

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕС ТРАКТОРОВ

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE MAIN FACTORS ON THE CHARACTERISTICS OF THE ELASTIC PROPERTIES OF ELASTIC WHEELS OF TRACTORS

Д.И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ, д.т.н.

Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева. Москва, Россия,
dina.zolotarevskaya@mail.ru

D.I. ZOLOTAREVSKAYA, DSc in Engineering

Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev
Moscow Agricultural Academy Moscow, Russia,
dina.zolotarevskaya@mail.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию упругих свойств эластичных тракторных колес и анализу влияния на них давления воздуха в шинах и вертикальных нагрузок на оси колес. По разработанной компьютерной программе, позволяющей реализовать предложенный в этой работе метод расчета характеристик упругих свойств тракторных колес с пневматическими шинами, проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты двух типов. В компьютерных экспериментах первого типа исследовали зависимости коэффициентов упругости ряда эластичных колес при работе на практически недеформируемом основании тракторов МТЗ–82 и МТЗ–142 от давления воздуха в шинах при различных значениях вертикальных динамических нагрузок на оси соответствующих колес тракторов. В компьютерных экспериментах второго типа исследовали зависимости коэффициентов упругости и нормального прогиба колес с шинами различных типоразмеров от давления воздуха в шинах при постоянных значениях вертикальных динамических нагрузок на оси колес. В компьютерных экспериментах обоих типов отклонения найденных расчетным путем характеристик упругих свойств эластичных колес находятся в пределах точности измерений экспериментальных данных. По результатам компьютерных экспериментов первого типа получены уравнения регрессии, отражающие зависимости коэффициентов упругости исследованных эластичных колес от давления воздуха в шине при различных значениях вертикальных динамических нагрузок на оси колес. По результатам компьютерных экспериментов второго типа получены уравнения регрессии коэффициентов упругости и нормального прогиба колес с шинами различных типоразмеров от давления воздуха в шинах при постоянных значениях вертикальных динамических нагрузок на оси колес. Высокие значения корреляционных отношений для этих уравнений регрессии свидетельствуют о высокой значимости связей в найденных корреляционных зависимостях. Применение предложенного метода расчета позволяет упростить и сократить работу по выбору шин оптимальных типоразмеров к различным тракторам с учетом конкретных условий их эксплуатации. Расчетным путем установлено, что на задней оси трактора МТЗ-82 оптимальными являются колеса с шинами 18.4R38.

Ключевые слова: эластичное колесо, коэффициент упругости, давление воздуха в шине, нормальный прогиб шины, математическое моделирование.

The work is devoted to the theoretical study of the elastic properties of tractor wheels and the analysis of the effect of air pressure in the tires and vertical loads on the wheel axles. According to the developed computer program, which allows to implement the method of calculating the characteristics of the elastic properties of tractor wheels with pneumatic tires proposed in this work, one-factor and complete factor computer experiments of two types were carried out. In computer experiments of the first type, the dependences of the elasticity coefficients of a number of elastic wheels were investigated when operating on the practically non-deformable basis of tractors MTZ-82 and MTZ-142 from the air pressure in the tires at different values of the vertical dynamic loads on the axes of the corresponding wheels of tractors. In computer experiments of the second type, the dependences of the elasticity coefficients and the normal deflection of the wheels with tires of different sizes from the air pressure in the tires at constant values of the vertical dynamic loads on the wheel axles were investigated. In computer experiments of both types, the deviations of the elastic properties of elastic wheels found by calculation are within the limits of the accuracy of measurements of the experimental data. Based on the results of computer experiments of the first type, regression equations were obtained reflecting the dependence of the elasticity coefficients of the elastic wheels studied on the air pressure in the tire for various values of the vertical dynamic loads on the wheel axes. According to the results of computer experiments of the second type, equations of regression of the coefficients of elasticity and normal deflection of wheels with tires of different sizes from air pressure in tires at constant values of vertical dynamic loads on the wheel axle are obtained. The high correlation values for these regression equations indicate the high importance of the relationships in the found correlation dependencies. The application of the proposed calculation method makes it possible to simplify and shorten the work on the choice of tires of optimum sizes to different tractors, taking into account the specific conditions of their operation. It was calculated that wheels with tires 18.4R38 are optimal on the rear axle of the MTZ-82 tractor.

Keywords: elastic wheel, coefficient of elasticity, air pressure in the tire, normal deflection of the tire, mathematical modeling.

Введение

Для сельскохозяйственного машиностроения весьма актуально решение проблем повышения тягово-сцепных свойств тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники, увеличения плавности хода машин, оптимизации уплотнения деформируемых оснований (почв, грунтов и т. п.) в результате воздействия мобильных средств. Этому должны способствовать разработка и широкое практическое применение методов, позволяющих достаточно точно рассчитывать показатели исследуемых процессов. Необходимо располагать формулами и алгоритмами расчетов показателей взаимодействия колес, снабженных пневматическими шинами (эластичных колес) с деформируемыми и принимаемыми недеформируемыми (асфальт, бетон) основаниями. Выполнено большое число работ, посвященных исследованиям взаимодействия колес с пневматическими шинами с различными основаниями [1–4]. Однако в настоящее время теория качения эластичных колес разработана недостаточно.

Точность расчетных формул зависит прежде всего от выбора определяющих (исходных) уравнений, моделирующих закономерности деформирования контактирующих тел. Для практического применения этих формул нужно знать численные значения параметров определяющих уравнений. В работах [5–8] выявлены закономерности деформирования ряда тракторных и автомобильных колес с пневматическими шинами. Большое внимание уделено исследованию свойств эластичных колес, обладающих упругими свойствами. Предложены метод расчета характеристик упругих свойств эластичных тракторных колес и позволяющая реализовать этот метод компьютерная программа.

Цель исследования

Цели данной работы состояли в следующем. На основе применения предложенного в работе автора [8] метода расчета характеристик упругих свойств эластичных тракторных колес:

- 1) выявить влияние основных факторов (давления воздуха в шинах, вертикальной динамической нагрузки на оси колес) на величины коэффициентов упругости исследованных эластичных колес;
- 2) провести сопоставление между собой эластичных колес с шинами различных типо-

размеров по их коэффициентам упругости и нормальному прогибу, оказывающим значительное влияние на уплотняющее воздействие тракторов на почву, тяговые свойства и плавность хода тракторов.

Методы и результаты

Выявление расчетным путем влияния типо-размеров шин эластичных тракторных колес, давления воздуха в шинах, вертикальных нагрузок на оси колес на характеристики их упругих свойств представляет собой научную новизну данной работы. В работах [5, 8] описаны экспериментальные исследования, проведенные с целью выявления закономерностей деформирования эластичных колес трактора МТЗ–142 с шинами 11.2R20 (передние колеса) и 16.9R38 (задние колеса).

Эксперименты выполнены в эллинге кафедры тракторов, автомобилей и ЭМТП Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева (В настоящее время Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева). Опыты описаны в работах [5, 8]. В опытах измеряли нормальные напряжения в продольных плоскостях симметрии колес, распределенные вдоль линий контакта колес при их качении по практически недеформируемому основанию (бетон, на который был насыпан сухой песок слоем 0,5 см).

В опытах изменяли давление воздуха в шинах передних и задних колес (p_{w1} и p_{w2}) и вертикальные динамические нагрузки на их оси (G_{01} и G_{02}). Нормальные контактные напряжения измеряли тензометрическими датчиками давления мембранного типа. Экспериментальные данные обработаны статистически.

Исследования показывают, что область контакта колеса и основания приближенно может быть представлена эллипсом с полуосями a_k и b_k , где a_k – длина линии контакта колеса и основания в центральном продольном сечении колеса, называемая длиной пятна контакта, b_k – длина линии контакта колеса и основания в центральном поперечном сечении колеса, называемая шириной пятна контакта [2].

По экспериментальным данным построены эпюры $\sigma(d)$ и кривые $\sigma(h)$, где $d = R \sin \Psi$, R – половина наружного диаметра шины, $\Psi \in [0, \Psi_b]$ – текущий угол контакта колеса и основания, Ψ_b – половина полного угла контакта колеса и основания, $h = R(\cos \Psi - \cos \Psi_b)$.

В работах [5, 8] представлены некоторые из типичных экспериментальных эпюр напряжений $\sigma(d)$, полученные при качении по практически недеформируемому основанию колес с шинами 11.2R20 и 16.9R38. При высоких значениях давления воздуха в шинах эпюры $\sigma(d)$ представляют собой кривые, симметричные относительно вертикальной оси, проходящей через середину линии контакта колеса и основания; эти эпюры имеют один максимум, находящийся на указанной вертикальной оси. При низких значениях p_w эпюры $\sigma(d)$ имеют седлообразную форму; это показывает, что при уменьшении p_w грузоподъемность шины снижается.

Симметричность эпюр $\sigma(d)$ относительно вертикальной оси, проходящей через середину линии контакта, свидетельствует о том, что исследованные эластичные колеса с шинами 11.2R20 и 16.9R38 в рассмотренных интервалах изменения нормальных контактных напряжений при качении деформируются как практически упругие.

В работах [5, 8] приведены построенные по экспериментальным данным кривые $\sigma(h)$. У этих кривых ветви нагрузки и разгрузки практически совпадают.

Зависимости $\sigma(h)$ при $\sigma < (0,8-0,9)$ МПа близки к линейным. У колеса с шиной 11.2R20 при p_w , равном 0,17–0,26 МПа, линейность свойств сохраняется до $\sigma = (1,4-1,6)$ МПа. Для линейно упругого эластичного колеса

$$\sigma = E_k h, \quad (1)$$

где E_k – коэффициент упругости эластичного колеса.

При работе тракторов на почве напряжения $\sigma < 0,3$ МПа в результате увеличения площади контакта шины и основания, эластичные колеса с шинами 11.2R20 и 16.9R38 деформируются как линейно упругие при всех допустимых значениях G_{0i} и p_{wi} ($i = 1$ для оси переднего колеса трактора и $i = 2$ для оси его заднего колеса).

Нелинейные зависимости $\sigma(h)$ приближенно могут быть заменены линейными.

В результате проведенного исследования [8] выявили, что тракторные колеса с пневматическими шинами, соответствующими ГОСТ 7463-80, ГОСТ 7463-89, при качении по почве деформируются как практически линейно упругие при всех допустимых значениях вертикальных динамических нагрузок на их

оси и внутреннего давления воздуха в шинах. Это же относится и к тракторным колесам с пневматическими шинами, соответствующим ГОСТ 7463-2003. Закономерность деформирования этих колес при радиальном нагружении с большой степенью точности моделируется уравнением (1).

Разработан расчетный метод определения коэффициентов упругости $E_{k\sigma}$ эластичных тракторных колес [7, 8]. Предложена позволяющая реализовать этот метод компьютерная программа Modul E.

Для нахождения E_k этим методом должны быть заданы: наружный D , м, и посадочный d_1 , м, диаметры шины; ширина профиля шины $B_{ш}$, м; коэффициент насыщенности рисунка протектора v ; вертикальная нагрузка на ось колеса G_0 , кН; давление воздуха в шине p_w , кПа; норма слойности шины n ; допустимый статический прогиб шины $[f]$, м; коэффициенты p_0 , кПа; c_1 , м²/кН и c_2 , 1/м, предложенные В.Л. Бидерманом [10], характеризующие упругие свойства эластичного колеса. Коэффициенты p_0 , c_1 и c_2 находят расчетным путем по заданному нагрузочному ряду и допустимому статическому прогибу шины $[f]$ [2].

Коэффициенты p_0 , c_1 и c_2 и другие параметры исследованных в данной работе шин приведены в работе [8].

Расчеты для нахождения E_k выполняют следующим методом. Последовательно вычисляем: 1) нормальный прогиб шины f_k ; 2) параметры шины: радиус кривизны протектора шины в поперечном сечении $R_{кр}$, величину x , 3) ширину пятна контакта шины с жестким основанием b_k , 4) длину пятна контакта шины с жестким основанием a_k , 5) половину угла контакта колеса и основания ϕ_b , 6) коэффициент γ неравномерности распределения напряжений по ширине колеса, 7) коэффициент упругости эластичного колеса $E_{k'}$.

Формулы для вычисления f_k , $R_{кр}$, b_k , a_k даны в работе [2]. Формулы для вычисления ϕ_b , γ , $E_{k'}$ получены в работе [8].

В работе [7] приведены расчетные значения $E_{k\sigma}$, найденные по компьютерной программе Modul E для колес с шинами 11.2R20 и 16.9R38 при различных значениях давления воздуха в шинах и вертикальных нагрузок на ось колес. Так, для колеса с шиной 11.2R20 при $G_{01} = 8$ кН и $p_{w1} = 180$ кПа экспериментальное значение коэффициента упругости $E_{k\sigma} = 72,3$ МН/м², а соответствующее расчетное

значение, полученное в результате расчетов по программе Modul, $E_k = 65,6 \text{ МН/м}^3$. Отклонения расчетных E_k значений от экспериментальных $E_{kэ}$ значений коэффициента упругости составляют 9,6 %. Средние относительные отклонения величин $E_{кр}$ от соответствующих значений коэффициентов упругости шин $E_{кэ}$, найденных путем обработки экспериментальных эпюр напряжений $\sigma(\Psi)$ для колес с шинами 11.2R20 и 16.9R38, соответственно, равны 9,12 и 3,87 %, стандартные отклонения $\sigma(E_k)$ для этих колес – 4,52 и 2,91 %. Расхождения находятся в пределах точности измерений экспериментальных данных. Это показывает, что разработанный метод расчета и компьютерная программа Modul E могут применяться для расчетного определения коэффициентов упругости колес с пневматическими шинами, соответствующих ГОСТ 7463-80, ГОСТ 7463-89, ГОСТ 7463-2003.

В данной работе по разработанной компьютерной программе Modul E проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты, в которых исследовали зависимости коэффициентов упругости E_{ki} ряда колес с пневматическими шинами от давления воздуха в шинах p_{wi} при различных значениях вертикальных нагрузок G_{0i} на соответствующие оси колес, а также от давления воздуха в шинах p_{wi} и от различных значений вертикальных нагрузок G_{0i} на соответствующие оси колес. Результаты выполненных расчетов использовали для построения графиков, характеризующих зависимости коэффициентов упругости исследованных эластичных колес от p_{wi} и G_{0i} . Для построения графиков применены компьютерные программы SGWIN. EXE и программы, составленные в комплексной компьютерной программе MATLAB. По программе SGWIN. EXE найдены при различных G_{0i} уравнения регрессии, отражающие зависимости коэффициентов упругости E_k исследованных эластичных колес от давления воздуха в шине. Уравнения регрессии отыскивали в виде: $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$. В расчетах четвертое слагаемое во всех найденных уравнениях регрессии получено близким к нулю: найденные зависимости $y(x)$ близки к квадратичным. Корреляционные отношения для найденных уравнений регрессии не менее 0,99. Это показывает, что найденные зависимости близки к функциональным. Например, для колеса с шиной 16.9R38 при $G_{02} = 11,65 \text{ кН}$

уравнение регрессии $E_{k2}(p_{w2})$ имеет вид $y = 8,809 + 0,189x + 0,0013x^2$ (обозначения: $y = E_{k2}$, $x = p_{w2}$). По программе, составленной в MATLAB, построили соответствующие найденным уравнениям регрессии графики. Таким образом, построенные графики характеризуют корреляционные зависимости $E_{k2}(p_{w2})$.

На рис. 1, 2 и 3 представлены графики, характеризующие зависимости коэффициентов упругости E_{ki} колес, соответственно, с шинами 11.2R20, 16.9R38 и 13.6R38 от давления воздуха в шине, изменяющегося в интервале $p_{wi} \in [90-210] \text{ кПа}$ при различных значениях вертикальных нагрузок G_{0i} на оси колес.

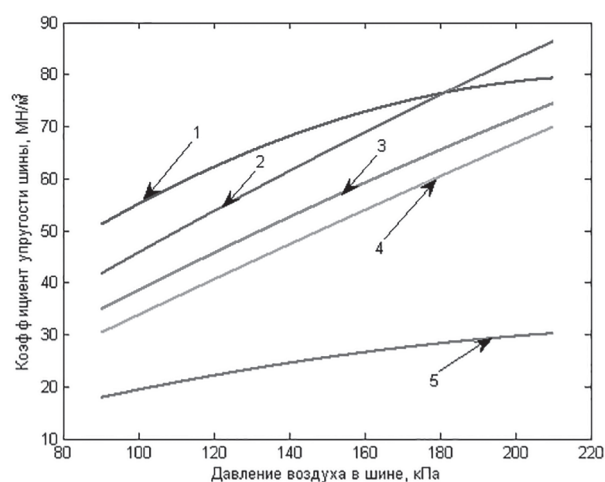


Рис. 1. Корреляционные зависимости коэффициентов упругости эластичного колеса с шиной 11.2R20 от давления воздуха в шине при различных значениях вертикальных нагрузок на ось колеса: 1, 2, 3, 4, 5 – при $G_{01} = 4; 6; 8; 10; 14 \text{ кН}$

Расчетным путем выявили, что для исследованных эластичных колес коэффициент упругости E_{ki} при увеличении давления воздуха в шинах $p_{wi} \in [90-210] \text{ кПа}$ возрастает, а при увеличении G_{0i} уменьшается. Так, получили, что у колеса с шиной 13.6R38 при $G_{02} = 6,08 \text{ кН}$ и возрастании давления воздуха в шине от 100 до 180 кПа коэффициент E_{k2} возрастает в среднем на 39,1 % (от 46 до 64 МН/м³).

Провели расчеты, представляющие собой опыты в трех сериях полного факторного компьютерного эксперимента типа $N = 2^2$, где N – число опытов в серии, число 2, стоящее в основании степени выражения из правой части этой формулы – число влияющих факторов, а показатель степени 2 – число уровней варьирования факторов [11]. В одной из серий полного

факторного компьютерного эксперимента типа $N = 2^2$ исследовали влияние на коэффициент упругости E_{k2} эластичного колеса с шиной 13.6R38 изменения давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на ось колеса при совместном изменении этих факторов. Для каждого влияющего фактора выбрали основной уровень и по два равно от него отстоящих – нижний и верхний, которые соответственно равны: для $G_{02} = 8,44$ и $17,06$ кН, для $p_{w2} = 90$ и 180 кПа.

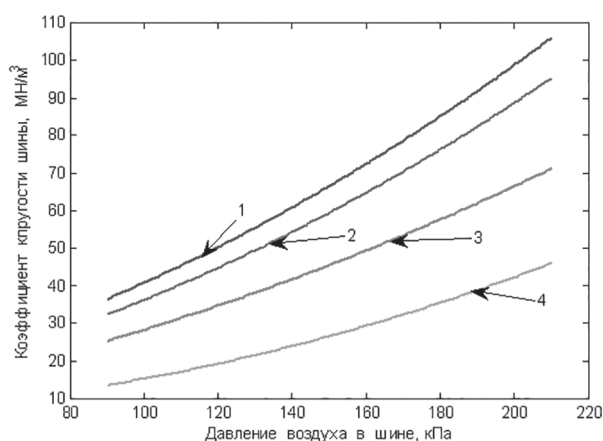


Рис. 2. Корреляционные зависимости коэффициентов упругости эластичного колеса с шиной 16.9R38 от давления воздуха в шине при различных значениях вертикальных нагрузок на ось колеса:
1, 2, 3, 4 – при $G_{02} = 11,65; 13,58; 17,44; 20,03$ кН

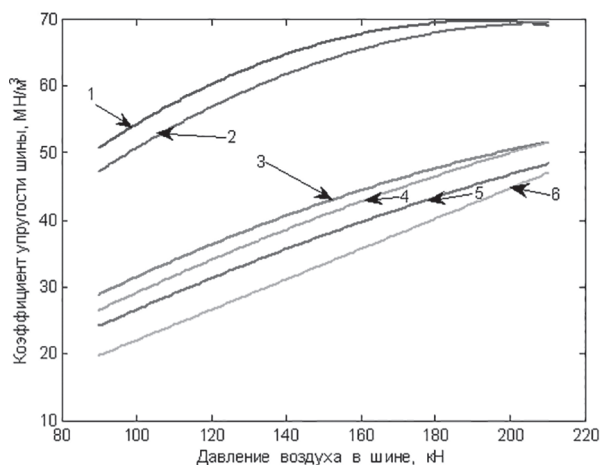


Рис. 3. Корреляционные зависимости коэффициентов упругости эластичного колеса с шиной 13.6R38 от давления воздуха в шине при различных значениях вертикальных нагрузок на ось колеса:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – при $G_{02} = 4,35; 6,08; 11,441; 13,441; 15,441; 17,05$ кН

Уравнение регрессии отыскивали в следующем виде:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2. \quad (2)$$

В результате расчетов по компьютерной программе SGWIN.EXE для колеса с шиной 13.6R38 получили выраженное в натуральных значениях переменных следующее уравнение регрессии:

$$y = 2,897 - 1,072x_1 + 0,262x_2 - 0,0028x_1x_2. \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции в уравнении (3) равен 0,9970, что свидетельствует о большой точности результатов расчетов по этому уравнению.

На рис. 4 представлена соответствующая уравнению (3) поверхность, характеризующая корреляционную зависимость коэффициента упругости эластичного колеса с шиной 13.6R38 от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на ось колеса при совместном изменении этих влияющих факторов. Рис. 4 построен по компьютерной программе, составленной в MATLAB.

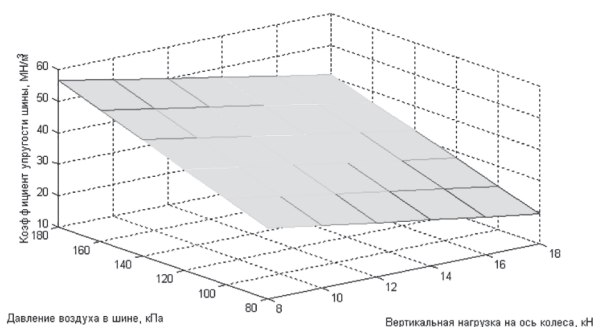


Рис. 4. Корреляционная зависимость коэффициента упругости колеса с шиной 13.6R38 от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на ось колеса при совместном изменении этих факторов

Полные факторные компьютерные эксперименты, как и однофакторные, показали, что для исследованных эластичных колес коэффициент упругости E_{ki} при увеличении давления воздуха в шинах $p_{wi} \in [90-210]$ кПа возрастает, а при увеличении G_{0i} уменьшается. Для колеса с шиной 13.6R38 это видно из уравнения регрессии (3) и рис. 4. Совместное изменение влияющих факторов приводит к некоторому снижению коэффициента E_{ki} .

При работе тракторов на почве показатели взаимодействия тракторов с почвой (уплотняющее воздействие трактора на почву, его тяго-

вые свойства, плавность хода) в значительной мере зависят от того, какими шинами укомплектован данный трактор. Эти показатели зависят от коэффициентов упругости эластичных колес, которые стоят на тракторе. Весьма важно располагать методом расчета, позволяющим найти и сравнить между собой коэффициенты упругости различных эластичных колес при различных вертикальных нагрузках на оси колес и значений давления воздуха в шинах. Разработанный нами метод расчета позволяет выполнить такое сравнение.

Одним из способов снижения потерь энергии при работе трактора является более точный подбор шин и выбор оптимальных режимов и условий их эксплуатации. Шины оптимальных типоразмеров к трактору данной марки обеспечивают при работе МТА с заданной скоростью наименьшее уплотнение почвы и наилучшие тяговые свойства. В настоящее время выбор шин оптимальных типоразмеров с учетом агротехнических требований к плотности почвы на различной глубине выполняют только по результатам экспериментов. Для рационального решения стоящих при выполнении технологических операций в сельскохозяйственном производстве вопросов важно располагать расчетными методами выбора шин оптимальных типоразмеров.

В данной работе провели компьютерные эксперименты, в которых нашли коэффициенты упругости ряда эластичных колес с шинами различных типоразмеров в зависимости от давления воздуха в шинах p_{wi} при постоянной вертикальной нагрузке на оси колес $G_{0i} = 11,65$ кН. Давление воздуха в шинах изменяли в интервале $p_{wi} \in [90 - 210]$ кПа.

Коэффициенты упругости E_{ki} исследованных эластичных колес нашли по компьютерной программе Modul E. Уравнения регрессии $E_{ki}(p_{wi})$ для этих колес при $G_{0i} = 11,65$ кН получили по компьютерной программе SGWIN.EXE. Эти уравнения регрессии с большой степенью точности можно принять квадратичными. Так, для колеса с шиной 18.4R38 соответствующее уравнение регрессии имеет вид: $y = -2,14 + 0,441x - 0,00189x^2$, а для колеса с шиной 11.2R42 имеем уравнение регрессии: $y = -17,6 + 0,792x - 0,0023 x^2$. (Обозначения x и y в этих уравнениях те же, что и в уравнениях (2) и (3).) По программе, составленной в MATLAB, построили соответствующие найденным уравнениям регрессии графики.

На рис. 5 представлены графики, характеризующие корреляционные зависимости $E_{k2}(p_{w2})$ от давления воздуха в шинах при $G_{02} = 11,65$ кН для эластичных колес с шинами 13.6R38, 15.5R38, 16.9R38, 18.4R38, 11.2R42. Из рис. 5 видно, что наименьшие значения коэффициента упругости имеют колеса с шинами 18.4R38, а наибольшие – с шинами 11.2R42.

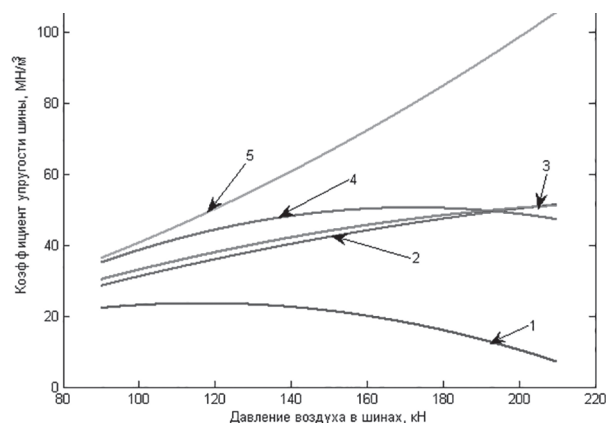


Рис. 5. Корреляционные зависимости коэффициентов упругости эластичных колес с шинами различных типоразмеров от давления воздуха в шинах при постоянной вертикальной нагрузке $G_{02} = 11,65$ кН:

1, 2, 3, 4, 5 – для колес с шинами 18.4R38; 13.6R38; 15.5R38; 16.9R38; 11.2R42

Расчеты, выполненные в работе [8], показали, что значения коэффициентов упругости, найденные при определенных G_{0i} и p_{wi} , а также конструкционные параметры колеса с пневматической шиной оказывают существенное влияние на уплотнение почвы при проходе этого колеса. В работе [8] получено, что наименьшее уплотнение почвы при проходе трактора МТЗ–82 возникает, если на задней оси этого трактора установлены колеса с шинами 18.4R38. Наибольшее уплотнение почвы – при проходе трактора МТЗ–82, если на задней оси этого трактора установлены колеса с шинами 11.2R42.

Желательно комплектовать трактор колесами с шинами оптимальных типоразмеров и имеющими оптимальное значение коэффициента упругости. В связи с этим важно располагать расчетным методом нахождения коэффициентов упругости эластичных колес различных типоразмеров и применять его на практике для выбора шин оптимальных типоразмеров при соответствующих значениях влияющих факторов.

Важным показателем, характеризующим упругие свойства эластичных колес, является нормальный прогиб шин. Нормальный прогиб шины влияет также на плавность хода трактора. Нормальный прогиб шины зависит от типоразмера шины, давления воздуха в шине, вертикальной нагрузки на ее ось.

В данной работе провели компьютерные эксперименты, в которых выявили зависимости нормального прогиба эластичных тракторных колес с шинами различных типоразмеров от давления воздуха в шине при постоянной вертикальной нагрузке на оси колес. Нормальный прогиб шин f_k нашли по компьютерной программе Modul E. Уравнения регрессии $f_{ki}(p_{wi})$ для этих колес при $G_{0i} = 11,65$ кН получили по компьютерной программе SGWIN.EXE. Найденные и уравнения регрессии описываются кубическими уравнениями. Так, для колеса с шиной 16.9R38 соответствующее уравнение регрессии имеет вид: $y = 7,56 - 52,00x + 203,07x^2 - 313,13x^3$, а для колеса с шиной 11.2R42 имеем уравнение регрессии: $y = 9,60 - 81,46x + 390,38x^2 - 670,74x^3$. (Обозначения: $y = f_k$, $x = p_{w2}$.) По программе, составленной в MATLAB, построили соответствующие найденным уравнениям регрессии графики.

На рис. 6 представлены графики, характеризующие корреляционные зависимости $f_{k2}(p_{w2})$ при $G_{02} = 11,65$ кН для эластичных колес с шинами 13.6R38, 15.5R38, 16.9R38, 18.4R38, 11.2R42. Из рис. 6 видно, что наименьшие значения нормального прогиба имеют колеса с шинами 16.9R38, а наибольшие – с шинами 11.2R42. Замена шины 11.2R42 на шину 16.9R38 при $G_{02} = 11,65$ кН и $p_{w2} = 0,1$ МПа приводит к уменьшению нормального прогиба эластичного колеса на в среднем на 13 %. Использованный в данной работе метод расчета нормального прогиба шины и коэффициента упругости эластичного колеса может быть применен для шин других типоразмеров.

Выводы

Для рационального выбора шин к тракторам определенных марок необходимо разработать и широко применять на практике методы расчета показателей, характеризующих закономерности деформирования шин различных типоразмеров.

Эластичные колеса с шинами, соответствующими ГОСТ 7463-80, ГОСТ 7463-89, ГОСТ 7463-2003, при качении по почве деформируются как практически линейно упругие при

всех допустимых значениях давления воздуха в шинах и вертикальных нагрузок на оси колес. Их свойства с большой степенью точности моделируются уравнением (1).

Проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты, в результате которых нашли корреляционные зависимости коэффициентов упругости исследованных эластичных колес от давления воздуха в шинах при различных значениях вертикальных нагрузок на ось колеса.

Компьютерные эксперименты выполнены на основе математического моделирования закономерностей деформирования эластичных тракторных колес, применения предложенного метода расчета исследуемых показателей и позволяющих реализовать этот метод разработанных нами компьютерных программ.

В результате проведения компьютерных экспериментов нашли корреляционные зависимости коэффициентов упругости исследованных эластичных колес, а также корреляционные зависимости нормального прогиба шин этих колес от давления воздуха в шинах при постоянной вертикальной нагрузке на оси колес. Найденные характеристики важны для выявления влияния исследованных показате-

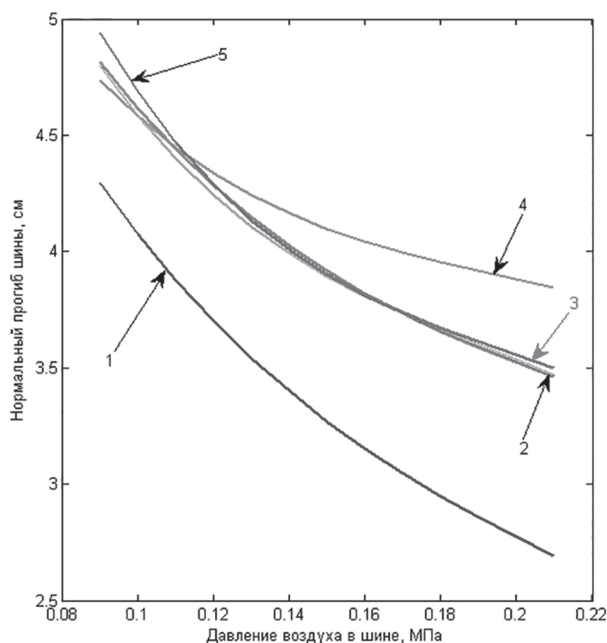


Рис. 6. Корреляционные зависимости нормального прогиба эластичных колес с шинами различных типоразмеров от давления воздуха в шинах при постоянной вертикальной нагрузке на оси колес $G_{02} = 11,65$ кН:
1, 2, 3, 4, 5 – для колес с шинами 16.9R38; 18.4R38; 13.6R38; 15.5R38; 11.2R42

лей на уплотнение почвы при работе тракторов, тяговые свойства и колебания тракторов.

Расчетным путем показано, что при увеличении давления воздуха в шине p_w коэффициент упругости эластичного колеса E_{ki} у колес с шинами 11.2R20, 16.9R38, 13.6R38, 15.5R38 возрастает; при увеличении вертикальной нагрузки на ось колеса G_{0i} коэффициент упругости эластичного колеса E_{ki} уменьшается. Нормальный прогиб шины f_{ki} уменьшается при увеличении p_{wi} .

Расчетным путем нашли, что для установки на заднюю ось трактора МТЗ–82 оптимальными являются колеса с шинами 18.4R38.

Необходимы дальнейшие исследования по разработке методов расчета закономерностей деформирования эластичных колес с шинами различных типоразмеров.

Литература

1. Тракторы. Теория / под ред. В.В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
2. Ксеневиц И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
3. Третьяков О.Б. Исследование взаимодействия протектора автомобильных шин с твердой опорной поверхностью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1972. 19 с.
4. Скотников В.А., Пономарев А.В., Климанов А.В. Проходимость машин. Минск: Наука и техника, 1982. 28 с.
5. Хабатов Р.Ш., Золотаревская Д.И., Матвеев В.В., Трушин В.Г., Трушин А.Г., Лядин В.П. Закономерности деформирования тракторных колес с пневматическими шинами // Изв. ТСХА. 1987. Вып. 3. С. 173–180.
6. Золотаревская Д.И. Математические модели деформирования эластичных колес // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 1. С. 45–49.
7. Золотаревская Д.И. Характеристики вязкоупругих и упругих свойств эластичных колес // Изв. ТСХА. 1989. Вып. 2. С. 142–151.
8. Золотаревская Д.И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: дис. ... докт. техн. наук. М.: 1997. 432 с.
9. Кнороз В.И., Кленников В.И. Шины и колеса. М.: Машиностроение. 1975. 184 с.
10. Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.В. и др. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация). М.: Госхимиздат, 1963. 384 с.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

References

1. Traktory. Teoriya [Tractors. Theory]. Pod red. V.V. Gus'kova. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p.
2. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. Hodo-vaya sistema – pochva – urozhaj [Running system – soil – harvest]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
3. Tret'yakov O. B. Issledovanie vzaimodejstviya protektora avtomobil'nyh shin s tverdoj opornoj poverhnost'yu: avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk. [Investigation of the interaction of the tread of automobile tires with a solid support surface: the author's abstract. dis. ... cand. tech. sciences.] Moscow: 1972. 19 p.
4. Skotnikov V.A., Ponomarev A.V., Klimanov A.V. Prohodimost' mashin [Passability of vehicles.]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1982. 28 p.
5. Habatov R.SH., Zolotarevskaya D.I., Matveev V.V., Trushin V.G., Trushin A.G. Lyadin V.P. The patterns of deformation of tractor wheels with pneumatic tires. Izv. TSKHA. 1987. Vyp. 3, pp. 173–180 (in Russ.).
6. Zolotarevskaya D.I. Mathematical models of deformation of elastic wheels. Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 1989. No 1, pp. 45–49 (in Russ.).
7. Zolotarevskaya D.I. Characteristics of viscoelastic and elastic properties of elastic wheels. Izv. TSKHA. 1989. Vyp. 2, pp. 142–151 (in Russ.).
8. Zolotarevskaya D.I. Osnovy teorii i metody rascheta uplotnyayushchego vozdejstviya na pochvu kole-snyh dvizhitelej mobil'noj sel'skohozyajstvennoj tekhniki: dis... dokt. tekhn. nauk. [Fundamentals of the theory and methods for calculating the compaction effect on the soil of wheeled movers of mobile agricultural machinery: dis ... dr. tech. sciences.] Moscow: 1997. 432 p.
9. Knoroz V.I., Klennikov V.I. SHiny i kolesa [Tires and wheels]. Moscow: Mashinostroenie Publ.. 1975. 184 p.
10. Biderman V.L., Guslicer R.L., Zaharov S.V. i dr. Avtomobil'nye shiny (konstrukciya, raschet, ispytaniya, chkspluataciya) [Car tires (design, calculation, testing, operation)]. Moscow: Goskhimizdat Publ., 1963. 384 p.
11. Adler YU.P., Markova E.V., Granovskij YU.V. Planirovanie chksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Planning of an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 280 p.