

ОЦЕНКА СПОСОБОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРНОЙ ПЛОЩАДИ ПЯТНА КОНТАКТА ПНЕВМОШИНЫ С ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ



EVALUATION OF METHODS FOR EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL DETERMINATION OF THE CONTOUR AREA OF THE CONTACT PATCH OF A PNEUMATIC TIRE WITH A SUPPORT BASE

А.В. ЛИПКАНЬ¹
А.Н. ПАНАСЮК¹, д.т.н.
З.А. ГОДЖАЕВ², д.т.н.
А.В. ЛАВРОВ², к.т.н.
А.В. РУСАНОВ²
В.А. КАЗАКОВА²

¹ ФГБНУ «Дальневосточный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства», Благовещенск, Россия, lav-blg@mail.ru

² ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия, fic51@mail.ru

A.V. LIPKAN¹
A.N. PANASYUK¹, Dsc in Engineering
Z.A. GODZHAYEV², Dsc in Engineering
A.V. LAVROV², PhD in Engineering
A.V. RUSANOV²
V.A. KAZAKOVA²

¹ Far Eastern Research Institute of Agricultural Mechanization and Electrification, Blagoveshchensk, Russia, lav-blg@mail.ru

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia, fic51@mail.ru

Для экологической оценки мобильного энергетического средства представлены результаты экспериментов по оценке погрешности способов экспериментального и расчетного определения контурной площади на примере современных радиальных шин 360/70R24 мод. Бел-89 и 18,4R34 мод. Ф-11 сельскохозяйственного трактора МТЗ-1025.2 в режимах ненормального нагружения при штатной нагрузке на шины и изменении внутришинного давления воздуха в диапазоне, рекомендуемом для полевых работ. Оценка возможности совершенствования расчетного метода определения контурной площади пятна контакта протектора шины пневматического колеса основана на математической модели В.Л. Бидермана. Оценка проведена для четырех способов определения площади пятна контакта шины: 1) непосредственно измерением площади с использованием цифровой фотографии отпечатка пятна контакта шины в среде программы Kompas-3D V13 с определением масштабирования и погрешности метода, применяя квадрат из миллиметровки 100×100 мм; 2) расчетом по формуле площади эллипса с использованием длины и ширины пятна контакта шины, измеренных рулеткой непосредственно по полученному отпечатку; 3) расчетом по его цифровой фотографии в среде программы Kompas-3D V13; 4) расчетом с использованием параметров универсальной характеристики шины (УХШ).

В результате проведенных экспериментов установлено, что для современных радиальных тракторных шин, статическая деформация которых не превышает 18–22 %, может с достаточной (для инженерной практики) точностью применяться способ теоретического определения контурной площади пятна контакта шины с использованием параметров УХШ. Полная сходимость расчетной и экспериментальной контурных площадей пятна контакта шины может обеспечиваться коэффициентом их соотношения. Проведенная оценка возможности использования методов расчетного определения условной контурной площади шины показала, что эти методы вполне могут быть использованы для сравнительной оценки техногенного механического воздействия движителей на почву.

Ключевые слова: движитель, деформация, характеристика, способ, контурная площадь, опорное основание, максимальное давление.

Для цитирования: 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 сельхозмашины. 2021. № 1. С. 40–50. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-40-50.

The results of experiments on the estimation of the error of methods of experimental and calculated determination of the contour area for the ecological assessment of a mobile energy device are presented. There was used the example of modern radial tires 360/70R24 of Bel-89 and 18.4R34 of F-11 agricultural tractor MTZ-1025.2. in modes of non-nominal loading at nominal load on tires and changes in tire pressure within the range recommended for field work. assess the possibility of improving the computational method for determining the contour area of the contact patch of the tire tread of a pneumatic wheel based on the mathematical model of V.L. Biederman. The assessment was carried out for four ways of determining the area of the tire contact patch: 1) directly measuring the area using a digital photograph of the tire contact patch in Kompas-3D V13 software with the determination of the scaling and method error using a square from 100x100 mm graph paper; 2) calculation by the formula of the area of an ellipse,

using the length and width of the tire contact patch, measured with a tape measure directly from the obtained print; 3) by calculation, determined from the digital photograph in Kompas-3D V13 software; 4) by calculation, determined by calculation using the parameters of the universal tire characteristic (UTC).

As a result of the experiments, it was found that for modern radial tractor tires, the static deformation of which does not exceed 18–22 %, the method of theoretical determination of the contour area of the tire contact patch using the UTC parameters can be applied with sufficient (for engineering practice) accuracy. Full convergence of the calculated and experimental contour areas of the tire contact patch can be provided by the coefficient of their ratio. The carried out assessment of the possibility of using methods for calculating the conditional contour area of the tire showed that these methods can be well used for a comparative assessment of the technogenic mechanical impact of propellers on the soil.

Keywords: propeller, deformation, characteristic, method, contour area, support base, maximum pressure.

Cite as: Lipkan' A.V., Panasyuk A.N., Godzhayev Z.A., Lavrov A.V., Rusanov A.V., Kazakova V.A. Evaluation of methods for experimental and analytical determination of the contour area of the contact patch of a pneumatic tire with a support base. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 1, pp. 40–50 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-40-50.

Введение

В Российской Федерации для решения вопроса экологической оценки мобильного энергетического средства (МЭС) в основе определения воздействия колесных движителей сельскохозяйственной техники на почву лежат два нормируемых критерия:

– официальный согласно ГОСТ Р 58656-2019 [1], – максимальное нормальное давление единичного колеса на почву q_{\max}^k (кПа), рассчитываемое на основе экспериментально определенного среднего \bar{q}_k (кПа):

$$\bar{q}_k = \frac{G_k}{F_{\text{кп}}};$$

$$q_{\max}^k = \bar{q}_k \cdot K_2 = \frac{G_k}{F_{\text{кп}}} \cdot K_2 = \frac{G_k \cdot K_2}{F_k \cdot K_1}, \quad (1, a, б)$$

где G_k – радиальная (вертикальная) нагрузка на колесо, кН; $F_{\text{кп}}$ – площадь контакта шины единичного колеса, приведенная к условиям работы на почвенном основании; F_k – контурная площадь пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием; K_1 – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса, принимается по ГОСТ Р 58656 [1]; K_2 – коэффициент продольной неравномерности распределения давления по площади контакта шины, $K_2 = 1,5$;

– предложенный в работе [2] – показатель воздействия единичного колесного движителя на почву U (кН/м), рассчитываемый с использованием значения q_{\max}^k :

$$U = \omega b q_{\max}^k, \quad (2)$$

где ω – коэффициент, зависящий от размера и опорной поверхности движителя; экспериментально авторами [2] для колесного дви-

жителя определено $\omega = 1,25$; b – ширина движителя.

Проведенный авторами работы [2] анализ показал, что показатель воздействия единичного движителя U , определяемый по зависимости (2), удовлетворяет требованиям к числовым параметрам системы «двигатель – почва» и может быть использован в качестве более адекватного критерия для оценки уплотняющего воздействия движителей на почву.

Тем не менее, в основе расчета обеих критериев лежит определение контурной площади контакта протектора F_k шины с жестким опорным основанием с той лишь разницей, в первом случае она определяется по экспериментальному пятну контакта шины, полученному по ГОСТ Р 58656-2019 [1], а во втором – расчетным путем с использованием параметров c_1 , c_2 и p_0 универсальной характеристики шины (УХШ), основанной на математической модели В.Л. Бидермана, описывающей процесс радиальной деформации тракторных шин, уравнение которой имеет вид [2, с. 205]:

$$G_k = \frac{f_{\text{ш}}^2}{c_1 + c_2 \cdot f_{\text{ш}} / (p_w + p_0)}, \quad (3)$$

где c_1 ($\frac{\text{М}^2}{\text{кН}}$), c_2 ($\frac{1}{\text{М}}$) и p_0 (кПа) – постоянные

для данной шины коэффициенты, а первичными (управляемыми) эксплуатационными параметрами, характеризующими ее нагруженность, являются p_w (кПа) и G_k (кН) – внутришинное давление воздуха и радиальная (вертикальная) нагрузка на шину, соответственно.

Данные параметры УХШ и первичные эксплуатационные параметры в совокупности, согласно изложенной в работе [2, с. 205–207]

методике, определяют такие вторичные (зависимые) эксплуатационные параметры шины, как нормальный статический прогиб шины $f_{ш}$, линейные параметры пятна контакта (ширина b_k и длина a_k) и условную контурную площадь пятна контакта протектора шины на ровном, недеформируемом опорном основании F_k , а в зависимости от диаметра шины D_0 , м и площадь, приведенную к условиям работы на почвенном основании $F_{кп}$, которая в сочетании с радиальной нагрузкой на шину G_k определяет среднее \bar{q}_k и максимальное нормальное давление на почву q_{max}^k , а также показатель воздействия шины на почву, как единичного колесного движителя – U , кН/м.

Величины коэффициентов c_1 , c_2 и p_0 для конкретной шины определяют по результатам ее статических испытаний, для чего достаточно трех опытов, проведенных хотя бы при двух различных внутренних давлениях воздуха в шине, либо они могут быть определены для всех без исключения тракторных шин из зависимостей, предложенных М.И. Ляско и А.Г. Курденковым [2, с. 206] по данным $i = 3, \dots, N$ ступеней сочетаний радиальной (вертикальной) нагрузки на шину G_{k_i} и внутришинного давления p_{w_i} , обеспечивающих ее допустимый статический прогиб $[f_{ш}]_i$, то есть по данным нагрузочной характеристики шины, определяемой при статических испытаниях шины фирмой-производителем [4–12].

Однако каждый из этих методов на сегодня имеет свои недостатки. Так, экспериментальный способ определения контурной площади пятна контакта протектора шины на ровном, жестком опорном основании F_k по ГОСТ Р 58656-2019 [1] является трудоемким и организационно сложным, ибо предполагает использование специального стенда либо манипуляции с натурными образцами мобильных машин. Кроме того, четко регламентируя метод получения отпечатка протектора шины, ГОСТ Р 58656-2019 [1] не дает четкой регламентации метода оценки значения площади этого отпечатка.

Недостатком второго способа для радиальных шин является неопределенность коэффициента p_0 при расчете нормального прогиба $f_{ш}$, так как используемый при этом конструктивный параметр шины «норма слойности n » в технических данных для большинства современных радиальных шин их производители

не указывают. Это осложняет возможность использования данного способа, так как порождает определенную неуверенность в адекватности расчетов.

Поэтому А.Ю. Ребров [13], исследуя высокоэластичные радиальные шины IF и VF с относительной радиальной деформацией существенно более 18–22 % предложил адаптировать метод расчета контурной площади контакта протектора шины с жесткой опорной поверхностью, основанный на математической модели деформации тракторных шин В.Л. Бидермана, используя в качестве критерия сходимости результатов моделирования и реальных данных равенство расчетной и действительной контурной площади пятна контакта шины с жестким основанием. Он разработал способ идентификации расчетного значения контурной площади пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием, введя вместо конструктивного параметра «норма 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.

По А.Ю. Реброву [13], первоначально в расчетах по методике, изложенной в работе [2], норма слойности n для модели с неуказанным значением данного параметра выбирается таким образом, чтобы исключить комплексные значения при расчетах по зависимости (3). После определения контурной площади пятна контакта шины с жестким основанием $F_{кр}$ в соответствии с базовой методикой (формулы (5.25–5.28) в работе [2]) определяется коэффициент:

$$k_F = \frac{F_{кр}}{F_{кн}}, \quad (4)$$

где $F_{кр}$ – расчетная контурная площадь пятна контакта шины; $F_{кн}$ – номинальная контурная площадь пятна контакта шины, по данным испытаний производителя.

Затем корректируются зависимости приведенного радиуса и коэффициента c_3 следующим образом:

$$R_{нр} = \frac{B + H}{2,5 \cdot k_F}, \quad (5)$$

$$c_3 = \frac{\frac{20,5}{\sqrt{k_F}}}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - \frac{|n_c - 9|}{2} - 3 \right|}. \quad (6)$$

Далее, после замены выражений в $R_{пр}$ и c_3 на модернизированные (5) и (6) численным методом определяется норма слоистости n_c из уравнения:

$$\frac{F_{кр}}{10000} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\frac{20,5}{\sqrt{k_F}}}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - \frac{|n_c - 9|}{2} - 3 \right|} \times \sqrt{D \cdot f_{ш} - f_{ш}^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{B+H}{2,5 \cdot k_F} \cdot f_{ш} - f_{ш}^2}, \quad (7)$$

где $f_{ш}$ – статический прогиб шины.

Следует отметить, что, по А.Ю. Реброву [13], норма слоистости 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 % [13]. 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 показывают, что до корректирования зависимостей (5) и (6) 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 [2], построенной на универсальной характеристике шин, позволяет определить коэффициенты k , c и n_c модели шины 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 см² [13].

Заметим, что 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 требуется 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 обеспечения допустимого статического прогиба и, соответственно, номинальной контурной площади пятна контакта протектора шины. Иногда для повышения опорных и/или тягово-сцепных свойств пневмоколесного движителя возникает необходимость оценки характера и абсолютной величины контурной площади пятна контакта протектора шины от изменения внутришинного давления в заданном диапазоне при неизменной штатной нагрузке на колесо МЭС. Можно ли в этом случае воспользоваться методом аналитическим расчета площади контакта шины, основанном на использовании параметров УХШ?

При исходном отсутствии таких данных от производителя шины, как показатель «норма слоистости n » и действительное значение номинальной контурной площади пятна контакта протектора шины, что может быть критерием возможности использования предложенного подхода корректировки расчетного метода определения контурной площади пятна контакта протектора шины с ровной жесткой поверхностью с использованием модели В.Л. Бидермана (параметров УХШ) при не номинальном режиме нагружения, например при «недогрузе» шины? По нашему мнению, такими критериями могут быть, во-первых,

идентичность расчетного и действительного характеров влияния внутришинного давления воздуха на изменение контурной площади, а во-вторых, величина погрешности ее определения.

То есть следует оценить погрешность возможных способов оценки значения контурной площади пятна контакта протектора шины, получаемого согласно рекомендуемому экспериментальному методу по ГОСТ 7057-2001 [3] в ходе экспериментальных исследований по проверке возможности использования расчетного метода для определения величины контурной площади радиальной шины с использованием математической модели В.Л. Бидермана в ненормальном режиме нагружения штатной нагрузкой при изменении внутришинного давления в рекомендуемом для полевых работ диапазоне и при условном значении параметра «норма слойности n ». А сегодня, как было сказано выше, метод оценки значения контурной площади пятна контакта протектора шины четко не регламентирован нормативной документацией РФ: это может быть как инструментальный метод непосредственного или опосредованного, например, с использованием цифрового фотоаппарата, измерения площади пятна контакта, так и метод расчета площади пятна контакта по замеренным инструментальными средствами непосредственно или опосредованно с использованием цифрового фотоаппарата параметров пятна контакта – длины a_k и ширины b_k .

Цель исследований

1. Оценить возможность использования расчетного метода определения контурной площади пятна контакта протектора шины пневматического колеса, основанного на математической модели В.Л. Бидермана, то есть с использованием параметров УХШ, для оценки значений действительной контурной площади пятна контакта протектора шины с жестким опорным основанием, максимально-го давления и показателя воздействия единичного движителя колесного трактора на почву в режимах ненормального нагружения шины при изменении внутришинного давления в рекомендуемом диапазоне.

2. Определить экспериментально и теоретически с помощью метода с использованием параметров УХШ при штатной нагрузке на колесо влияние внутришинного давления

воздуха на контурную площадь пятна контакта протектора радиальной шины с жестким опорным основанием.

3. Оценить погрешности определения контурной площади пятна контакта протектора радиальной шины на жестком опорном основании экспериментальными и расчетными методами, в том числе с использованием параметров УХШ.

Объект 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.

Проведение лабораторных экспериментов для достижения первой цели производилось путем получения отпечатка шин на ровном опорном основании по методике согласно ГОСТ 7057 [3] без демонтажа шин с трактора, которая подробно описана в работе [14].

Материалы и методы

Определение величины контурной площади получаемого пятна контакта шины при заданном значении внутришинного давления производилось следующими четырьмя способами:

1) опосредованное измерение с использованием цифровой фотографии отпечатка пятна контакта шины в среде программы Kompas-3D V13 (инструментальное средство «Измерить площадь») с определением масштабирования с помощью квадрата из миллиметровки 100×100 мм;

2) расчет по формуле площади эллипса [2, формула (5.28)] с использованием длины a_{k1} и ширины b_{k1} пятна контакта шины, измеренных рулеткой непосредственно по полученному отпечатку;

3) расчетом по формуле площади эллипса с использованием длины a_{k2} и ширины b_{k2} отпечатка пятна контакта шины, определенных по его цифровой фотографии в среде программы Kompas-3D V13 (инструментальное средство «Измерить расстояние»), и определение масштабирования с помощью квадрата из миллиметровки 100×100 мм;

4) расчетом по формуле площади эллипса с использованием длины a_{k3} и ширины b_{k3} пятна контакта шины, определенных расчетом по па-

раметрам УХШ [2, формулы (5.27)] при условной норме слойности шины $n = 8$.

Погрешность определения площади данными способами оценивалась:

– по способу 1 опосредованного 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 расчетным способам 2, 3 и 4 определения контурной площади пятна контакта – относительной ошибкой по отношению к величине контурной площади, определенной измерительным способом 1, принятым за базовый, как наиболее точно отражающим действительную контурную площадь пятна контакта шины.

Результаты и обсуждение

Результаты различных способов измерения и определения расчетом площади отпечатков с оценкой сравнительной погрешности определения по отношению к базовому (основному) методу сведены в таблицу. На рис. 1 представлены графики зависимости площади пятна контакта протектора шин для переднего (ПЛК) и заднего (ЗПК) мостов трактора МТЗ-1025.2 от внутришинного давления воздуха, определенной четырьмя описанными выше способами.

Значения контурной площади пятна контакта протектора оцениваемых шин в зависимости от внутришинного давления воздуха, определенные четырьмя различными способами, представлены в таблице первой строкой, соответствующей определенному давлению в шине, а во второй строке, выделенной курси-

Таблица

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, определенное различными способами с оценкой погрешности определения относительно базового способа

Table. Change in the area of the tire tread contact patch from the intra-tire air pressure for the front (FLW with tire 360/70R24) and rear (RRW with tire 18.4R34) of MTZ-1025.2 tractor axles, determined by various methods with an estimate of the determination error relative to the basic method

Внутришинное давление воздуха	Измерение площади в Kompas, мм ²		Расчет площади по действительным линейным размерам, мм ²		Расчет площади по линейным размерам отпечатка в Kompas, мм ²		Расчет площади по линейным размерам, определенным по УХШ, мм ²	$\frac{F_{к4}}{F_{к1}}$	$\frac{F_{к2}}{F_{к1}}$
	$F_{к1}$	F_{1001}	$F_{к2}$	F_{1002}	$F_{к3}$	F_{1003}			
$p_{в}$, кПа	$F_{к1}$	F_{1001}	$F_{к2}$	F_{1002}	$F_{к3}$	F_{1003}	$\frac{F_{к4}}{n=8}$	k_F	k_F
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПЛК – 360/70R24 Бел-89 ТУ 6700016217.178-2003 12,2-18 Belshina 2,5 bar maks 106R 000032								k_{F1}	k_{F2}
80	82222,0	10111,4	75900,9	10000	76469,9	10056,0	75273	0,92	0,92
	0	1,11	-7,69	0	-7,00	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	-4,00	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_{F3}	k_{F4}
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	-2,00	0,230	-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	-0,740	13,83		

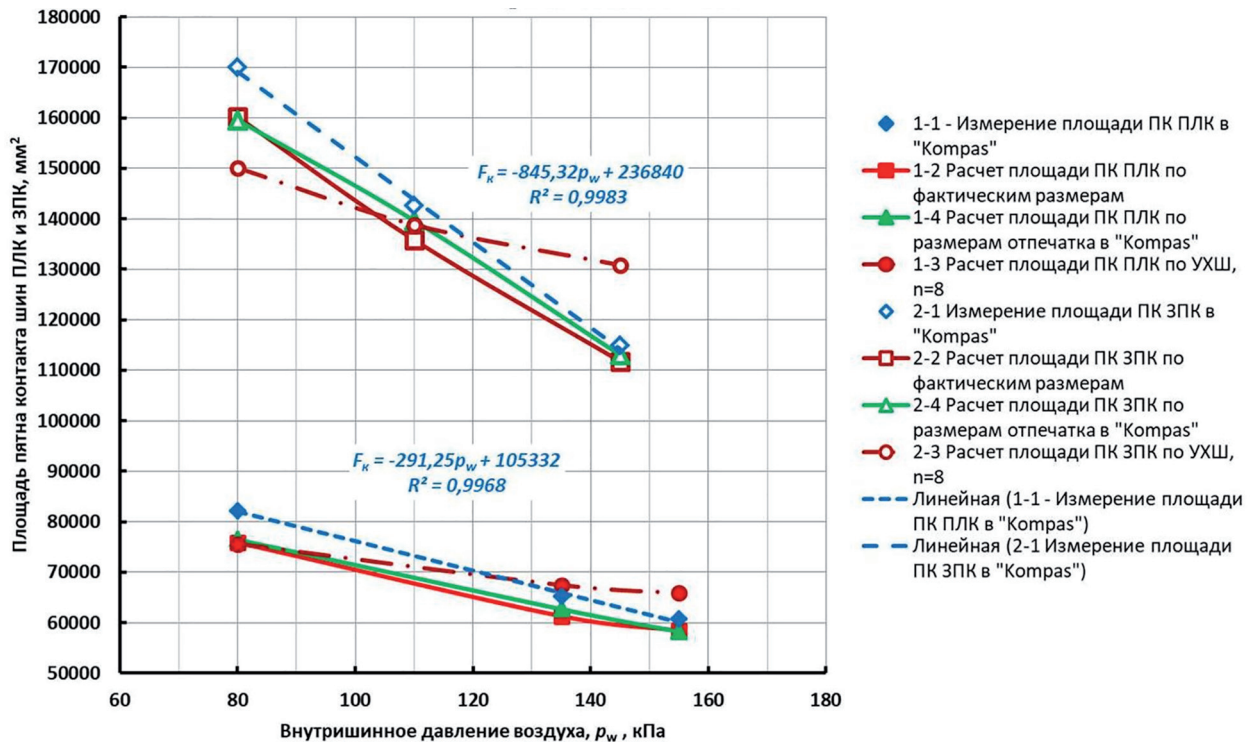


Рис. 1. Изменение контурной площади пятна контакта шин переднего (ПЛК – 360/70R24) и заднего (ЗПК – 18,4R34) мостов трактора MTZ-1025.2 на жестком опорном основании, определенной четырьмя способами

Fig. 1. Changing the contour area of the contact patch of the tires of the front (FLW with tire 360/70R24) and rear (RRW with tire 18.4R34) axles of the MTZ-1025.2 tractor on a rigid support base, defined in 4 ways

вом, представлена погрешность определения F_k этими способами относительно 1-го, базового, способа (условная ошибка определения равна нулю) ее опосредованного определения с помощью компьютерной программы.

Согласно рис. 1, 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 $R^2 = 0,9968...0,9983$ линий тренда (прерывистые линии) зависимости по базовому способу определения $F_{к1}$.

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 нормально-

го давления на почву. Основной способ определения контурной площади отпечатка в программе Kompas (столбец 3), как и расчетный способ определения контурной площади отпечатка по его линейным размерам, определенным в «Компас» (столбец 7), характеризуются примерно одинаковой низкой погрешностью определения данными способами площади квадрата 100x100 мм, закрепленном в центре отпечатка при его фотографировании (столбцы 3 и 7) относительно площади квадрата, определенной расчетом по его фактическим размерам (столбец 5). Погрешность определения площади данными способами не превышает 1,5 %, уровня регламентируемого ГОСТ 7057-2001 [3].

Существенно большая погрешность расчетных способов определения контурной площади отпечатка (столбцы 4, 6 и 8) по отношению к измерительному опосредованному способу (столбец 2), принятому за базовый, более всего характеризуемому точностью определения площади квадрата 100x100 мм данным способом (столбец 3), связана, в основном, с некоторой неадекватностью идентификации действительной

формы отпечатка с формой эллипса. При этом погрешность (столбцы 4 и 6) достигает в сторону занижения $-7,69\%$ для шины 360/70R24, а для шины 18,4R34 она равна $-6,099\%$.

Расчеты площади отпечатков по четвертому способу с использованием параметров УХШ и погрешность ее определения по отношению к основному методу (столбец 8) произведены для данных шин при условно принятой 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-му 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 p_w занижение площади $F_{к4}$ 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, в которых рассчитан коэффициент идентификации расчетных 2-го и 4-го способов определения контурной площади пятна контакта видно, что в случае «недогруза» коэффициент k_F , предлагаемый А.Ю. Ребровым, является величиной переменной и может быть аппроксимирован линейной зависимостью (рис. 2), о чем свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,862-0,998$.

Выводы

1. Действительный и расчетный по модели Л.В. Бидермана характеры изменения контурной площади пятна контакта протектора шины от внутришинного давления определяются обратной линейной зависимостью. При этом уменьшая внутришинное давление в шинах со 155 и 145 кПа до 80 кПа при штатных на-

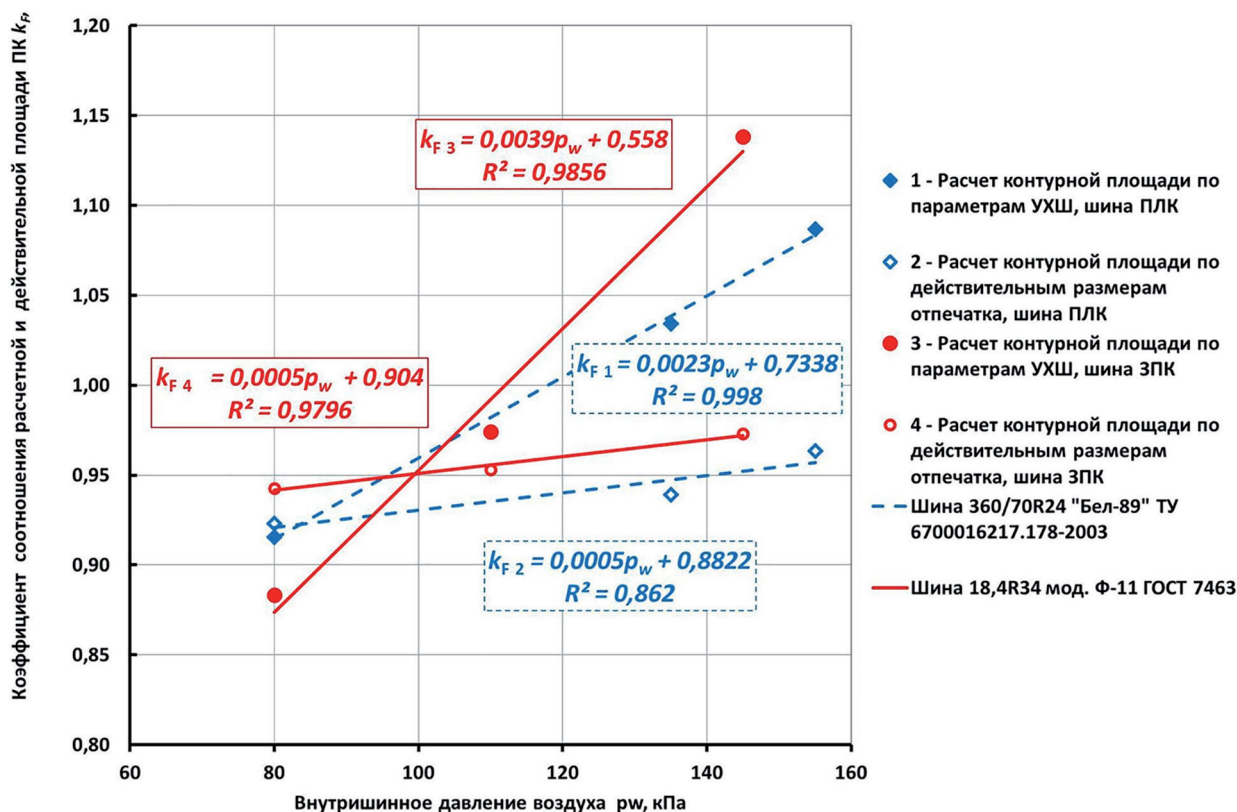


Рис. 2. Зависимость коэффициента идентификации k_F расчетного способа оценки контурной площади пятна контакта протектора шины на жестком опорном основании от внутришинного давления p_w при $n = 8$ для штатной нагрузки на мосты трактора МТЗ-1025.2

Fig. 2. Dependence of the identification coefficient k_F of the calculated method for assessing the contour area of the contact patch of the tire tread on a rigid support base on the tire pressure p_w at $n = 8$ for the nominal load on the axles of the MTZ-1025.2 tractor

грузках для испытанного трактора МТЗ-1025.2, можно увеличить площадь контакта с жестким опорным основанием и, соответственно, уменьшить максимальное нормальное давление q_{\max}^k 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}^k и показателя воздействия на почву колесного движителя U) можно воспользоваться нетрудоемким четвертым способом – расчетом нормального статического прогиба шины $f_{\text{шт}}$ и, соответственно, контурной площади пятна контакта протектора шины на жестком опорном основании F_k при известных константах УХШ; даже при условности определения нормы слойности $n = 8$ современных радиальных шин 360/70R24 и 18,4R34 – ошибка 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» (при $f_{\text{шт}} < [f]$), аппроксимируя в последнем случае коэффициент идентификации принятого расчетного способа прямой линейной зависимостью.

4. Проведенная оценка возможности применения 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 через оценку значений максимального нормального давления q_{\max}^k (кПа) и показателя воздействия на почву единичного колесного движителя U_i (кН/м), завышая, с учетом обратной зависимости от площади контакта протектора шины с опорным основанием, их значения при нижних значениях рекомендуемых давлений воздуха в шине и занижая при верхних значениях рекомендуемого диапазона давлений воздуха в ней, но не более 8–14 %. Это яв-

ляется 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 радиальной (вертикальной) нагрузки на шину G_k и давлений воздуха в ней p_w , соответствующих допустимому значению статического нормального прогиба шины $[f_{\text{шт}}]$.

Разработана в среде ППП «Microsoft Excel» программа расчета площади пятна контакта шины с жестким опорным основанием на основе определения параметров универсальной характеристики шины и на их основе – вторичных эксплуатационных параметров шины, как единичного колесного движителя, в том числе и показателей воздействия на почву q_{\max}^k и U в режимах номинального нагружения, рекомендуемых производителем шины, то есть соответствующих нагрузочной характеристике. Разработаны такие методические рекомендации по применению данной программы [15] с примером расчета для шины 290-508 (11.2-20), скриншот листа которого «МТЗ-82 (перед)» файла-программы «Электронная таблица. Универсальная характеристика шины – 2017. V.2» приведен на рис. 3.

Литература

1. ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
2. Ксеневиц И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
3. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 11 с.
4. ГОСТ 7463-2003. Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 28 с.
5. URL: <http://www.michelinag.com>.
6. UN/ECE Regulation No.106.
7. Michelin Agriculture and Compact Line Data Book. – 2013. URL: <http://www.michelinag.com>.
8. Data book for Firestone brand AG tires. – 2011. (www.firestoneag.com).
9. Experience the Good Year advantage. – 2014. URL: <http://www.titan-intl.com>.
10. The Power beneath Blue Power. URL: http://www.trelleborg.com/wheelsystems_us.

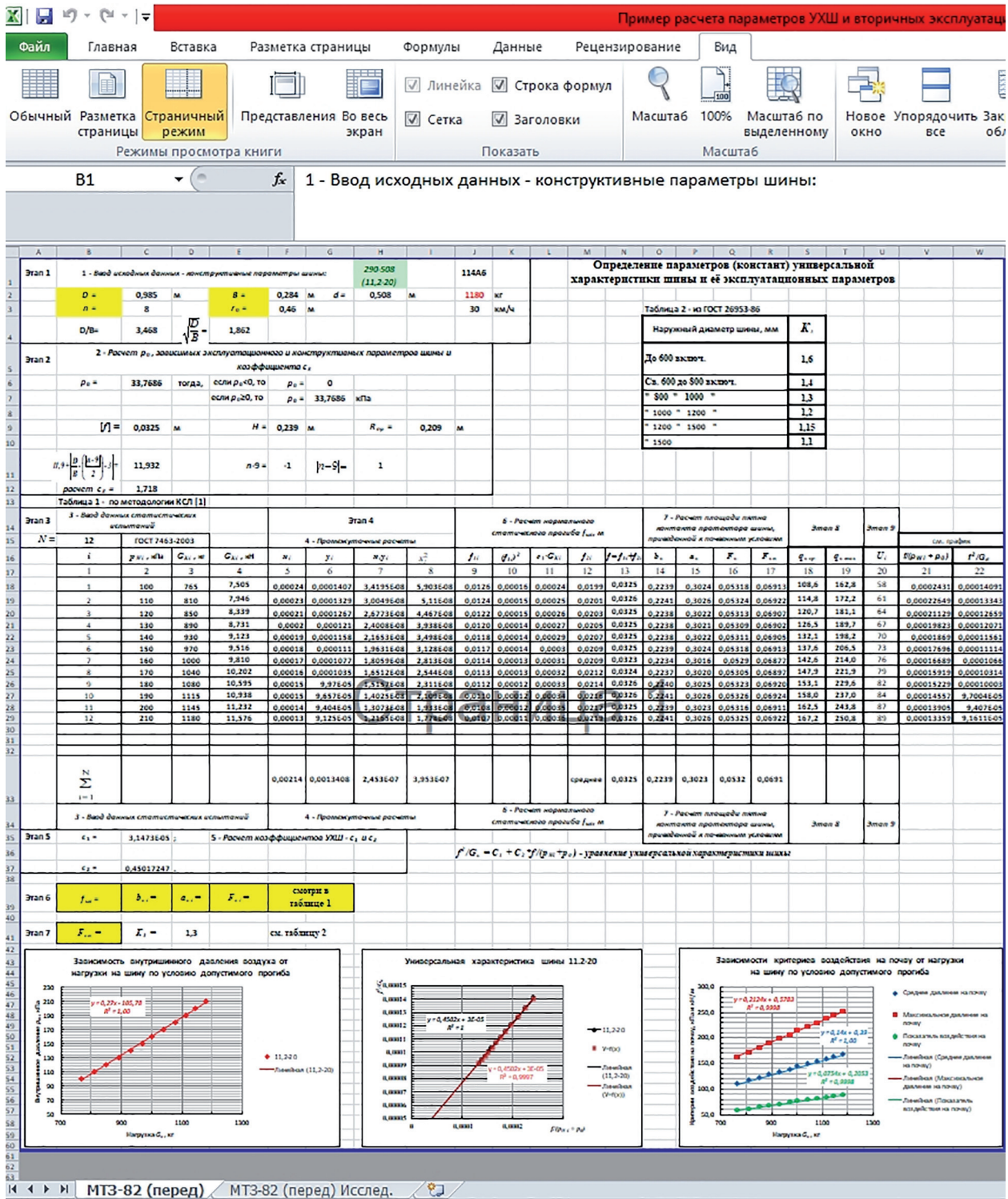


Рис. 3. Пример расчета параметров УХШ и вторичных эксплуатационных параметров шины как единичного колесного движителя

Fig. 3. An example of calculating the parameters of UTC and secondary operational parameters of a tire as a single wheel propeller

11. Agricultural tires. Technical data book 2nd edition. Mitas. – 2014. URL: <http://www.mitasag.com>.
12. Bridgestone VT-Tractor tyres. URL: <http://www.bridgestone.co.uk>.

13. Ребров Ю.А., Мигущенко Р.П. Использование информационных технологий при идентификации показателей инновационных тракторных сельскохозяйственных шин категорий IF и VF //

Механика та машинобудування. 2015. № 1. С. 98–105.

14. Липкань А.В., Панасюк А.Н., Кашбулгайанов 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. DOI: 10.33619/2414-2948/43/27.
15. Липкань А.В., Панасюк А.Н., Кашбулгайанов Р.А. Определение параметров универсальной характеристики и эксплуатационных параметров шины как единичного колесного движителя: методические рекомендации / М-во высш. образования и науки РФ; Дальневост. науч.-исслед. Ин-т механизации и электрификации с.х. Благовещенск: Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2019. 44, с.; ил. ISBN 978-5-9642-0475-6.
7. Michelin Agriculture and Compact Line Data Book. 2013. URL: <http://www.michelinag.com>.
8. Data book for Firestone brand AG tires. 2011. URL: <http://www.firestoneag.com>.
9. Experience the Good Year advantage. 2014. URL: <http://www.titan-intl.com>.
10. The Power beneath Blue Power. URL: http://www.trelleborg.com/wheelsystems_us.
11. Agricultural tires. Technical data book 2nd edition. Mitas. 2014. URL: <http://www.mitasag.com>.
12. Bridgestone VT-Tractor tyres. URL: <http://www.bridgestone.co.uk>.
13. Rebrov YU.A., Migushchenko R.P. The use of information technology in the identification of indicators of innovative tractor agricultural tires of IF and VF categories. Mekhanika ta mashinobuduvannya. 2015. No 1, pp. 98–105 (In Russ.).
14. Lipkan' A.V., Panasyuk A.N., Kashbulgayanov R.A. Substantiation of the choice of the method for determining the parameters of the contact patch of the pneumatic wheel propeller with the support base. Byulleten' nauki i praktiki. 2019. Vol. 5. No 6, pp. 212–228 (In Russ.). DOI: 10.33619/2414-2948/43/27.
15. Lipkan' A.V., Panasyuk A.N., Kashbulgayanov R.A. Opredeleniye parametrov universal'noy kharakteristiki i ekspluatatsionnykh parametrov shiny kak yedinichnogo kolesnogo dvizhitelya: metodicheskkiye rekomendatsii [Determination of the parameters of the universal characteristics and operational parameters of the tire as a single wheel propeller: methodological recommendations]: M-vo vyssh. obrazovaniya i nauki RF; Dal'nevost. nauch.-issled. In-t mekhanizatsii i elektrifikatsii s.kh. Blagoveshchensk: Izd-vo Dal'nevost. gos. agrar. un-ta Publ., 2019. 44 p. ISBN 978-5-9642-0475-6.

Reference

1. GOST R 58656-2019 Agricultural mobile equipment. Methods for determining the impact of propellers on the soil. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 23 p.
2. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. Khodovaya sistema – pochva – urozhay [Undercarriage-soil-crop]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
3. GOST 7057-2001 Agricultural tractors. Test methods. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 11 p.
4. GOST 7463-2003 Pneumatic tires for tractors and agricultural machinery. Technical conditions. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2004. 28 p.
5. URL: <http://www.michelinag.com>.
6. UN/ECE Regulation No.106.