович Иванов*** [3]

[1,2,3]*Росинформагротех, Р.п. Правдинский, Московская область, Россия*
[1]skskniish@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-0336-5323
[2]skorlv@yandex.ru
[3]artem_b_ivanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6462-6393

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

Реферат. *Комплексное повышение эффективности мобильной сельскохозяйственной техники невозможно без учета уровня воздействия её движителей на почву, при этом важнейшей целевой задачей является улучшение сцепных качеств тракторов и сельхозмашин, в том числе за счет увеличения размеров площади контакта движителя с опорным основанием. Размеры контактирующей поверхности на границе раздела грунт–шина будут определять удельное давление пневмоколесной техники на почву, которое в свою очередь определяет уровень экологической безопасности системы «механизированное средство – окружающая среда – урожай». В качестве объектов исследований были выбраны широко распространенные в РФ сельскохозяйственные шины, всего 22 варианта. Исследования проводили при уровнях вертикальной нагрузки от 10 до 60 кН и внутришинного давления от 50 до 500 кПа. В результате проведенных исследований авторами предложена методика определения контурной площади контакта современных колесных движителей, при изменении внешних (нагрузки на ось колеса) и внутренних (внутришинного давления) факторов. прогнозировать уровень воздействия на почву колесных движителей не только существующей, но и проектируемой техники. Уровень адекватности математической модели, рассчитанный по критерию эффективности моделирования Нэша–Сатклиффа, составил 0,991. Простота и достаточная для инженерных расчетов точность делают её вполне пригодной для практического использования.*

Ключевые слова. *колесный движитель, вертикальная нагрузка на ось, внутришинное давление, пятно контакта, площадь, математическая модель.*

TIRE AND SUPPORT AREA AS A FUNCTION OF VERTICAL LOAD AND TIRE PRESSURE

Valery Revenko [1]***, Victor Skorlyakov*** [2]***, Artem Ivanov*** [3]

[1, 2, 3]*Rosinformagrotekh. Pravdinsky Township, Moscow Region, Russian Federation*
[1]skskniish@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-0336-5323
[2]skorlv@yandex.ru
[3]artem_b_ivanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6462-6393

Abstract. *A comprehensive increase in the efficiency of mobile agricultural machinery is impossible without taking into account the level of impact of its movers on the soil, while the most important target is to improve the coupling qualities of tractors and agricultural machines, including by increasing the size of the contact area of the mover with the supporting base. The dimensions of the contact surface at the soil-tire interface will determine the specific pressure of the pneumatic wheeled equipment on the soil,*

which in turn determines the level of environmental safety of the "mechanized vehicle – environment – crop" system. Agricultural tires, widely used in the Russian Federation, were chosen as objects of research, in total 22 options. The studies were carried out at vertical load levels from 10 to 60 kN and tire pressure from 50 to 500 kPa. As a result of the research, the authors proposed a method for determining the contour area of the contact of modern wheel propellers, with a change in external (wheel axle load) and internal (in-tire pressure) factors. The level of adequacy of the mathematical model, calculated by the Nash–Sutcliff modeling efficiency criterion, was 0.991. Simplicity and sufficient accuracy for engineering calculations make it quite suitable for practical use.

Keywords: *wheel mover, vertical axle load, tire pressure, contact patch, area, mathematical model.*

Для цитирования: Ревенко В.Ю., Скорляков В.И., Иванов А.Б. Площадь контакта шины с опорой, как функция вертикальной нагрузки и внутришинного давления // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022. Т. 58, № 4. С. 74-83. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-74-83.

For citation: Revenko V., Skorlyakov V., Ivanov A. Tire and support as a function of vertical load and tire pressure// Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022; 58(4): 74-83. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-74-83.

Введение. В течение последних десятилетий размеры сельскохозяйственных шин постоянно увеличивались и в настоящее время достигли своего предела, обусловленного габаритными ограничениями современной тяжелой техники, передвигающейся по дорогам общего пользования. В то же время сохраняются негативные последствия переуплотнения почвы, вызванного перемещением той же техники по полям. Снизить уплотнение почвы, а следовательно, повысить урожайность выращиваемых на ней сельскохозяйственных культур, можно либо уменьшив нагрузку на ось колеса, либо увеличив площадь контакта колесных систем с опорной поверхностью [1]. Высокая сложность и энергонасыщенность современных машин не позволяет эффективно нивелировать действие первого фактора, а вот второй – вполне подлежит корректировке.

Постепенная эволюция шин от диагональных, к высокоэластичным радиальным позволила снизить нагрузку на почву за счет увеличения размеров контактирующей поверхности на границе раздела грунт–протектор. В настоящее время многие шины изготавливаются с использованием передовых технологий, которые позволяют им выдерживать высокие нагрузки, при относительно низком внутришинном давлении [2, 3]. Что в свою очередь увеличивает размер поверхности соприкосновения с опорой в сравнении с традиционными шинами. Инновационные конструкции резино-кордных оболочек шин способствуют оптимизации распределения напряжений в зоне их контакта с грунтом, снижая глубину колеи, а также уменьшая сопротивление качению и буксование [4, 5].

Таким образом, знание точного размера площади контакта движителей с почвой, а, следовательно, и величины контактных нормальных напряжений, является необходимым условием проведения сравнительной оценки как находящейся в эксплуатации, так и проектируемой техники [6].

В предыдущих наших исследованиях была предпринята попытка разработки математических моделей, связывающих величину площади контакта шины с размерными параметрами её резиново-кордной оболочки и величиной её деформации [7, 8]. Но, помимо размеров шин, на форму и размеры контактирующей поверхности существенное влияние оказывают также вертикальная нагрузка на колесо и величина давления воздуха в шинах.

В специализированной литературе по взаимодействию колесных систем с опорным основанием имеется довольно большое количество работ, описывающих "причинно-следственные связи" вышеперечисленных факторов с размерами контурной площади пятна контакта [9, 10, 11, 12]. Однако, основным их недостатком является слабая приспособленность для практических расчетов. Кроме того, насколько нам известно, никаких целенаправленных сравнений для шин разного типа, диаметра и ширины не проводилось, что затрудняет резюмировать общие выводы о

влиянии силовых воздействий и показателей эластичности на площадь контактной поверхности на границе раздела грунт–шина.

Цель данной работы – оценить влияние нагрузки на колесо, внутришинного давления, а также размерных характеристик шин на характер изменения контурной площади контакта современных сельскохозяйственных шин.

Материалы и методы.

В качестве объектов исследований были выбраны широко распространенные в РФ сельскохозяйственные шины размерности: 16,9R38; 23,1R26; 28LR26, 30,5L32, 66х43-25 и другие (всего 22 варианта). Исследования проводили при различных уровнях вертикальной нагрузки (от 10 до 60 кН) и внутришинного давления (от 50 до 500 кПа).

Измерения осуществляли на ровной бетонной площадке. Контурную площадь контакта протектора шины определяли в соответствии с ГОСТ 7057-81. Отпечаток получали путем многократного подъема и опускания колеса на металлический лист, толщиной 4 мм, до полного заполнения следами протектора пятна контакта. Нанесение мела на наружную поверхность грунтозацепов шины обеспечивало четкость отпечатка на черной поверхности листа. Полученный контур очерчивали кривой, охватывающей выступы (Рисунок 1).

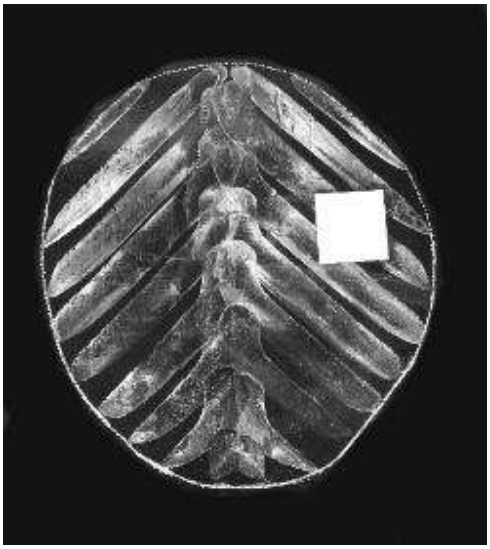

Рисунок 1 – Контурный отпечаток шины 30,5L32

Для определения площади контактной поверхности, отпечаток фотографировали с высоким разрешением цифровой фотокамерой. Далее, изображение преобразовывалось в монохромный формат и представлялось в виде прямоугольной матрицы *m x n*, где каждый элемент принимал значение 0 или 255. Для расчета площади, количество элементов матрицы со значением 0 суммировалось и умножалось на масштабный коэффициент. Для расчета масштабного коэффициента использовали тонкую пластиковую пластину в форме квадрата со стороной 100 мм Калибровочная пластина использовалась также для устранения погрешности расчета, вызванной возможным отклонением оптической оси фотокамеры от строгой вертикали относительно отпечатка. Такой подход позволил значительно снизить трудоемкость обработки экспериментальных данных и обеспечить точность расчета площади контактной поверхности ± 0,6 мм^2.

Диаметр ненагруженной шины рассчитывали по длине окружности, измеренной на центральной линии протектора. Ширину профиля определяли на поверхности боковин в 4-х равнорасположенных точках. Статический радиус нагруженной вертикальным усилием шины измеряли от плоскости опоры до центра колеса.

Вертикальную нагрузку на ось колесного движителя создавали с помощью специализированной мобильной лабораторной установки «колесо-почва». Нагрузку изменяли дискретно, с шагом в 10 кН, до верхнего предела нагружения в 60 кН. Внутришинное давление выставляли с помощью образцового манометра.

Результаты и обсуждение. Размеры и форма пятен контакта протектора приведены на рисунке 2, на котором отчетливо видно, что их форма изменяется от овальной (при высоком давлении воздуха в шине и небольшой вертикальной нагрузке на ось), до прямоугольной – при понижении внутришинного давления и росте вертикальной нагрузки.

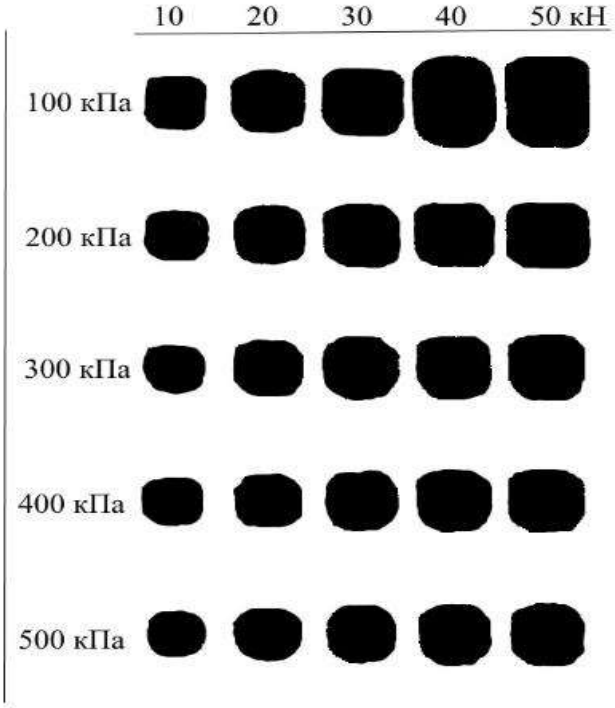

Рисунок 2 – Размеры и форма отпечатков протектора шин 600x65R38 на твердой поверхности

Характер изменения корреляционной связи «внутришинное давление – контурная площадь контакта» приведен на рисунке 3. Каждая из кривых приведенного графика соответствует своей величине вертикальной нагрузки на шину в 10, 20, 30, 40 и 50 кН. Причем, при аппроксимации их степенными линиями тренда получено довольно высокое значение коэффициента детерминации R^2: от 0,911 до 0,979. Степенная функция хорошо описывает и физический смысл характера взаимодействия протектора с опорой – с ростом внутришинного давления зона контакта вначале стремительно снижается, а затем интенсивность данного процесса замедляется и в конечном счете стремится к какому-либо конечному значению (асимптотически приближаясь к горизонтали), но не к нулю, как в случае с линейной зависимостью. Использование последней в виде аппроксимирующей функции не совсем корректно. Тем не менее, многие исследователи проводят «сглаживание» по трем точкам, чего явно недостаточно для получения и описания объективной картины происходящих явлений и процессов [13].

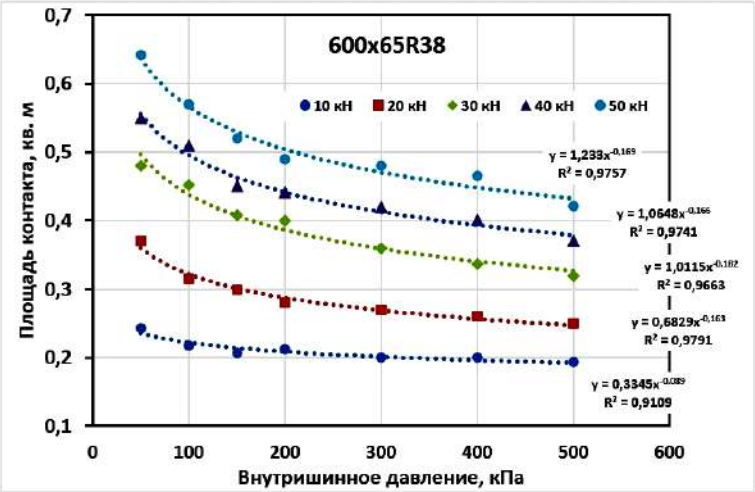

Рисунок 3 – Изменение площади пятна контакта при вертикальных нагрузках на ось колеса в 10, 20, 30,40 и 50 кН

Отдельно следует заметить, что выявленный нами характер связи «контурной площади контакта с внутришинным давлением» присущ не только данному конкретному типоразмеру шин, но и всем испытанным как нами, так и другими исследователями [14] образцам колесных движителей. Некоторые из них приведены на рисунке 4.

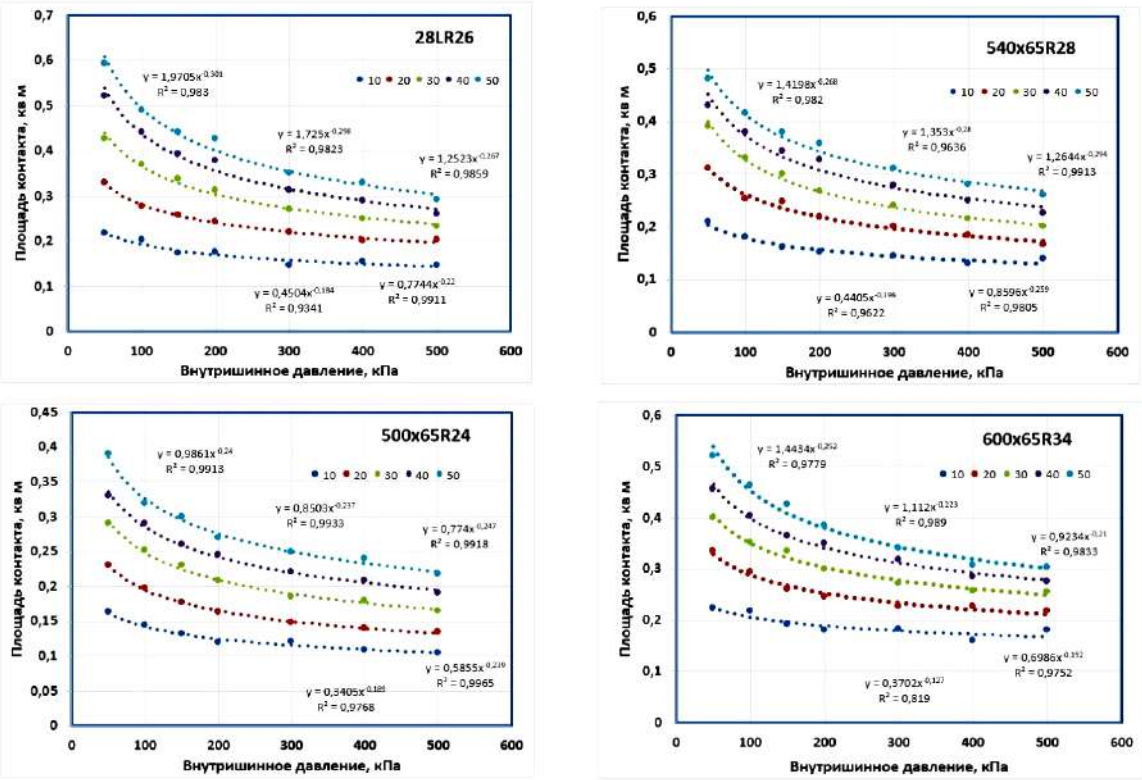

Рисунок 4 – Характер изменения площади отпечатка для шин: 28LR26, 540x65R28, 500x65R24, 600x65R34

Основной недостаток приведенных графиков – затрудненность определения площади контакта для промежуточных значений вертикальной нагрузки, не кратной 10, 20, 30 40 и 50 кН. Поэтому нами предложена несколько другая интерпретация связи контурной площади отпечатка с внутришинным давлением и вертикальной нагрузкой на ось: в виде трехмерных графиков. Приведенная на рисунке 5 поверхность отклика представляет собой геометрическую трактовку вышеназванной корреляционной связи. Для её построения используем результаты измерений, по которым построены графики, приведенные, например, на рисунке 3. Вначале построим трехмерные диаграммы рассеяния (называемые также XYZ диаграммами рассеяния), отражающие взаимосвязь между тремя переменными (X – нагрузка, Y – давление, Z – площадь). Полученный результат методом сглаживания (методом наименьших квадратов с весами, зависящими от расстояния, когда влияние отдельных точек уменьшается с расстоянием до поверхности) аппроксимируем сплайном, то есть функцией двух переменных, имеющей следующий вид:

$$z = k\frac{x^{0.479}}{y^{0.242}}, \qquad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, для шин данной размерности; $k=0,0852$; x – вертикальная нагрузка на колесо, кН; y – внутришинное давление, кПа.

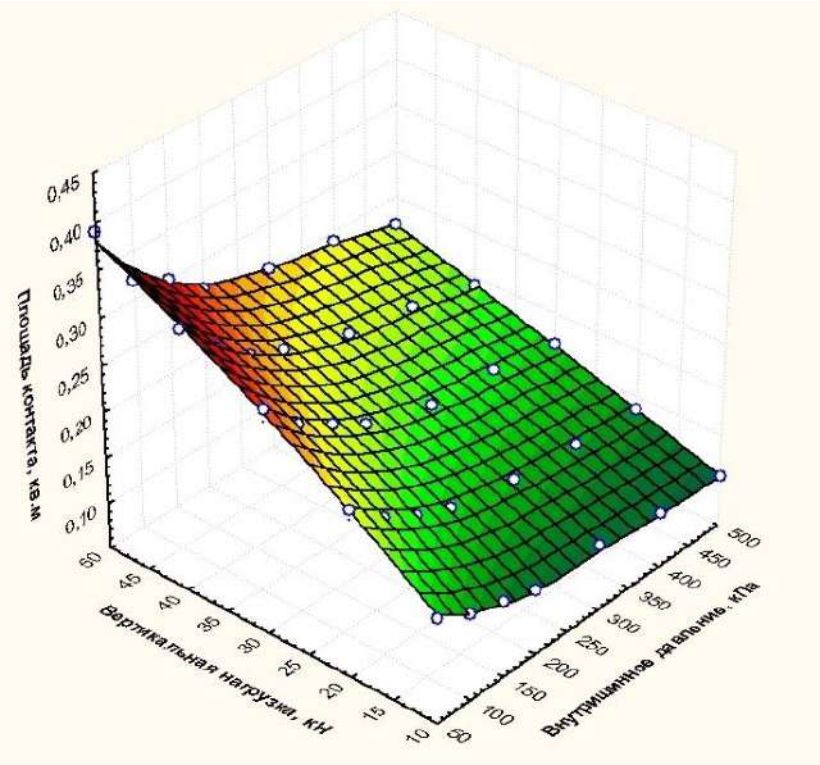

Рисунок 5 – Экспериментальные точки и аппроксимирующая поверхность отклика в двухфакторном эксперименте

Почему выбран именно этот вид аппроксимирующей функции? Во-первых, она довольно проста и легка в использовании при производстве инженерных расчетов. Во-вторых, коэффициент детерминации между экспериментальными данными и аппроксимирующей поверхностью отклика довольно высок. Для данного конкретного образца тракторной радиальной шины R^2 = 0,992. Для остальных исследуемых образцов шин данный показатель варьировал в диапазоне 0,961-0,997. Кроме того, график полезен для наглядного представления результатов исследований, включая возможность дальнейшей корректировки с использованием пользовательских функций.

Анализ приведенного на рисунке 5 графика показал, что в исследуемом диапазоне изменения вертикальной нагрузки на колесо и внутришинного давления, увеличение первого фактора ведет вначале к интенсивному, а затем – постепенному увеличению площади пятна контакта. С ростом давления воздуха в шине, наоборот происходит нелинейное снижение размеров контактирующей поверхности.

В процессе дальнейшего анализа результатов испытаний 22 образцов тракторных и комбайновых шин было выявлено, что все полученные аппроксимирующие поверхности можно привести к единой пользовательской функции:

$$S = k\frac{G_k^{0,5}}{p_w^{0,25}}, \qquad (2)$$

где: S – площадь пятна контакта, м^2, *k*- коэффициент пропорциональности; $G_к$ – вертикальная нагрузка на колесо, кН; p_w – внутришинное давление, кПа.

На рисунке 6 представлены две поверхности отклика из которых нижняя построена по формуле (1), а верхняя – по формуле (2). Как видно из рисунка, с достаточной для инженерных расчетов точностью их можно взаимозаменять.

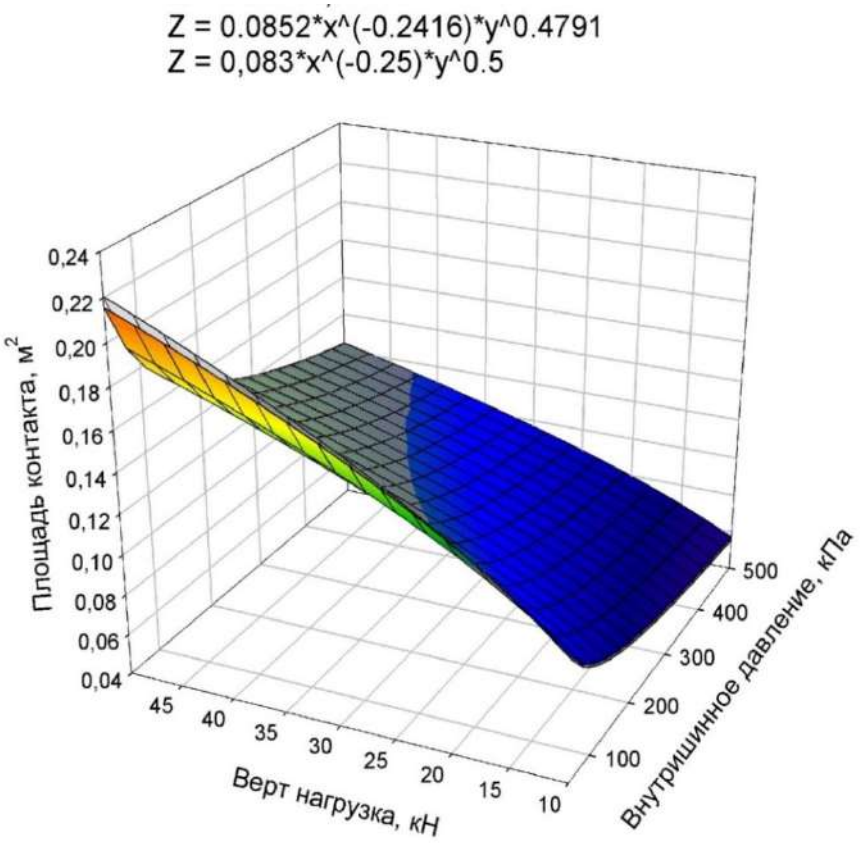

Рисунок 6 – Наложение графиков, построенных по двум формулам (приведены вверху)

Таким образом, независимо от типа шины (радиальная, диагональная), независимо от размеров резиново-кордной оболочки, площадь контакта будет пропорциональна корню квадратному из величины вертикальной нагрузки на ось колеса (выраженной в кН) и обратно пропорциональна корню четвертой степени из величины внутришинного давления (в кПа). Различия для каждого конкретного образца шин будут заключаться в значении коэффициента *k*. (Рис 6). Для вычисления последнего необходимо знать площадь пятна контакта оцениваемого образца шины, или её

аналога, имеющего тот же типоразмер, при любой конкретной величине $G_к$ и p_w. Дальнейшее изменение размеров поверхности соприкосновения протектора с опорным основанием, при изменении эластичности оболочки (внутришинного давления) и вертикальной нагрузки на колесо не сложно определить по формуле 2.

Оценку точности предлагаемой методики расчета размеров пятна контакта проведем для всей исследуемой группы шин по критерию NSE. Отметим, что характеристики некоторых образцов шин опубликованы в работе [7]. Результаты оценки приведены на графике (рис. 7), который демонстрирует насколько хорошо наблюдаемые и спрогнозированные данные соотносятся с линией $Y=x$, которая соответствует точному совпадению реальных значений с расчетными. Концентрация точек возле линии $Y=x$, наглядно доказывает адекватность предлагаемой модели. О том же свидетельствует высокое значение коэффициента эффективности моделирования по критерию NSE (Нэша-Сатклиффа) – NSE= 0,991.

Таким образом, предлагаемая нами методика определения контурной площади контакта современных колесных движителей, при изменении внешних (нагрузки на ось колеса) и внутренних (внутришинного давления) факторов вполне пригодна для практического использования. Для этого достаточно знать хотя-бы одно значение искомого показателя (S), при известном сочетании $G_к$ и p_w (вертикальной нагрузки на колесо и внутришинного давления). Затем, вычислив коэффициент пропорциональности, в конечном итоге рассчитать по формуле (2) контурную площадь контакта колесного движителя S = f ($G_к$ и p_w) для любых интересующих нас сочетаний $G_к$ и p_w.

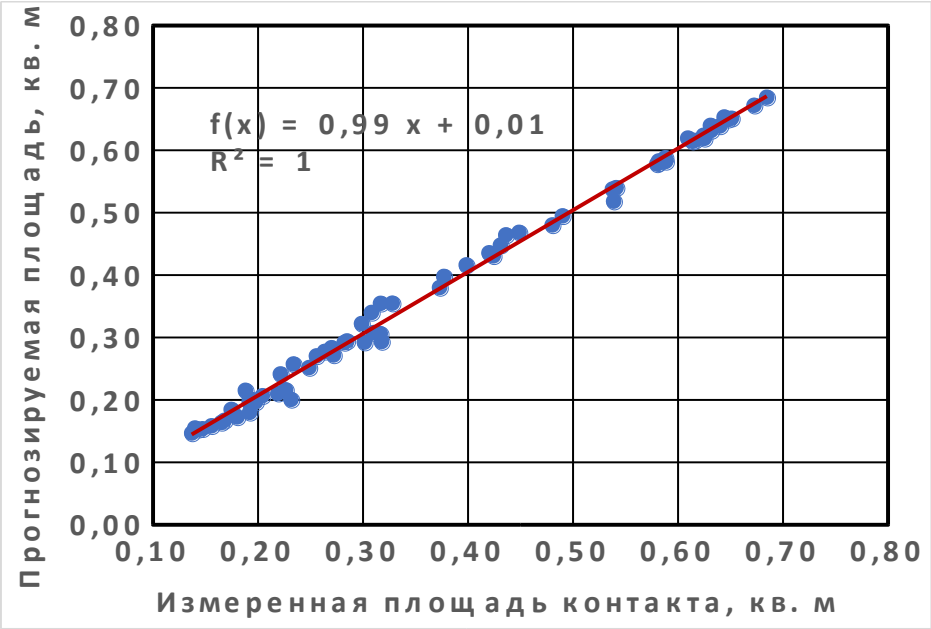

Рисунок 7 – Проверка степени совпадения результата моделирования и наблюдаемых значений S

Заключение. В результате проведённых исследований выявлено, что в исследуемом диапазоне изменения внутришинного давления и вертикальной нагрузки на ось колеса, увеличение последней ведет вначале к интенсивному, а затем к постепенному росту площади пятна контакта протектора с опорным основанием. С увеличением давления воздуха в шине происходит обратное явление - нелинейное снижение размеров контактирующей поверхности.

Предложенная эмпирическая модель для определения контурной площади контакта современных колесных движителей, при изменении внешних (нагрузки на ось колеса) и внутренних (внутришинного давления) факторов, вполне пригодна для практического использования. Высокий показатель критерия эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа

(NSE = 0,991) свидетельствует о высокой степени достоверности разработанной модели и возможности её применения для сельскохозяйственных шин любых типоразмерных рядов (включая крупногабаритные и низкопрофильные), норм слойности, конструкций (радиальных или диагональных) и т.д.

Для производства расчетов достаточно знать хотя-бы одно значение площади контакта (S), при известном сочетании $G_к$ и p_w (вертикальной нагрузки на колесо и внутришинного давления). Затем, вычислив коэффициент пропорциональности рассчитать по предлагаемой формуле значение S = f ($G_к$ и p_w) для любых интересующих нас сочетаний $G_к$ и p_w.

Метод позволит существенно улучшить качество прогнозной оценки уровня воздействия на почву как проектируемой, так и серийно выпускаемой тракторной, комбайновой и другой сельскохозяйственной техники.

Список источников

1. Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.

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. Ревенко В. Ю., Иванов А. Б., Скорляков В. И. Применение шин увеличенной размерности, как способ повышения эффективности работы машинно-тракторного агрегата / Наука в центральной России. 2022. № 2(56). С. 22-29 – DOI 10.35887/2305-2538-2022-2-22-29.

4. Schjшnning P, Lamandeґ M, Tшgersen FA, Arvidsson J, Keller T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. Biosystems Eng. 2008; 99: p. 119–133.

5. Gysi M, Maeder V, Weisskopf P. Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. Trans ASAE 2001; 44: 1385–9.

6. Damme L., Stettler M., Pine, F., Vervaet P., Keller T., Munkholm L., Lamandé M. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks // Soil & Tillage Research. 2019. V. 194. P. 111- 121.

7. Ревенко В.Ю., Фролов С.С., Ткаченко А.Н., Иванов А.Б. Уточненная методика определения площади опорной поверхности шин современной сельскохозяйственной техники / Техника и оборудование для села. 2021. № 7 (289). С. 10-15. Doi: 10.33267/2072-9642-2021-7-10-15.

8. Ревенко В.Ю. Годжаев З.А., Русанов А.В. Методы оценки площади контакта колесных движителей с опорным основанием Тракторы и сельхозмашины. 2019. №5. С.48-54 https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-5-48-54

9. Way TR, Kishimoto T. Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils. Biosystems Eng. 2004; 87: p. 375–386.

10. Jun H, Way TR, LoËfgren B, LandstroËm M, Bailey AC, Burt EC, et al. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. J Terramechan 2004; 41: p. 209–222.

11. Keller T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. Biosystems Eng. 2005; 92: p. 85–96.

12. Keller T., Sandin M., Colomba T., Horn R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning // Soil & Tillage Research. 2019. V. 194. P. 1- 12.

13. Липкань А.В., Панасюк А.Н., Годжаев З.А., Лавров А.В., Русанов А.В., Казакова В.А. Оценка способов экспериментально-аналитического определения контурной площади пятна контакта пневмошины с опорным основанием // Тракторы и седьхозмашины. 2021. № 1. С. 40-50 DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-40-50

14. Pillai P. Empirical equation for tire footprint area // Rubber Chem. Tech. 1986.V. 59(1). P. 155-159.

References

1. Rusanov V. A. Problemy pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i effektivnye puti ee resheniya. – M.: VIM, 1998. – 368 s.

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. Revenko V. YU., Ivanov A. B., Skorlyakov V. I. Primenenie shin uvelichennoj razmernosti, kak sposob povysheniya effektivnosti raboty mashinno-traktornogo agregata / Nauka v central'noj Rossii. 2022. № 2(56). S. 22-29 – DOI 10.35887/2305-2538-2022-2-22-29.

4. Schjshnning P, Lamander M, Tshgersen FA, Arvidsson J, Keller T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. Biosystems Eng. 2008; 99: p. 119–133.

5. Gysi M, Maeder V, Weisskopf P. Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. Trans ASAE 2001; 44: 1385–9.

6. Damme L., Stettler M., Pine, F., Vervaet P., Keller T., Munkholm L., Lamandé M. The contribution of tyre evolution to the reduction of soil compaction risks // Soil & Tillage Research. 2019. V. 194. P. 111- 121.

7. Revenko V.YU., Frolov S.S., Tkachenko A.N., Ivanov A.B. Utochnennaya metodika opredeleniya ploshchadi opornoj poverhnosti shin sovremennoj sel'skohozyajstvennoj tekhniki / Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2021. № 7 (289). S. 10-15. Doi: 10.33267/2072-9642-2021-7-10-15.

8. Revenko V.YU. Godzhaev Z.A., Rusanov A.V. Metody ocenki ploshchadi kontakta kolesnyh dvizhitelej s opornym osnovaniem Traktory i sel'hozmashiny. 2019. №5. S.48-54 https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-5-48-54

9. Way TR, Kishimoto T. Interface pressures of a tractor drive tyre on structured and loose soils. Biosystems Eng. 2004; 87: p. 375–386.

10. Jun H, Way TR, LoYOfgren B, LandstroYOm M, Bailey AC, Burt EC, et al. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. J Terramechan 2004; 41: p. 209–222.

11. Keller T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. Biosystems Eng. 2005; 92: p. 85–96.

12. Keller T., Sandin M., Colomba T., Horn R., Or D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning // Soil & Tillage Research. 2019. V. 194. P. 1- 12.

13. Lipkan' A.V., Panasyuk A.N., Godzhaev Z.A., Lavrov A.V., Rusanov A.V., Kazakova V.A. Ocenka sposobov eksperimental'no-analiticheskogo opredeleniya konturnoj ploshchadi pyatna kontakta pnevmoshiny s opornym osnovaniem // Traktory i sed'hozmashiny. 2021. № 1. S. 40-50 DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-40-50

14. Pillai P. Empirical equation for tire footprint area // Rubber Chem. Tech. 1986.V. 59(1). P. 155-159.

Информация об авторах

В. Ю. Ревенко – кандидат технических наук, ученый секретарь; В. И. Скорляков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; А. Б. Иванов – научный сотрудник.

Information about the authors

V. Revenko – Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary; V. Skorlyakov – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher; A. Ivanov – researcher.

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): 29.06.2022 Принята к публикации (Accepted): 10.07.2022