

УДК 631.372

А. Ю. РЕБРОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРНЫХ ШИН**

Предложена методика идентификации тракторных шин с использованием математической модели, построенной на универсальной характеристике шин. Методика позволяет идентифицировать шины по ряду показателей, в том числе и норме слойности, а также использовать математическую модель для решения задач теории трактора в статической и динамической постановках. Для идентификации используются данные контурной площади пятна контакта пневматической тракторной шины с жестким основанием.

Ключевые слова: тракторная пневматическая сельскохозяйственная шина, норма слойности шины.

Введение. Сельскохозяйственные тракторные пневматические шины ведущих колес осуществляют неголономную связь ходовой системы с почвой при реализации касательной силы тяги. Сложность процессов колееобразования, вертикального прессования грунта, касательных сдвигов и буксования связана с физико-механическими свойствами тракторных шин и деформируемого основания. Современные технологии производства тракторных шин позволяют получить определенные резервы для повышения технико-экономических показателей колесных тракторов. Все конструктивные и технологические приемы при производстве сельскохозяйственных шин направлены на повышение тяговой эффективности и грузоподъемности шин, а также снижение давления на почву. В этом скрыто определенное противоречие между повышением тяговой эффективности шины и снижением ее воздействия на почву.

Поэтому представляет интерес идентификация сельскохозяйственных тракторных шин для использования в математических моделях, описывающих процессы взаимодействия пневматической шины с деформируемой почвой. Идентифицированные по своим техническим и эксплуатационным показателям шины могут использоваться в математических моделях при решении задач теории трактора в статической и динамической постановках.

Анализ последних достижений и публикаций. Математические модели тракторных шин кратко описаны в работе [1], в которой приведено около двадцати эмпирических зависимостей, полученных разными авторами, для определения площади пятна контакта и давления, создаваемого шиной на опорное основание. Но, к сожалению, практически все приведенные зависимости имеют ряд недостатков. К ним можно отнести определение площади пятна контакта пневматической шины с опорным основанием в виде константы, хотя известно, что площадь пятна контакта зависит от радиальной нагрузки на шину, давления воздуха в ней и характеристик опорного основания. Некоторые из приведенных в работе [1] зависимостей предполагают зависимость пятна контакта от радиальной нагрузки, но не учитывают давление воздуха в шине. Только несколько зависимостей учитывают зависимость пятна контакта от радиальной нагрузки и внутришинного давления, хотя они тоже

малопригодны, так как не учитывают универсальную нагрузочную характеристику шину, предложенную В. Л. Бидерманом [2, 3]. Поэтому для шин с равными размерами, радиальной нагрузкой и давлением приведенные модели будут давать одинаковый результат вне зависимости от жесткостных характеристик каркаса шины и нормы слойности.

Одним из параметров, оказывающих существенное влияние на достоверность моделирования тракторных шин является норма слойности (ply rating, PR). Норма слойности используется для диагональных шин и некоторых видов старых радиальных шин [4]. Норма слойности является показателем прочности каркаса, а не фактическим числом тканевых слоев в шине. Максимальные нагрузки и давления отличаются для каждого типоразмера шин с разной нормой слойности. Чем больше норма слойности, тем выше грузоподъемность шины.

Некоторая эквивалентность норме слойности присутствует в маркировке звездами, которая используется для обычных тракторных радиальных шин дюймовой серии [5]. Количество звезд в маркировке свидетельствует о номинальном (максимальном) давлении в шине при максимальной радиальной нагрузке: 1 звезда (*) – сельскохозяйственная тракторная шина, рассчитанная на давление 18 psi (120 кПа, 1 psi (lb/in²) - фунт на квадратный дюйм соответствует 6,89476 кПа), 2 звезды (**) – на 24 psi (160 кПа), 3 звезды (***) – 30 psi (210 кПа) и 4 звезды (****) в маркировке – 36 psi (250 кПа). Количество звезд в маркировке, как и норма слойности, характеризует жесткость каркаса.

С другой стороны, для радиальных шин метрической серии в качестве критерия, характеризующего нагрузочную способность и косвенно норму слойности, используется индекс нагрузки [6]. Если две шины имеют одинаковый индекс нагрузки, то у них одинаковая грузоподъемность, но не обязательно при одинаковом внутришинном давлении.

Таким образом, для шин с тракторным рисунком протектора (R-1, R-1W, R-2), которые в соответствии с международной классификацией [7] предназначены для использования на ведущих колесах тракторов при эксплуатации с большими крутящими моментами на сельскохозяйственных фонах, нет единой маркировки для такого показателя как норма слойности, который используется в математической модели В. Л. Бидермана [2, 3].

Цель и постановка задачи. Целью данной работы является обобщение существующей математической модели тракторных шин, построенной на универсальной нагрузочной характеристике шин, что позволит идентифицировать шины по ряду показателей, в частности по норме слойности, и использовать математическую модель для решения ряда задач теории трактора в статической и динамической постановках.

Идентификация сельскохозяйственных тракторных шин. Тяговые свойства колесного движителя определяются площадью пятна контакта колес с опорой, динамическим радиусом колеса, прессованием и сдвигом грунта. Указанные параметры зависят от прогиба шин ведущих колес, [2, 3]:

$$f_{\text{ш}} = \frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_{\text{ш}} + p_0)} + \sqrt{\left(\frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_{\text{ш}} + p_0)} \right)^2 + c_1 \cdot G_k}, \quad (1)$$

где G_k – нагрузка на колесо, кН ;
 p_0, c_1, c_2 – постоянные для данной шины коэффициенты, кПа, м²/кН, 1/м;
 $p_{ш}$ – внутришинное давление, кПа.
 Коэффициент, зависящий от размеров шины и ее нормы слойности [2], кПа:

$$p_0 = \left(16,7 \cdot n_c \cdot \sqrt{\frac{D}{b}} - 1,4 \right) - 28, \quad (2)$$

где n_c – норма слойности шины;
 D , – наружный диаметр шины, м;
 b – ширина профиля шины, м.
 Коэффициенты c_1, c_2 определяются зависимостями [11]:

$$c_1 = \frac{(x_1^2 + x_2^2) \cdot (y_1 + y_2) - (x_1 + x_2) \cdot (x_1 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_2)}{2 \cdot (x_1^2 + x_2^2) - (x_1 + x_2)^2}; \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{2 \cdot (x_1 \cdot y_1 + x_2 \cdot y_2) - (x_1 + x_2) \cdot (y_1 + y_2)}{2 \cdot (x_1^2 + x_2^2) - (x_1 + x_2)^2}. \quad (4)$$

Коэффициенты x_1, x_2, y_1, y_2 определяются при двух внутришинных давлениях и соответствующим им максимальным нагрузкам на колесо, приведенным в [8]:

$$x_1 = \frac{f_{сш}}{p_{ш.мин} + p_0}; \quad x_2 = \frac{f_{сш}}{p_{ш.макс} + p_0}; \quad y_1 = \frac{f_{сш}^2}{Q_{pmin}}; \quad y_2 = \frac{f_{сш}^2}{Q_{pmax}}, \quad (5)$$

где $p_{ш.мин}, Q_{pmin}$ – минимально допустимое давление в шине и максимально допустимая нагрузка при минимально допустимом давлении, кПа, кН;
 $p_{ш.макс}, Q_{pmax}$ – максимально допустимое давление в шине и максимально допустимая нагрузка при максимально допустимом давлении, кПа, кН;
 $f_{сш}$ – статический прогиб шины, м:

$$f_{сш} = \frac{D}{2} - r_c, \quad (6)$$

где r_c – статический радиус шины, м.

Зная прогиб шины, можно рассчитать площадь пятна контакта с опорой и динамический радиус шины в зависимости от ее конструктивных параметров, внутришинного давления и нагрузки на колесо.

Согласно определению динамический радиус колеса – это расстояние от центра колеса до опорной плоскости при движении колеса [9]. Это полностью справедливо для недеформируемой опорной поверхности. В теории трактора существует другое определение для динамического радиуса колеса как расстояния от оси вращения до равнодействующей горизонтальных сил в пятне контакта колеса с опорной поверхностью [3]. Для деформируемой опорной поверхности динамический радиус больше расстояния от оси вращения до недеформированной поверхности, и меньше расстояния от оси колеса до дна колеи. Поэтому динамический радиус приближенно

равен:

$$r_k = \frac{D}{2} - f_{ш} \quad (7)$$

Пятно контакта шины с опорным основанием представляет собой эллипс, контурная площадь [9] которого равна:

$$F_k = \frac{\pi}{4} \cdot a_k \cdot b_k, \quad (8)$$

где a_k, b_k – большая и малая полуоси эллипса, либо длина и ширина пятна контакта.

Статистический анализ результатов статических испытаний шин показал, что ширина пятна контакта и его длина могут быть определены по зависимостям [2, 3]:

$$a_k = c_3 \cdot \sqrt{D \cdot f_{ш} - f_{ш}^2}; \quad (9)$$

$$b_k = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{пр} \cdot f_{ш} - f_{ш}^2}. \quad (10)$$

где c_3 – коэффициент, зависящий от размеров и нормы слойности шины;
 $R_{пр}$ – приведенный радиус поперечного сечения шины, м.

$$c_3 = \frac{20,5}{11,9 + \left| \frac{D}{b} - \frac{|n_c - 9|}{2} - 3 \right|}, \quad R_{пр} = \frac{b + H}{2,5}, \quad (11)$$

где H – высота профиля шины, м.

$$H = \frac{D - D_{п} \cdot 0,0254}{2}, \quad (12)$$

где $D_{п}$ – номинальный посадочный диаметр обода в дюймах.

Таким образом, математическая модель шин (1-12) в качестве исходных параметров имеет 9 величин. Это наружный диаметр колеса (D), ширина профиля шины (b), статический радиус (r_c), минимально допустимое давление в шине ($p_{ш.min}$), максимально допустимая нагрузка при минимально допустимом давлении (Q_{pmin}), максимально допустимое давление в шине ($p_{ш.max}$), максимально допустимая нагрузка при максимально допустимом давлении (Q_{pmax}), посадочный диаметр шины ($D_{п}$) и норма слойности (n_c). Все эти параметры можно найти в [8] для диагональных шин. Для радиальных шин норма слойности практически никогда не указывается ни в маркировке, ни в технической информации производителя на шину. Поскольку эксплуатационные показатели диагональных шин всегда на 3-6% ниже по сравнению с радиальными [10], то используются они либо на малых тракторах, либо для не сельскохозяйственного применения. С другой стороны шины одного и того же типоразмера у разных производителей отличаются не только жесткостными характеристиками, но и основными размерами. Поэтому в приведенной модели [2, 3] желательно использовать технические данные производителя конкретной шины. В связи с этим, математическая модель с использованием универсальной нагрузочной

характеристики шин, предложенной В. Л. Бидерманом, для радиальных шин как дюймовой, так и метрической серий затруднительна.

Ключом к решению этой задачи может быть использование такого показателя как контурная площадь пятна контакта с недеформируемым основанием [9]. Ряд производителей тракторных шин с рисунком протектора R-1, R-1W и R-2 таких как Michelin, Firestone, Trelleborg, Good Year (Titan) в технических данных указывают величину контурной площади пятна контакта. Контурная площадь пятна контакта измеряется при максимальном давлении в шине и максимальной нагрузке, соответствующей этому давлению для данных скоростного режима 30 км/ч [11]. Этот скоростной режим соответствует индексу скорости А6 для эксплуатации шины с большими крутящими моментами, то есть для сельскохозяйственного использования.

Для решения задачи введем несколько показателей. Коэффициент деформации шины:

$$\lambda_r = \frac{r_k}{r_c}, \quad (13)$$

где r_k – динамический радиус шины, определенный с учетом ее радиальной деформации;

r_c – статический радиус шины, оговоренный стандартом [8] или указанный в технических данных на шину.

Коэффициент нагрузки шины (%):

$$k_n = \frac{G_k}{Q_d} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где G_k – радиальная нагрузка на шину;

Q_d – допускаемая нагрузка на шину при данном давлении.

Коэффициента площади пятна контакта:

$$\lambda_f = \frac{F_k}{F_n}, \quad (15)$$

где F_k – расчетная контурная площадь пятна контакта шины;

F_n – номинальная контурная площадь пятна контакта шины [9, 11].

Анализ результатов исследования. В качестве примера для идентификации был выбран популярный типоразмер тракторных шин 650/65 R38 нескольких мировых производителей (см. табл.1).

Таблица 1– технические данные шины 650/65 R38 ведущих мировых производителей

D , м	b , м	r_c , м	Q_{pmax} , кг	$p_{ш.max}$, МПа	Q_{pmin} , кг	$p_{ш.min}$, МПа	F_n , см ²	n_c	Производитель
1,839	0,653	0,823	4130	0,16	2675	0,06	2903	8,3	Good Year
1,819	0,646	0,801	4740	0,16	2190	0,04	2923	6,0	Michelin
1,839	0,646	0,823	4745	0,16	2730	0,06	3096	9,0	Firestone

В результате идентификации шин при варьировании радиальной нагрузкой и внутришинным давлением получаем показатели (13-15) для выбранной шины (см. рис.1). Значения введенных коэффициентов равны 1 или 100 % на прямой 1 (рис.1),

соединяющей точки допустимых нагрузок при соответствующем давлении воздуха в шине. В области **A**, выше линии **1**, шины перегружены ($k_{\Pi} > 100$), динамический радиус меньше статического ($\lambda_r < 1$), расчетная контурная площадь пятна контакта больше номинальной ($\lambda_f > 1$). В области **B**, наоборот шины недогружены, динамический радиус больше статического, расчетная контурная площадь пятна контакта меньше номинальной.

Задача идентификации заключается в том, чтобы линии $\lambda_r = 1$, $k_{\Pi} = 100$ и $\lambda_f = 1$ совпали с линией **1**. Для решения данной задачи необходимо воспользоваться методом подбора нормы слойности. Результаты идентификации (значения нормы слойности) для выбранных шин приведены в табл. Необходимо отметить, что норма слойности может быть любым дробным или целым числом.

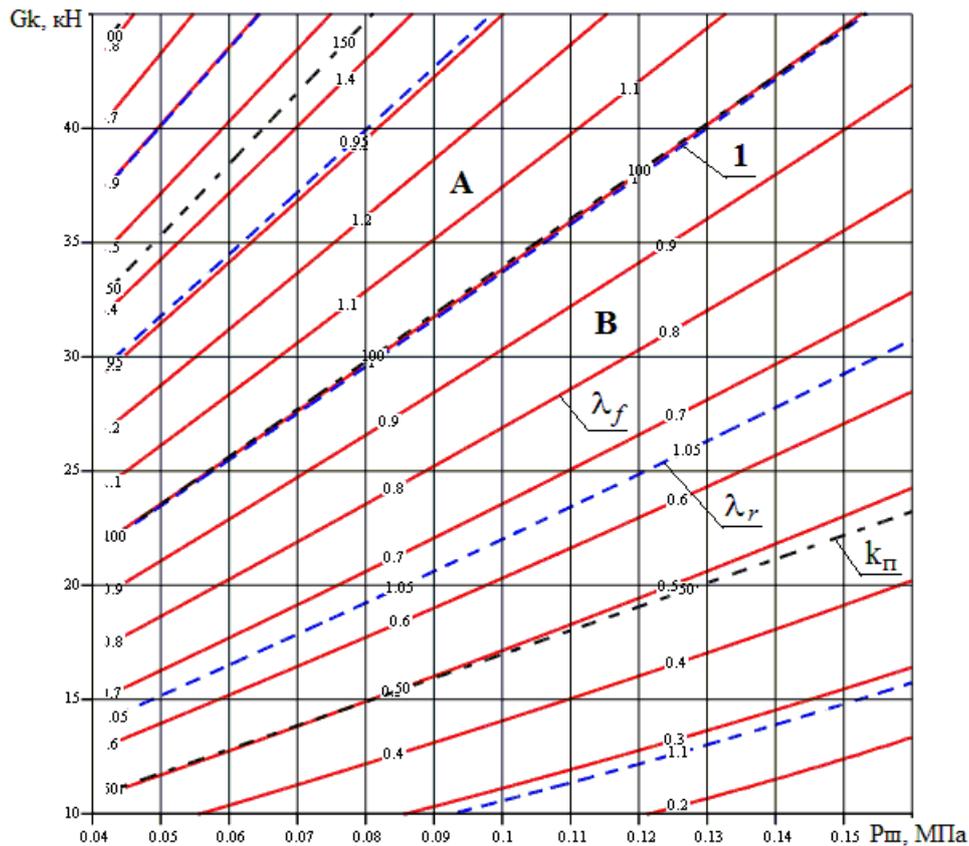


Рисунок 1– Показатели тректорной шины 650/65 R38 (Michelin) в зависимости от давления воздуха и радиальной нагрузки

В модели [2, 3] существенное влияние норма слойности оказывает на величину контурной площади пятна контакта. Поэтому при расчете тяговой эффективности тракторов с учетом радиальной нагрузки на шины и давления в них, изложенная методика позволяет корректно моделировать площадь пятна контакта с жестким основанием. Для перехода к моделированию пятна контакта шины с деформируемым основанием можно воспользоваться рекомендациями [12].

Выводы. Математическая модель тректорной шины, предложенная В. Л. Бидерманом [2, 3] наиболее полно отражает все физические взаимосвязи таких показателей, как физико-механические свойства шины, радиальная нагрузка, давление воздуха в шине, радиальная деформация шины и контурная площадь пятна контакта с жестким основанием.

Недостатком рассматриваемой модели [2, 3] является использование показателя нормы слойности, который указывается для диагональных шин, получивших ограниченное применение на сельскохозяйственных тракторах.

Альтернативным и более информативным показателем для модели [2, 3], а также идентификации шин может быть контурная площадь пятна контакта шины с жестким основанием, которая приведена в технической информации на шины мировых производителей таких, как Michelin, Firestone, Trelleborg, Good Year.

Список литературы: 1. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact. Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors / M. Saarilahti // University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. – 43p. 2. Ксеневиц И.П. Ходовая система – почва – урожай / И.П. Ксеневиц, В.А. Скотников, М.И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с. 3. Гуськов В.В. Тракторы: теория / Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др.; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 377 с. 4. ДСТУ ISO 4251-2:2003/ГОСТ ИСО 4251-2–2004 Шини (серії з маркуванням норми шарування) та ободи для сільськогосподарських тракторів і машин. Частина 2. Номінальна навантага на шини. 5. K. N. Brodbeck. Choosing the Right Tire: ASAE Distinguished Lecture # 28, pp. 1-13. Agricultural Equipment Technology Conference, 8-10 February 2004, Louisville, Kentucky USA. ASAE Publication Number 913C0204. 6. ДСТУ ISO 7867-1:2005/ГОСТ ИСО 7867-1-2005 Шини і ободи (метричні серії) для сільськогосподарських тракторів і машин. Частина 1. Познаки, розміри та маркування шин, відповідність шин і ободів. 7. ISO 4251-4:1992 Шини (серії з маркуванням норми шарування) та ободи для сільськогосподарських тракторів і машин. Частина 4. Класифікація і номенклатура шин. 8. ГОСТ 7463-2003 Шини пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия. 9. ГОСТ 17697-72 Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. 10. Mueller J., Treanor K. Performance of a four wheel drive tractor equipped with radial tires // American Society of Agricultural Engineers. 1986. Paper No 85-1048. 11. Michelin Agriculture and Compact Line Data Book. – 2013. – Режим доступа : www.michelinag.com. 12. ГОСТ 26953-86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия на почву.

Bibliography (transliterated): 1. Modelling of the wheel and tyre. Tyre and soil contact. Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors / M. Saarilahti . University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. – 43p. 2. Ksenevich I.P. Hodovaja sistema – pochva – urozhaj / I.P. Ksenevich, V.A. Skotnikov, M.I. Ljasko. – Moscow: Agropromizdat, 1985. – 304 p. 3. Gus'kov V.V. Traktory: teoriya / Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Ju.E. i dr.; pod obshh. red. V.V. Gus'kova. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 377 p. 4. DSTU ISO 4251-2:2003/GOST ISO 4251-2–2004 Shini (serii z markovannjam normi sharuvannja) ta obodi dlja sil'skogospodars'kih traktoriv i mashin. Chastina 2. Nominal'na navantaga na shini. 5. K. N. Brodbeck. Choosing the Right Tire: ASAE Distinguished Lecture # 28, pp. 1-13. Agricultural Equipment Technology Conference, 8-10 February 2004, Louisville, Kentucky USA. ASAE Publication Number 913C0204. 6. DSTU ISO 7867-1:2005/GOST ISO 7867-1-2005 Shini i obodi (metrichni seriï) dlja sil'skogospodars'kih traktoriv i mashin. Chastina 1. Poznaki, rozmiri ta markovannja shin, vidpovidnist' shin i obodiv. 7. ISO 4251-4:1992 Shini (serii z markovannjam normi sharuvannja) ta obodi dlja sil'skogospodars'kih traktoriv i mashin. Chastina 4. Klasifikacija i nomenklatura shin. 8. GOST 7463-2003 Shiny pnevmaticheskie dlja traktorov i sel'skohozjajstvennyh mashin. Tehniceskie uslovija. 9. GOST 17697-72 Avtomobili. Kachenie kola. Terminy i opredelenija. 10. Mueller J., Treanor K. Performance of a four wheel drive tractor equipped with radial tires. American Society of Agricultural Engineers. 1986. Paper No 85-1048. 11. Michelin Agriculture and Compact Line Data Book. – 2013. – Rezhim dostupa : www.michelinag.com. 12. GOST 26953-86 Tehnika sel'skohozjajstvennaja mobil'naja. Metody opredelenija vozdejstvija na pochvu.

Надійшла (received) 01.02.2015