

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА КОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ С ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ

METHODS FOR ASSESSING THE CONTACT AREA OF WHEEL PROPELLERS WITH A SUPPORT BASE

В.Ю. РЕВЕНКО¹, к.т.н.

З.А. ГОДЖАЕВ², д.т.н.

А.В. РУСАНОВ²

¹ АОС – филиал ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, Армавир, Россия

² ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия,
stanciya-vniimk@yandex.ru

V.YU. REVENKO¹, PhD in Engineering

Z.A. GODZHAEV², DSc in Engineering

A.V. RUSANOV²

¹ Armavir Experimental Station – a branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center "All-Russian Scientific-Research Institute of Oilseeds named after Vasilij Pustovoi"», Armavir, Russia

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia, stanciya-vniimk@yandex.ru

Прогнозирование уровня воздействия сельскохозяйственной техники на почву необходимо как на этапах ее проектирования, так и при подборе шин к уже существующим образцам. Для решения поставленных задач авторами приведена оценка наиболее известных работ, посвященных описанию процесса взаимодействия колесных движителей тракторов и сельскохозяйственных машин с грунтовой поверхностью. Проанализировано тринадцать наиболее известных в России и за рубежом математических моделей, описывающих связь размерных параметров шин с величиной и формой пятна контакта. Предлагается методика оценки точности той или иной модели на основе анализа сопоставимости результатов расчета и результатов измерения контурной площади контакта шин с жесткой опорной поверхностью на специализированных стендах. В результате выявлено, что наиболее приемлемой является модель Э.Б. Станкевича, которая, благодаря своей простоте и высокой сходимости расчетных и измеряемых показателей, используется многими исследователями для практических расчетов, доказывая свою состоятельность как в случае с диагональными, так и с радиальными шинами.

На основании проведенного анализа, а также по результатам обжатия современных шин предложена полуэмпирическая модель, связывающая размерные и деформационные параметры резинокордной оболочки с величиной площади контакта. Составной частью модели является формула для определения площади сечения условного цилиндра (имеющего те же габаритные размеры, что и шина) плоскостью, отстоящей от его центра на величину статического радиуса. Модель дополнена уточняющим коэффициентом, учитывающим высоту профиля и степень деформации шины. Ее довольно высокая точность (отклонение от результатов обжатия 74 образцов современных шин не превышает 5 %) и простота в использовании существенно упрощают процесс оценки уровня воздействия сельскохозяйственной техники на почву и подбора наиболее эффективного типа колесных движителей для уже существующих машин.

Ключевые слова: шина, движитель, сельскохозяйственная техника, площадь контакта, математическая модель.

Predicting the level of impact of agricultural machinery on the soil is necessary both at the stages of its design, and when selecting tires for already existing samples. To solve the tasks, the authors assessed the most famous works devoted to the description of the process of interaction of wheeled propulsors of tractors and agricultural machines with a dirt surface. Thirteen of the most famous mathematical models in Russia and abroad, that describe the relationship between the tire size parameters and the size and shape of the contact spot, are analyzed. A technique is proposed for evaluating the accuracy of a particular model, based on an analysis of the comparability of calculation results and the results of measuring the contour area of contact of tires with a rigid supporting surface at specialized test benches. As a result, it was found that the most acceptable is the model of E. Stakevich, which, due to its simplicity and high convergence of the calculated and measured indicators, is used by many researchers for practical calculations, proving their consistency both in the case of diagonal and radial tires. Based on the analysis, as well as on the results of compression of modern tires, a semi-empirical model, that relates the dimensional and deformation parameters of the rubber-cord sheath to the contact area, is proposed. An integral part of the model is a formula for determining the cross-sectional area of a conventional cylinder (having the same overall dimensions as the tire) with a plane that is separated from its center by the value of the static radius. The model is supplemented by a refinement coefficient taking into account the height of the profile and the degree of deformation of the tire. Its rather high accuracy (the deviation from the results of compression of 74 samples of modern tires does not exceed 5 %) and ease of use greatly simplify the process of assessing the level of impact of agricultural machinery on the soil and selecting the most effective type of wheel propulsors for existing machines.

Keywords: tire, propeller, agricultural machinery, contact area, mathematical model.

Введение

К сельскохозяйственному движителю предъявляются особые требования, так как он взаимодействует с почвой, которая одновременно является опорным основанием и обрабатываемым материалом – сложной биоминеральной средой. Форма и площадь контакта колеса с почвой оказывает непосредственное влияние на степень деформации опорной поверхности, причем, как в радиальном, так и в тангенциальном направлении [1]. Уплотнение почвы и интенсивное перетирание ее структурных составляющих в результате буксования способствует развитию эрозии, отрицательно сказываясь на плодородии почв, ведя к их полной деградации [2]. По разным оценкам, около 70 % почвенного уплотнения обусловлено так называемыми техногенными факторами, т.е. причиненным в результате передвижения тяжелой сельскохозяйственной техники по полю. В первую очередь существенно ухудшаются основные физические и технологические свойства пахотного и подпахотного слоев почвы [3]. Ухудшается дренажное перераспределение почвенной влаги, увеличивается сопротивление проникновению корневой системы растений в нижележащие горизонты.

В РФ нормы воздействия движителей на почву регламентируется ГОСТ 26955. В зарубежной литературе указывается, что свойства почвы остаются неизменными, если среднее контактное давление между почвой и шиной не превышает 100 кПа. Для вычисления максимального давления, возникающего в зоне контакта колесного движителя с грунтовой поверхностью, необходимо знать величину контурной площади пятна контакта протектора с жестким основанием. Ее можно измерить в соответствии с ГОСТ 7057. Однако, на этапе проектирования новой техники или подбора оптимального типоразмера движителей для уже существующих образцов сельхозмашин и тракторов, контурную площадь можно только рассчитать. От точности указанного расчета будет зависеть правильность оценки уровня воздействия техники на почву.

Существуют различные концепции определения контурной площади контакта протектора шины и с опорной поверхностью. Математические модели для расчета взаимосвязей в системе «колесо – почва», могут быть теорети-

ческие, эмпирические и полуэмпирические [4]. В теоретических моделях обычно используют различные геометрические уравнения, например, формулы расчета площади сечения цилиндра плоскостью, площади эллипса, круга, прямоугольника. Гораздо чаще используют полуэмпирические модели, выведенные из вышперечисленных формул, но уточненных различными эмпирическими константами, полученными в результате проведения большого количества экспериментов. Значение этих констант варьирует в зависимости от шинных и почвенных характеристик, прежде всего: размерных и упруго-пластичных.

Цель исследований

Разработка математической модели, связывающей величину площади пятна контакта шины с размерными параметрами ее резинокордной оболочки и величиной ее деформации.

Материалы и методы

Проведем анализ наиболее популярных моделей прогнозирования площади пятна контакта шин с опорным основанием, используемых в практических целях. Ниже приведены варианты уравнений для определения искомых показателей.

Исследования взаимодействия колес сельскохозяйственной техники с почвой, привели к получению проф. В.А. Русановым математической модели контурной площади контакта шины с жестким основанием, полученной из геометрических соотношений [3]:

$$S = K_{\text{сш}} \cdot S_p, \quad (1)$$

где $K_{\text{сш}}$ – 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.

На основании массива данных, полученного в результате обжатия сельскохозяйственных шин и обработанного с помощью программы нелинейного множественного регрессионного анализа MRR (разработанна в ВИМе), были получены следующие эмпирические формулы для определения $K_{\text{сш}}$:

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

где B , D и H – здесь и далее те же параметры, что и формуле (1); λ – относительная деформация профиля, %, $\lambda = \frac{f}{H} 100$ %.

Для низкопрофильных шин коэффициент $K_{\text{сш}}$ рассчитывается несколько иначе:

$$K_{\text{сш}} = 0,233 + 0,0382\lambda \frac{H}{D} + 0,192 \frac{H}{BD}.$$

Общеизвестна модель М.И. Ляско (1994), которая основана на исследованиях, проведенных им еще в СССР, описывающая связь для конкретной шины между прогибом f и контурной площадью контакта S :

$$S = \frac{\pi}{4} a_{\text{к}} b_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $a_{\text{к}}$ – длина пятна контакта, м; $b_{\text{к}}$ – ширина пятна контакта, м;

$$a_{\text{к}} = C_3 \sqrt{f(D-f)}, \quad b_{\text{к}} = 2\sqrt{f(2R_{\text{пр}} - f)}.$$

$R_{\text{пр}}$ – условный приведенный радиус шины, зависящий от ширины B и высоты профиля H ; $R_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{(B+H)}{2,5}; \quad H = \frac{(D-d)}{2};$$

где d – посадочный диаметр обода, м; f – нормальный прогиб шины, м; C_3 – коэффициент, учитывающий размерные параметры шины [5, 6]:

$$C_3 = \frac{23}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - 3,5 \right|}.$$

Не менее известна эмпирическая формула Э.Б. Станкевича (1985). Вот уже более 20 лет простота и точность совпадения с результатами экспериментальной оценки по определению площади контакта реальных образцов сельскохозяйственных шин делают ее незаменимой для практического использования:

$$S = 4f\sqrt{rB}, \quad (4)$$

где r – радиус ненагруженного колеса; f и B – нормальный прогиб и ширина профиля [7].

Из зарубежных изысканий по данному направлению известны работы исследователя Krick (1969), проводимые более пятидесяти лет назад [8]. Его модель взаимодействия шины

с твердым опорным основанием представлена в следующем виде:

$$S = 8fH, \quad (5)$$

где H – высота профиля шины, которая определялась из соотношения: $H = 0,77B^{0,89}$.

В работах тех лет многие авторы ссылаются также на формулу Sühne (1969). Две вышеназванные модели являются одними из первых, описывающих контактную площадь шин сельскохозяйственных тракторов:

$$S = 2B\sqrt{Dz}, \quad (6)$$

где z – высота грунтозацепа шины, определяемая на практике из соотношения $z = 0,147R$; R – радиус ненагруженной шины.

В 1980-е годы широко использовались модели Dwyer (1984), Pillai&Fielding (1986), Febo (1987) и др. [9]. В рекомендациях первого автора по определению индекса удельного давления техники на почву использовалась следующая зависимость:

$$S = \frac{BD}{\left(1 + \frac{B}{2D}\right)\sqrt{H/f}}. \quad (7)$$

Часто упоминаемая модель Pillai&Fielding (1986) имела следующий вид:

$$S = 1,85 B f^{\frac{2}{3}} \cdot r^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Febo, оценивая параметры современных на то время широкопрофильных сельскохозяйственных шин, разработал полуэмпирическую модель для расчета контурной площади пятна контакта указанных шин с недеформируемой опорной поверхностью:

$$S = \frac{\pi}{4} a_{\text{к}} b_{\text{к}}, \quad (9)$$

где $a_{\text{к}}$ – длина пятна контакта, определяется из соотношения:

$$a_{\text{к}} = 2f^j \sqrt{D},$$

где f – деформация шины; j – эмпирическая константа, зависящая от параметров шин и имеющая рекомендуемое автором значение от 0,4 до 0,44; в наших дальнейших расчетах использовалось значение 0,44; $b_{\text{к}}$ – ширина пятна контакта, м; $b_{\text{к}} = B(1 - e^{-k})$; k – эмпирический коэффициент, зависящий от характеристики шины, с рекомендуемыми значениями от 18 до 33; нами использовался усредненный показатель, равный 26.

Работы 1990-х годов, авторов Ziani, Biarez (1990), Godbole (1993) Grečenko (1996),

еще в большей степени развили точность моделирования системы «колесо – почва» [9]. Так, авторы Ziani и Biarez предложили зависимость для расчета контактных напряжений, в основе которой, как и в формуле (9), лежит расчет площади эллипса:

$$S = \frac{\pi}{4} a_k b_k, \quad (10)$$

где a_k – длина пятна контакта: $a_k = 2\sqrt{z(D-z)}$; ширина пятна контакта $b_k = 2\sqrt{z(2R_b-z)}$; z – высота грунтозацепа, определяемая из уравнения: $z = 0,147r$; R_b – радиус поперечного профиля протектора, определяемый из соотношения $R_b = B/2$.

Godbole представил еще более упрощенный вариант модели:

$$S = \pi f \sqrt{DH}, \quad (11)$$

где D, f, H – параметры, указанные в вышеприведенных формулах.

Известный чешский ученый Grešenko в своих более ранних работах приводил следующую эмпирическую модель, связывающую контурную площадь контакта с размерными параметрами шин [10]:

$$S = \pi f \sqrt{DB}. \quad (12)$$

В дальнейшем Grešenko в соавторстве Prikner (2014) усовершенствовали приведенную выше модель и начали ее широко использовать для расчетного прогнозирования уровня воздействия техники на почву по известным размерным параметрам шин [11]:

$$S = C \cdot B \sqrt{D^2 - 4R_{st}^2}, \quad (13)$$

где D, B и R_{st} – наружный диаметр шины, ширина профиля и статический радиус нагруженного вертикальной нагрузкой колеса; C – постоянный для каждой шины коэффициент:

$$C = 0,927 + 0,761AR - 1,21AR^2,$$

где AR – масштабный коэффициент, учитывающий пропорции поперечного профиля шины: $AR = (D-d)/2B$ [12].

Объективно оценить точность той или иной модели для вычисления размеров пятна контакта можно исключительно на основе сравнения расчетных параметров с экспериментально полученными данными. Для этого воспользуемся результатами измерений площадей контакта шин с опорой, полученными нами в ходе натурных испытаний (рис. 1),

а также результатами измерения этого же параметра крупнейшими производителями шин – фирмами Michelin и Firestone. Эти данные регулярно, по мере обновления модельного ряда, публикуются в проспектах и на сайтах выше-названных компаний.



Рис. 1. Установка для оценки параметров шин и степени воздействия их на почву

Результаты и обсуждение

Имеющийся массив данных по площадям контакта 74 шин различных типоразмеров был представлен в виде точечной диаграммы, по оси абсцисс которой приведены условные номера шин, а по оси ординат – их площади пятна контакта в порядке возрастания (черные круглые точки на рис. 2). Для краткости, в рамках статьи мы не приводим таблицу с размерными параметрами всех 74 шин. Для ясности уточним, что шине с № 1 размерности 380/85R28 соответствовала площадь пятна контакта 0,097 м², шине № 2 размерности 320/85R34 – 0,103 м², шине №3 (320/85R38) – 0,107 м², ... шине № 23 (540/65R30) – 0,2 м², ... № 49 (650/65R38) – 0,319 м², ... № 62 900/50R42 – 0,387 м², ... № 74 (1050/50R32) – 0,481 м².

На этом же рисунке приведем расчетные площади контакта в соответствии с формулами: (11) (Godbole), (9) (Febo) и (6) (Sidhne). Как видно из рисунка, например, для шины № 60 (Michelin MACHXBIB 173A8 650/85R38 с размерами: $D = 2,063$ м; $B = 0,636$ м; $H = 0,548$ м; $f = 0,107$ м; $R_{st} = 0,924$ м рассчитанная по разным методикам площадь контакта равна; соответственно: $S_{11} = 0,289$ м²; $S_9 = 0,541$ м² и $S_6 = 0,646$ м². По результатам измерений, данный параметр равен $S_{изм} = 0,376$ м². Как видим, разница расчетных и измеренных показателей варьирует от 30 до 72 %. Причем, для еще более габаритных шин различия достигают 100%-го уровня. Приведенный

пример наглядно показывает непригодность предлагаемых авторами методик расчета даже для приближенной оценки воздействия техники на почву.

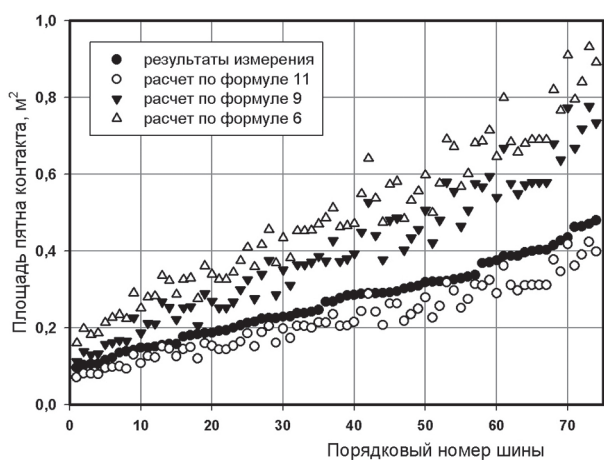


Рис. 2. Результаты измерения площадей контакта 74 шин и расчетные показатели данного параметра в соответствии с формулами (6), (9) и (11)

На рис. 3 приведены результаты расчета, в соответствии с моделями с 1-й по 13-ю, площадей контакта шин с жесткой опорной поверхностью, нагруженных номинально допустимой вертикальной нагрузкой. Каждый из полученных массивов, соответствующий той или иной математической модели, аппроксимирован линией тренда для лучшей различимости. Прямая, аппроксимирующая результаты измерений, полученных при обжатии шин, выделена полужирным. Таким образом, чем ближе расчетная линия тренда к этой прямой, тем точнее данная математическая модель описывает связь размерных параметров шин с размерами ее пятна контакта. К таким моделям относится прежде всего формула (4) Э.Б. Станкевича. Как было уже отмечено, благодаря своей простоте и высокой сходимости расчетных и измеренных показателей данная модель нередко использовалась нами в течение длительного периода времени, доказывая свою состоятельность как в случае с диагональными, так и с современными радиальными шинами.

Следует отметить, что шины нового поколения для тракторов и сельскохозяйственных машин представляют собой высокоэластичные резинокордные оболочки, адаптированные к работе как на твердой, так и на вязкоупругой опорной поверхности. Их развитое пятно контакта способствует повышению адгезивных ка-

честв движителей, росту тягового КПД трактора, снижению расхода топлива и уменьшению негативного воздействия техники на почву.

В результате обжатия более 20 шин различных типоразмеров – от узких, размерности 380/80R38, до крупногабаритных, размерности 900/60R32 – было замечено, что форма их пятна контакта близка к прямоугольной. По результатам проведенных измерений, а также на основании представленного анализа различных математических моделей, нами предлагается упрощенная формула для расчетного определения площади контакта резинокордной оболочки колесного движителя с жесткой опорной поверхностью. В ее основе лежит теоретическая зависимость (2), вычисления площади сечения цилиндра плоскостью, отстоящей от его центра на величину статического радиуса. В качестве исходных данных используются легко определяемые размерные характеристики шин: свободный диаметр, высота и ширина профиля, величина статического радиуса. Но зависимость (2) дополнена уточняющим коэффициентом деформации, равным произведению нормального прогиба шины на высоту ее профиля.

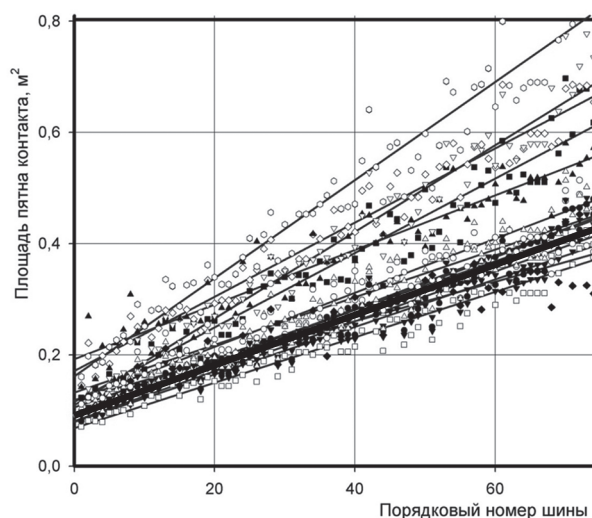


Рис. 3. Результаты определения площади контакта шин с опорой по формулам (1)–(13) и их аппроксимация прямыми линиями

Таким образом, предлагаемая полуэмпирическая модель будет иметь следующий вид:

$$S = 2B\sqrt{f(D-f)} + fH, \quad (14)$$

где D, B, f, H – те же параметры, что и в формулах (1)–(13).

Точность предлагаемой модели проверялась в соответствии с вышеизложенной методикой. Результаты оценки приведены на рис. 4, который наглядно доказывает возможность использования формулы (14) для практических расчетов.

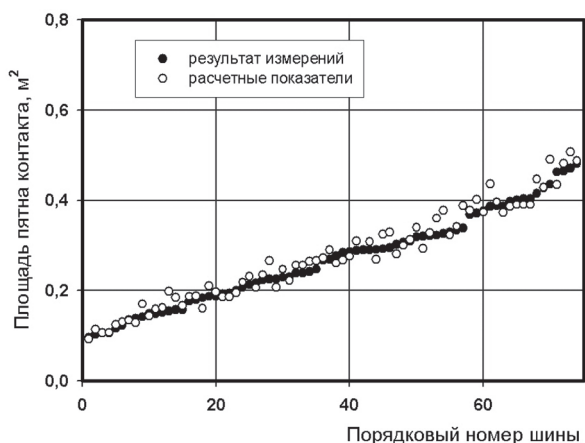


Рис. 4. Сравнительная оценка результатов расчета по формуле (14) размеров пятна контакта шин 74 типоразмеров с результатами натуральных измерений

Заключение

Таким образом, предлагаемая авторами модель вполне пригодна для определения максимального давления колесных движителей на грунтовое основание. Ее довольно высокая точность (отклонение от результатов обжатия реальных образцов современных шин не превышает 5 %), простота в использовании (достаточно взять из каталога или измерить наружный диаметр, ширину и высоту профиля, а также статический радиус) существенно упрощают процедуру прогностической оценки уровня воздействия сельскохозяйственной техники на почву.

Литература

1. Годжаев З.А., Русанов А.В., Ревенко В.Ю. Метод построения эпюр касательных напряжений в зоне контакта буксующего колеса с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 5. С. 39–47.
2. Ксеневи́ч И.П., Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Наземные тягово-транспортные системы. Энциклопедия. Т. 1. Введение в теорию и методологию исследования наземных тягово-транспортных систем. М.: Машиностроение, 2003. 743 с.
3. Русанов В.А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ, 1998. 368 с.

4. Ксеневи́ч И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
5. 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.
6. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Русанов А.В. Методика расчета максимального контактного давления колесного движителя на почву с использованием универсальной характеристики шины // Материалы международной научно-практической конференции: «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» ФГБОУ «Воронежский Государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»: Воронеж, 2015. Т. 2. № 1. С. 83–89.
7. Станкевич Э.Б. и др. Экспериментальные исследования деформации тракторных шин от нормальной нагрузки // Тракторы и сельхозмашины. 1985. № 5. С. 21–24.
8. 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.
9. Pillai P.S. Empirical equation for tire footprint area. *Rubber Chem. Tech.* 1986. Vol. 59(1). P. 155–159.
10. Grečenko A. Tire footprint area on hard ground computed from catalogue values. *J Terramech.* 1996. Vol. 32(6). P. 326–333.
11. Grečenko A., Prikner P. Tire rating based on soil compaction capacity. *J Terramech.* 2014. Vol. 52. P. 77–92.
12. Grečenko A. Tire compaction capacity rating on non-standard soil. *J Terramech.* 2016. Vol. 66. P. 59–61.

References

1. Godzhaev Z.A., Rusanov A.V., Revenko V.YU. The method of plotting tangent stress diagrams in the contact zone of a slipping wheel with soil. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. No 5, pp. 39–47 (in Russ).
2. Ksenevich I.P., Goberman V.A., Goberman L.A. Nazemnye tyagovo-transportnye sistemy. *Enciklopediya*. Vol. 1. Vvedenie v teoriyu i metodologiyu issledovaniya nazemnyh tyagovo-transportnyh system [Ground traction systems. Encyclopedia. Vol. 1. Introduction to the theory and methodology of the study of ground traction and transport systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 743 p.

3. Rusanov V. A. Problemy pereuplotneniya pochv dvizhitel'nyimi i effektivnye puti ee resheniya [Problems of soil compaction by propellers and effective ways to solve it]. Moscow: VIM Publ., 1998. 368 p.
4. Ksenevich I. P., Skotnikov V.A., Lyasko M. I. Hodovaya sistema – pochva – urozhaj [Suspension – soil - crop]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
5. 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.
6. Godzhaev Z.A., Shevcov V.G., Lavrov A.V., Rusanov A.V. Methodology for calculating the maximum contact pressure of a wheel propeller on the soil using a universal tire characteristic. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovaniya [Materials of the international scientific-practical conference: Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use]. FGBOU «Voronezhskij Gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova»; Voronezh, 2015. Vol. 2, No 1, pp. 83–89 (in Russ.).
7. Stankevich E.B. i dr. Experimental studies of tractor tire deformation from normal load. Traktory i sel'hoz mashiny. 1985. No 5, pp. 21–24 (in Russ.).
8. 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), pp. 73–98 (in Russ.).
9. Pillai P.S. Empirical equation for tire footprint area. Rubber Chem. Tech. 1986. Vol. 59 (1), pp. 155–159.
10. Grečenko A. Tire footprint area on hard ground computed from catalogue values. J Terramech. 1996. Vol. 32 (6), pp. 326–333.
11. Grečenko A., Prikner P. Tire rating based on soil compaction capacity. J Terramech. 2014. Vol. 52, pp. 77–92.
12. Grečenko A. Tire compaction capacity rating on non-standard soil. J Terramech. 2016. Vol. 66, pp. 59–61.