

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕСТКОСТИ ШИН ТРАКТОРНЫХ КОЛЕС И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА КОЛЕБАНИЯ ТРАКТОРОВ

THE RESULTS OF THE STUDY OF THE RIGIDITY OF TIRES OF TRACTOR WHEELS AND ITS EFFECT ON TRACTOR VIBRATIONS

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 – Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, Moscow, Russia,
dina.zolotarevskaya@mail.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию жесткости пневматических шин колес тракторов и анализу ее влияния на вертикальные колебания тракторов. Математическое моделирование закономерностей деформирования эластичных тракторных колес и почвы выполнено на основе использования экспериментальных данных о закономерностях деформирования исследованных почв, полученных в наших работах ранее в полевых испытаниях, в которых измеряли нормальные напряжения в контакте колес и почвы, а также плотность и влажность разрыхленной до проходов колес почвы и после последовательных проходов колес по одной и той же колее. По разработанной нами компьютерной программе, позволяющей рассчитать жесткости шин тракторных колес, проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты трех типов. В компьютерных экспериментах первого типа исследовали зависимости жесткости шин ряда эластичных колес при работе трактора МТЗ-82 на почве от давления воздуха в шинах при различных вертикальных динамических нагрузках на оси соответствующих колес трактора. По результатам компьютерных экспериментов первого типа нашли уравнения регрессии, отражающие исследованные зависимости. В компьютерных экспериментах второго типа исследовали зависимости жесткости шин различных типоразмеров от давления воздуха в шинах при постоянных вертикальных динамических нагрузках на оси колес. По результатам компьютерных экспериментов второго типа нашли уравнения регрессии, отражающие соответствующие зависимости. Высокие значения корреляционных отношений для полученных уравнений регрессии свидетельствуют о большой тесноте связей в найденных корреляционных зависимостях. В компьютерных экспериментах обоих типов отклонения показателей взаимодействия колес с почвой, найденные с применением значений жесткости шин, полученных расчетным путем, находятся в пределах точности измерений экспериментальных данных. Компьютерные эксперименты третьего типа выполнены с использованием полученных в наших работах экспериментальных данных. Были проведены расчеты вертикальных колебаний осей трактора МТЗ-82 при различных значениях жесткости шин передних и задних колес, затем построены характеризующие эти колебания графики. Результаты выполненного исследования показывают, что при увеличении жесткости шин колес амплитуды вертикальных колебаний осей трактора уменьшаются. Это способствует повышению плавности хода трактора и снижению его уплотняющего воздействия на почву. Расчетным путем выявили, что на задней оси трактора МТЗ-82 оптимальными являются колеса с шинами 18.4R38.

Ключевые слова: эластичное колесо, жесткость шины колеса, давление воздуха в шине, вертикальная нагрузка на ось колеса, вертикальные колебания трактора, математическое моделирование.

The work is devoted to a theoretical study of the rigidity of pneumatic tires of tractor wheels and analysis of its influence on the vertical oscillations of tractors. Mathematical modeling of the patterns of deformation of elastic tractor wheels and soil using experimental data was performed. These experimental data on the patterns of deformation of the studied soils were obtained in our works earlier in field trials, when normal stresses at the contact of the wheels and the soil, as well as the density and humidity of the soil loosened before the wheel passes and after successive wheel passes along the same track were measured. According to the developed computer program, which allows to calculate the rigidity of tires of tractor wheels, one-factor and full factorial computer experiments of three types were carried out. In computer experiments of the first type, the dependence of tire stiffness of a number of elastic wheels under the MTZ-82 tractor on the soil operation from air pressure at different vertical dynamic loads on the axes of the respective tractor wheels was investigated. According to the results of computer experiments of the first type, the regression equations, reflecting the dependencies studied, were found. In computer experiments of the second type, the tire stiffness of various sizes on tire pressure with constant vertical dynamic loads on the axles of the wheels was investigated. According to the results of computer experiments of the second type, the regression equations were

found, reflecting the corresponding dependences. High values of correlation relations for the obtained regression equations indicate a great closeness of relations in the correlation dependences found. In computer experiments of both types, the deviations of the wheel-soil interaction values, found using tire stiffness values obtained by calculation, are within the limits of measurement accuracy of experimental data. Computer experiments of the third type are performed using the experimental data obtained in authors works. The vertical oscillations of the axles of the MTZ-82 tractor for different values of the rigidity of the tires of the front and rear wheels were calculated. The graphs that characterize these fluctuations were built. The results of the study show that with an increase in tire stiffness, the amplitudes of the vertical axes of the tractor axles decrease. This helps to improve the smoothness of the tractor and reduce its sealing effect on the soil. By calculation, it was found out that wheels with 18.4R38 tires are optimal on the rear axle of the MTZ-82 tractor.

Keywords: elastic wheel, wheel tire stiffness, tire pressure, vertical load on the wheel axle, tractor vertical oscillations, mathematical modeling.

Введение

Для сельскохозяйственного машиностроения весьма актуально при выполнении полевых работ решение проблемы увеличения плавности хода тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники. От плавности хода тракторов и сельхозмашин зависит способность осуществлять машинами технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур с выполнением заданных агротехнических требований в различных почвенно-климатических условиях. Снижение колебаний тракторов и других мобильных машин при их работе на почве способствует повышению качества выполняемых машинно-тракторными агрегатами технологических операций, необходимых для выращивания сельскохозяйственных культур, улучшению условий труда водителей, оказывает положительное влияние на работу механизмов, способствует повышению производительности МТА и урожайности полевых культур. Важными являются решения проблем повышения тягово-сцепных свойств тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники, предотвращения переуплотнения почв в результате воздействия мобильных средств. Решение этих проблем непосредственно связано с повышением плавности хода машин. Необходимо разрабатывать и применять меры, способствующие снижению колебаний машин при их работе на почве и уплотняющего воздействия машин на почву. Предлагаемые меры нужно создавать с учетом упругих или вязкоупругих свойств подвесок тракторов и вязкоупругих свойств почв.

Этому значительно должны способствовать разработка и широкое практическое применение расчетных методов определения с большой

степенью точности показателей исследуемых процессов. Необходимо располагать формулами и алгоритмами расчетов показателей взаимодействия колес, снабженных пневматическими шинами (эластичных колес) с деформируемыми 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 и теория колебаний мобильных машин при их работе на почве развита 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 ряда авторов [5–10] выявлены закономерности деформирования и найдены параметры определяющих уравнений для ряда тракторных и автомобильных колес с пневматическими шинами. Большое внимание уделено исследованию свойств эластичных колес, обладающих упругими свойствами. Разработаны методы расчета коэффициентов упругости шин эластичных тракторных [7, 8] колес, а также вертикальных колебаний тракторов с упругими [11] и вязкоупругими [12] подвесками.

Цель исследования

Цели данной работы состояли в следующем. На основе результатов, полученных в работе [11], и применения компьютерных программ, разработанных нами, которые позволяют реализовать результаты исследования, следует:

1) выявить влияние основных факторов (давления воздуха в шинах, вертикальной динамической нагрузки на оси колес) на жест-

кость шин исследованных в данной работе эластичных колес;

2) провести сопоставление между собой эластичных колес с шинами различных типоразмеров по их жесткости;

3) расчетным путем выявить влияние жесткости шин тракторных колес на колебания тракторов при их работе на почве.

Научная новизна

Выявление расчетным путем влияния на жесткость эластичных тракторных колес давления воздуха в шинах, вертикальных нагрузок на оси колес, типоразмеров шин колес, получение расчетных данных о влиянии жесткости колес на их колебания при работе на почве, представляет собой научную новизну данной работы.

Методы и средства проведения исследования

В работах [7, 9] 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). Краткое описание проведенных экспериментов приведено также в работе [13].

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}). Измеряли с помощью тензометрических датчиков давления мембранного типа нормальные напряжения в месте контакта колес и опорного основания. Экспериментальные данные обработаны статистически. Предложены экспериментальный и расчетный методы определения коэффициентов упругости практически упругих эластичных колес.

В работе [11] предложен метод расчета вертикальных колебаний передней и задней осей колесного трактора с упругой передней подвеской. В работе [11] также разработан метод расчета показателей уплотнения почвы при проходах трактора, в котором учитывается влияние колебаний трактора на его уплотняющее воздействие на почву. Результаты расчетов этим методом достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Нами разработана компьютерная программа Tire Stiffness, позволяющая рассчитать жесткость шин ($c_{ш1}$ и $c_{ш2}$) эластичных тракторных колес. По этой программе находят

нормальный прогиб f_1 и жесткость $c_{ш1}$ шин эластичных колес (здесь и далее для переднего колеса $i = 1$, а для заднего $i = 2$) при различных задаваемых значениях вертикальных нагрузок на ось каждого колеса и варьировании давления воздуха в шине.

В данной работе по компьютерной программе Tire Stiffness проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты. В этих экспериментах находили жесткость $c_{ш1}$ ряда колес с пневматическими шинами и исследовали зависимости $c_{ш1}$ от давления воздуха в шинах p_{w1} и от вертикальных нагрузок G_{01} на соответствующие оси колес. Результаты выполненных расчетов использовали для построения графиков, характеризующих зависимости жесткости шин исследованных эластичных колес от p_{w1} и G_{01} . Для построения графиков применили компьютерные программы SGWIN. EXE и программы, составленные в комплексной компьютерной программе MATLAB. По программе SGWIN. EXE нашли при различных G_{01} уравнения регрессии, отражающие зависимости жесткости шин исследованных колес от давления воздуха в шине. Расчеты показали, что уравнения регрессии близки к квадратичным зависимостям: $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ (обозначения: $y = c_{ш1}$, $x = p_{w1}$). Корреляционные отношения для найденных уравнений регрессии – не менее 0,99. Это показывает, что найденные зависимости близки к функциональным.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены графики, характеризующие зависимости жесткости $c_{ш2}$ колеса с шиной 16.9R38 от давления воздуха в шине, изменяющегося в интервале $p_{w2} \in [90-210]$ кПа при различных значениях вертикальных нагрузок G_{02} на ось колеса.

Расчетным путем выявили, что для исследованных эластичных колес жесткость при увеличении давления воздуха в шине $p_{w1} \in [90-210]$ кПа и при увеличении G_{01} возрастает. Так, получили, что у колеса с шиной 16.9R38 при $G_{02} = 13,58$ и возрастании давления воздуха в шине от 100 до 200 кПа жесткость возрастает в среднем на 47,88 % (от 288,21 до 426,22 кН/м).

Провели расчеты, представляющие собой опыты в трех сериях полного факторного компьютерного эксперимента типа $N = 2^2$, где N –

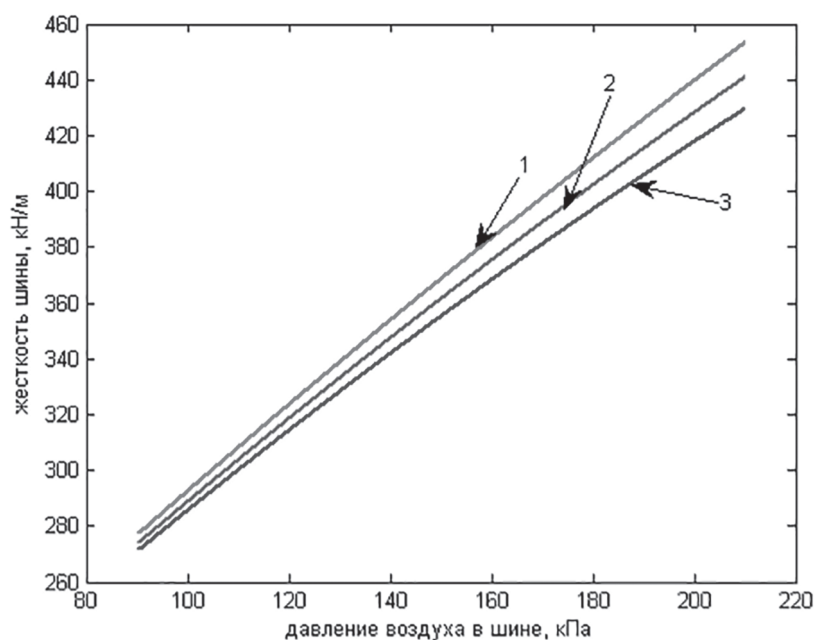


Рис. 1. Корреляционные зависимости жесткости эластичного колеса с шиной 16.9R38 от давления воздуха в шине при различных значениях вертикальных нагрузок на ось колеса:
1, 2, 3 – при G_{02} – 20,03; 13,58; 11,65 кН, соответственно

число опытов в серии; число 2, стоящее в основании степени выражения – число влияющих факторов, а показатель степени 2 – число уровней варьирования факторов [14].

В одной из серий полного факторного компьютерного эксперимента типа $N = 2^2$ исследовали влияние на жесткость эластичного колеса с шиной 15.5R38 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 $G_{02} = 11,65$ и $19,73$ кН, для $p_{w2} = 90$ и 180 кПа.

Уравнение регрессии находим в следующем виде:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x + a_3x_1x_2, \quad (1)$$

где y – жесткость шины; x_1 – вертикальная нагрузка на ось колеса; x_2 – давление воздуха в шине.

В результате расчетов по компьютерной программе SGWIN. EXE для колеса с шиной 15.5R38 получили выраженное в натуральных значениях переменных следующее уравнение регрессии:

$$y = 170,269 - 0,4592x_1 + 0,4046x_2 + 0,0378x_1x_2. \quad (2)$$

На рис. 2 представлена соответствующая уравнению (2) поверхность, характеризующая корреляционную зависимость жесткости эластичного колеса с шиной 15.5R38 от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на ось колеса при совместном изменении этих влияющих факторов. Рис. 2 построен по компьютерной программе, составленной в MATLAB.

Полные факторные компьютерные эксперименты, как и однофакторные, показали, что для исследованных эластичных колес жесткость $c_{ши}$ при увеличении давления воздуха в шинах $p_{wi} \in [90-210]$ кПа и при увеличении G_{0i} возрастает.

В таблице приведены найденные по компьютерной программе Tire Stiffness некоторые значения жесткости эластичного тракторного колеса с шиной 18.4R38 при различных значениях давления воздуха в шине и при двух различных вертикальных нагрузках на ось колеса. Результаты полного факторного эксперимента, представленные на рис. 2, находятся в соответствии со всеми полученными по программе Tire Stiffness результатами расчетов.

Одним из способов снижения потерь энергии при работе трактора является более точный подбор шин и выбор оптимальных режимов и условий эксплуатации трактора. Шины оптимальных типоразмеров к трактору данной марки обеспечивают при работе МТА с заданной ско-

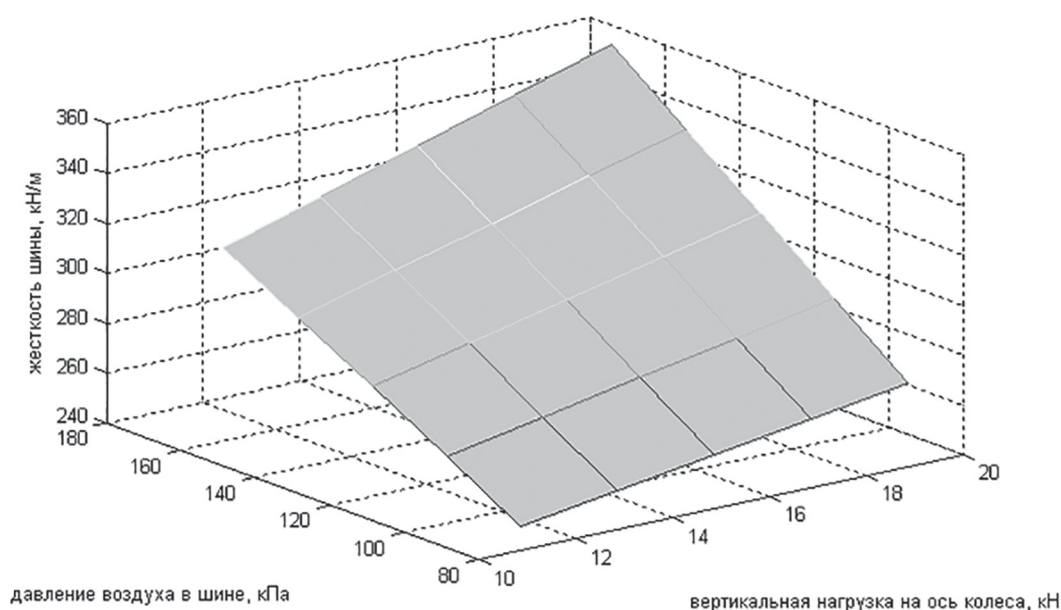


Рис. 2. Корреляционная зависимость жесткости колеса с шиной 15.5R38 от давления воздуха в шине и вертикальной нагрузки на ось колеса при совместном изменении этих факторов

Таблица

Жесткость эластичного колеса с шиной 18.4R38 при различных значениях давления воздуха в шине при различных вертикальных нагрузках на ось колеса

p_{w2} , кПа	$G_{02} = 11,65$ кН	$G_{02} = 20,56$ кН
	$c_{ш2}$, кН/м	$c_{ш2}$, кН/м
90	245,63	291,14
120	268,78	326,73
180	294,78	368,47
210	302,72	381,63

ростью наименьшее уплотнение почвы, наилучшие тяговые свойства, наибольшую плавность хода трактора. 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 жесткость ряда эластичных колес с шинами различных типоразмеров в зависимости от давления воздуха в шинах p_{wi} при постоянной вертикальной нагрузке на оси колес $G_{0i} = 11,65$. Давление воздуха в шинах изменяли в интервале $p_{wi} \in [90-210]$ кПа.

Жесткость $c_{ши}$ шин исследованных эластичных колес нашли по компьютерной программе Tire Stiffness. Уравнения регрессии $c_{ши}(p_{wi})$

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: $y = 153,281 + 1,2865x - 0,0027x^2$, а для колеса с шиной 11.2-42 имеем уравнение регрессии: $y = 89,9493 + 1,9863x - 0,004x^2$ (обозначения x и y в этих уравнениях те же, что и в уравнениях (1) и (2)). По программе, составленной в MATLAB, построили соответствующие найденным уравнениям регрессии графики.

На рис. 3 представлены графики, характеризующие корреляционные зависимости $c_{ши}(p_{wi})$ от давления воздуха в шинах при $G_{02} = 11,65$ для эластичных колес с шинами 18.4R38; 13.6R38; 15.5R38; 16.9R38; 11.2-42, соответственно. Как видно из рис. 3, наибольшей жесткостью из исследованных колес обладают колеса с шинами 18.4R38, а наименьшей – с шинами 11.2-42.

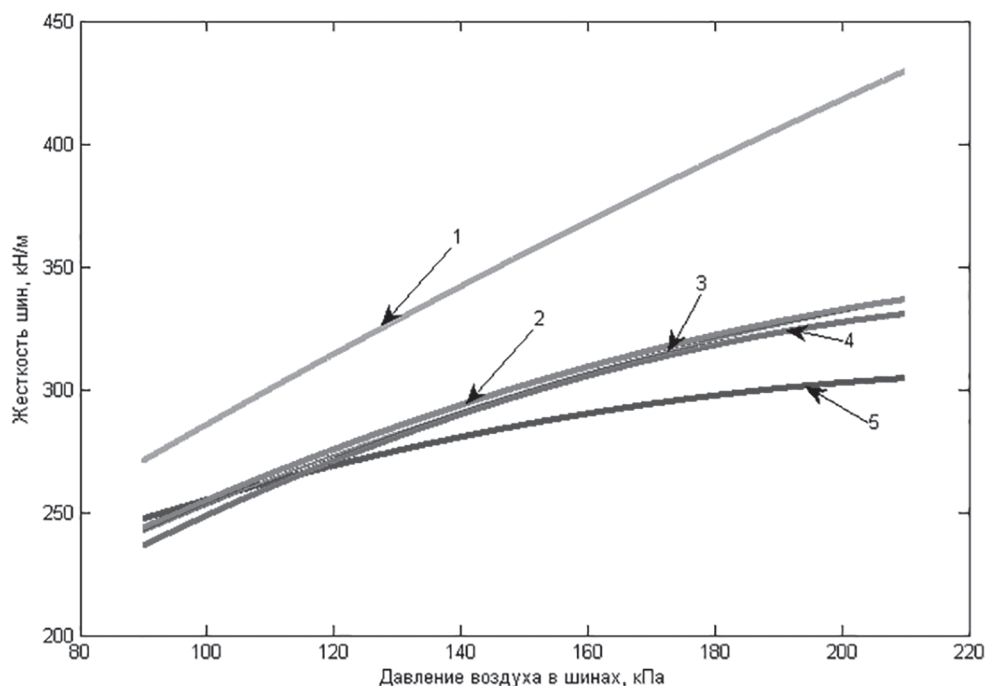


Рис. 3. Корреляционные зависимости жесткости шин различных типоразмеров эластичных колес от давления воздуха в шинах при постоянной вертикальной нагрузке $G_{02} = 11,65$ кН:
1, 2, 3, 4, 5 – для колес с шинами 18.4R38; 13.6R38; 15.5R38; 16.9R38; 11.2-42, соответственно

В данной работе расчетным путем выявили влияние жесткости тракторных колес с шинами 11.2R20 и 13.6R38 на вертикальные колебания трактора МТЗ-82 при его работе на дерново-подзолистой супесчаной почве.

Как и в работе [11], рассмотрели работу МТА, состоявшего из трактора МТЗ-82 и агрегируемой им машины. У трактора МТЗ-82 подвеска полужесткая. При полужесткой подвеске задние колеса трактора не подрессорены [1, 4]. Поверхность почвы приняли горизонтальной. Почва перед опытами была вспахана и дважды проборонована на глубину 30 см. Ввели вертикальные оси координат x и y , проходящие через вертикальные диаметры переднего и заднего колес, расположенных на одной и той же стороне трактора. Начало каждой из осей расположили на поверхности почвы, рассматриваемой до прохода по ней трактора. Вертикальные отклонения от положения равновесия точек трактора при колебаниях его передней и задней осей равны соответственно x и y .

Приведенная жесткость упругого элемента передней подвески равна

$$C_{\text{пр}} = c_p c_{\text{ш1}} / (c_p + c_{\text{ш1}}), \quad (3)$$

где c_p – жесткость рессоры; $c_{\text{ш1}} = \frac{G_{01}}{f_1}$ – жесткость шины переднего колеса; G_{01} – вертикаль-

ная нагрузка на ось переднего колеса; f_1 – вертикальное перемещение его оси [1, 4].

Для определения колебаний x и y передней и задней осей трактора составили, воспользовавшись принципом Даламбера, систему двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 x'' + c_{\text{пр}} x + c_{\text{ш2}} y = p_1 \sin \omega_1 t, \\ m_2 y'' + c_{\text{ш2}} y + c_{\text{пр}} x = p_2 \sin \omega_2 t, \end{cases} \quad (4)$$

где $c_{\text{ш2}} = \frac{G_{02}}{f_2}$ – жесткость шины заднего колеса; G_{02} – вертикальная нагрузка на ось заднего колеса; f_2 – вертикальное перемещение его оси; m_1 – подрессоренные части массы трактора, приходящиеся соответственно на его переднюю и заднюю полуоси; p_i – амплитуды колебаний вертикальных реакций опорного основания (возмущающих сил); ω_i – круговые частоты колебаний возмущающих сил; t – время.

Вертикальные колебания передней и задней осей трактора получили как решение следующей задачи: найти частное решение системы дифференциальных уравнений (4), удовлетворяющее начальным условиям:

$$\begin{aligned} &1) \ x|_{t=0} = -h_1; \ 2) \ y|_{t=0} = -h_2; \\ &3) \ x'|_{t=0} = 0; \ 4) \ y'|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

где h_1 и h_2 – остаточная осадка почвы соответственно под передним и задним колесами трак-

тора, найденная без учета влияния колебаний трактора.

Величины f_i , входящие в формулы для вычисления $c_{ш1}$ и $c_{ш2}$ находим по формуле из работы [2]:

$$f_i = \frac{c_{2i} G_{0i}}{2(p_{0i} + p_{wi})} + \sqrt{\left[\frac{c_{2i} G_{0i}}{2(p_{0i} p_{wi})} \right]^2 + c_{1i} G_{0i}}, \quad (6)$$

где p_{wi} , кПа – давление воздуха в шине; G_{0i} , кПа; c_{1i} , м²/кН, c_{2i} , 1/м – коэффициенты, предложенные В.Л. Бидерманом [5], характеризующие упругие свойства эластичного колеса.

Общее решение системы уравнений (4) получено в работе [11], в которой задача о вертикальных колебаниях колесного трактора с упругой передней подвеской рассмотрена с нулевыми начальными условиями.

В результате решения задачи (4)–(5) получили формулы для расчета $x(t)$ и $y(t)$.

Общее решение системы (4) имеет вид:

$$\begin{cases} x(t) = -A_0 \sin nt + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t - h_1; \\ y(t) = -B_0 \sin nt + B_1 \sin \omega_1 t + B_2 \sin \omega_2 t - h_{12}, \end{cases} \quad (7)$$

где $n = \sqrt{\frac{c_{ш2} m_1 + c_{ш1} m_2}{m_1 m_2}}$ – угловая частота собственных колебаний; A_1, A_2, B_1, B_2 – амплитуды слагаемых гармоник. Коэффициенты A_1, A_2, B_1, B_2 находим в результате решения двух определенных систем линейных уравнений с неизвестными A_1, B_1 и A_2, B_2 (вторая система). Величины A_1, A_2, B_1, B_2 – коэффициенты, которые входят в частное решение системы дифференциальных уравнений (4). Зная эти коэффициенты, находим A_0 и B_0 , а затем решение уравнения (7), удовлетворяющее начальным условиям (5).

Нами проведены опыты на поле экспериментального хозяйства РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева [15]. Опыты описаны в работе [15]. В экспериментах осуществляли проходы по почве трактора МТЗ-82. Тяговую нагрузку на МТЗ-82 создавал сцепленный с ним трактор Т-25А, которым управлял второй тракторист. Для раздельной оценки уплотнения почвы передние колеса с шинами 11.2R20 и задние колеса с шинами 13.6R38 были расставлены на разную колею. Массы, приходящиеся на переднюю и заднюю полуоси, были соответственно равны: $m_1 = 707,1$ кг и $m_2 = 1137$ кг. Жесткость рессоры $c_p = 600$ кН/м [16].

Для нахождения вертикальных колебаний осей трактора и условий, позволяющих снизить эти колебания, важно разработать способ для выявления этих условий расчетным путем. Разработаны компьютерные программы позволяющие выполнить предложенный способ расчета.

С использованием полученных экспериментальных данных выполнили компьютерные расчеты вертикальных колебаний $x(t)$ и $y(t)$ осей трактора МТЗ-82 при различных значениях жесткости шин передних и задних колес. По разработанной нами компьютерной программе Shina вначале нашли (в соответствии с результатами, полученными в работе [7]) приведенные радиусы колес: $R_{пр1} = 0,5664$ м и $R_{пр2} = 0,9975$ м, а также остаточную осадку почвы $h_1 = 2,43$ см и $h_2 = 2,62$ см. Скорость трактора равнялась 2,5 м/с, буксование передних и задних колес соответственно равнялось $\delta_1 = -0,01$ и $\delta_2 = 0,18$; частоты угловых колебаний (угловые скорости) колес были соответственно равны $\omega_1 = 4,3701$ 1/с и $\omega_2 = 3,0564$ 1/с.

На рис. 4 и 5 представлены построенные по программе, составленной в MATLAB, графики, характеризующие вертикальные колебания осей трактора.

На рис. 4 приведены графики, характеризующие вертикальные колебания осей трактора при жесткости шин $c_{ш1} = 215,11$ кН/м и $c_{ш2} = 240,64$ кН/м. Построенные кривые описываются уравнениями:

$$\begin{cases} x(t) = -0,1546 \sin(0,6632t) + \\ + 0,0220 \sin(4,3701t) + 0,0021 \sin(3,0564t) - 2,43; \\ y(t) = -0,2580 \sin(0,6632t) + \\ + 0,0004 \sin(4,3701t) + 0,0555 \sin(3,0564t) - 2,62. \end{cases}$$

На рис. 5 даны графики, характеризующие вертикальные колебания осей трактора при жесткости шин $c_{ш1} = 315,58$ кН/м и $c_{ш2} = 335,56$ кН/м. Построенные кривые описываются уравнениями:

$$\begin{cases} x(t) = -0,1349 \sin(0,7668t) + \\ + 0,0213 \sin(4,3701t) + 0,0030 \sin(3,0564t) - 2,43; \\ y(t) = -0,2196 \sin(0,7668t) + \\ + 0,0002 \sin(4,3701t) + 0,0553 \sin(3,0564t) - 2,62. \end{cases}$$

Построенные по результатам расчетов рис. 4 и 5, а также результаты других выполненных расчетов показывают, что при уве-

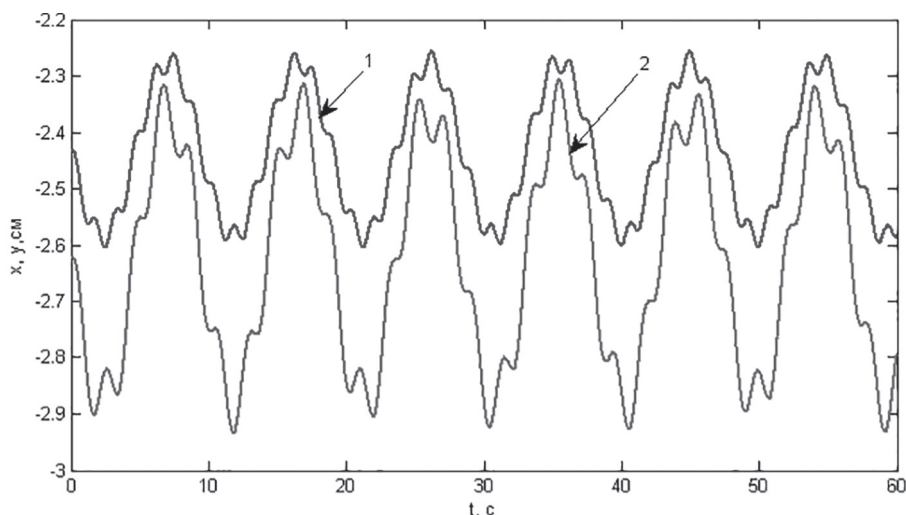


Рис. 4. Вертикальные колебания передней (1) и задней (2) осей трактора МТЗ-82 при его проходе по почве (жесткость шин: $c_{ш1} = 215,11$ кН/м (передние колеса с шинами 11.2R20); $c_{ш2} = 240,64$ кН/м (задние колеса с шинами 13.6R38); давление воздуха в шинах $p_{wi} = 90$ кПа)

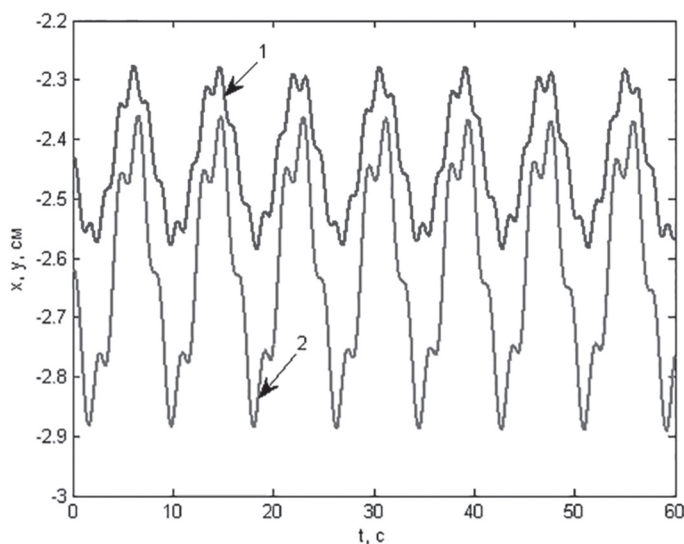


Рис. 5. Вертикальные колебания передней (1) и задней (2) осей трактора МТЗ-82 при его проходе по почве (жесткость шин: $c_{ш1} = 315,58$ кН/м (передние колеса с шинами 11.2R20); $c_{ш2} = 335,86$ кН/м (задние колеса с шинами 13.6R38); давление воздуха в шинах $p_{wi} = 210$ кПа)

личении жесткости шин колес амплитуды колебаний осей трактора уменьшаются. Это способствует повышению плавности хода трактора и снижению его уплотняющего воздействия на почву.

Выполненные расчеты показали, что значения жесткости эластичных колес, 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. Получили, 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 возникает при проходе трактора МТЗ-82, если на задней оси этого трактора установлены колеса с шинами 11.2-42. Эти результаты соответствуют экспериментальным и расчетным данным, приведенным в работах [7, 11, 15]. Расхождения находятся в пределах измерения экспериментальных данных.

Выводы

Для рационального выбора шин к тракторам различных марок необходимо разработать и широко применять на практике методы расчета показателей, характеризующих законо-

мерности деформирования шин эластичных тракторных колес.

Математическое моделирование закономерностей деформирования эластичных тракторных колес выполнено на основе использования полученных нами экспериментальных данных. Эти данные найдены в полевых испытаниях, в которых осуществляли проходы тракторов по почве. В опытах измеряли нормальные напряжения в месте контакта колес и почвы, а также плотность и влажность разрыхленной до проходов колес почвы и после последовательных проходов колес по одной и той же колее.

Проведены однофакторные и полные факторные компьютерные эксперименты. По результатам этих экспериментов нашли корреляционные зависимости жесткости шин исследованных эластичных колес от давления воздуха в шинах при различных вертикальных нагрузках на оси колес.

Компьютерные эксперименты выполнены по предложенному автором методу расчета исследуемых показателей с помощью разработанных автором программ, позволяющих реализовать этот метод.

В компьютерных экспериментах выявили влияние основных факторов (давления воздуха в шинах p_{wi} , вертикальной динамической нагрузки на оси колес G_{0i}) на жесткость шин $c_{ши}$ исследованных в данной работе эластичных колес.

Нашли корреляционные зависимости жесткости исследованных эластичных колес от p_{wi} и от G_{0i} .

Провели исследование влияния жесткости шин на колебания тракторов при их работе на почве.

Расчетным путем выявили, что при увеличении давления воздуха в шине p_{wi} и вертикальной нагрузки на ось колеса G_{0i} жесткость шин 11.2R20, 16.9R38, 15.5R38, 16-20, 11.2-42 и других исследованных в данной работе шин эластичных колес возрастает.

Провели сопоставление жесткости шин различных типоразмеров при различных значениях и одной и той же вертикальной нагрузки на ось колеса. Выявили, что при этих условиях наибольшей жесткостью обладают шины 18.4R38, а наименьшей – шины 11.2-42.

Расчетным путем выявили влияние жесткости шин тракторных колес на колебания тракторов. Результаты расчетов показывают, что при увеличении жесткости шин колес ампли-

туды вертикальных колебаний осей тракторов уменьшаются. Это способствует повышению плавности хода трактора и снижению его уплотняющего воздействия на почву.

Нужно комплектовать трактор колесами с шинами оптимальных типоразмеров, имеющими оптимальную жесткость. Для выбора шин оптимальных типоразмеров при соответствующих значениях влияющих факторов важно применять на практике расчетный метод нахождения жесткости шин эластичных колес.

Необходимы дальнейшие исследования по разработке методов расчета жесткости шин различных типоразмеров.

Литература

1. Тракторы. Теория / под ред. В.В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
2. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система-почва-урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
3. Скотников В.А., Пономарев А.В., Климанов А.В. Проходимость машин. Минск: Наука и техника, 1982. 28 с.
4. Кутков Г.М. Тракторы и автомобили: Теория и технологические свойства. М.: Инфра-М. 2014. 506 с.
5. Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.В. и др. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация). М.: Госхимиздат. 1963. 384 с.
6. Кнороз В.И., Кленников В.И. Шины и колеса. М.: Машиностроение. 1975. 184 с.
7. 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.
8. Золотаревская Д.И. Характеристики вязкоупругих и упругих свойств эластичных колес // Изв. ТСХА. 1989. Вып. 2. С. 142–151.
9. 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.
10. Золотаревская Д.И. Математические модели деформирования эластичных колес // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 1. С. 45–49.
11. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование колебаний колесного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 7. С. 14–18.
12. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование колебаний колесного трактора с амортиза-

торами на передней подвеске // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2014. № 1. С. 6–9.

13. Золотаревская Д.И. Анализ влияния основных факторов на характеристики упругих свойств эластичных колес тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2018. № 4. С. 71–78.
14. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
15. Золотаревская Д.И., Иванцова Н.Н., Лядин В.П. Математическое моделирование деформирования почв при качении колес // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 5. С. 28–33.
16. Барский И.Б. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение. 1980. 335 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 [Suspension-soil-har-vest]. Mos-cow: Agropromizdat Publ., 1985. 304 p.
3. Skotnikov V.A., Ponomarev A.V., Klimanov A.V. Prohodimost' mashin [Flotation of vehicle]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1982. 28 p.
4. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili: Teoriya i tekhnologicheskie svoystva [Tractors and automobiles: Theory and technological properties]. Moscow: In-fra-M Publ., 2014. 506 p.
5. Biderman V.L., Guslicer R.L., Zaharov S.V. i dr. Avtomobil'nye shiny (konstrukciya, raschet, ispy-taniya, eksplu-ataciya) [Automobile tires (design, calculation, testing, operation)]. Moscow: Goskh-imizdat Publ., 1963. 384 p.
6. Knoroz V.I., Klennikov V.I. SHiny i kolea [Tires and wheels]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 184 p.
7. Zolotarevskaya D.I. Osnovy teorii i metody ra-scheta uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu kolesnyh dvizhitelej mobil'noj sel'skohozyajstven-noj tekhniki: dis... dokt. tekhn. nauk [Fundamen-tals of the theory and methods for calculating the compaction effect on the soil of wheeled propellers of mobile agricultural equipment: Dissertation for degree of Dr.Eng.]. Moscow: 1997. 432 p.
8. Zolotarevskaya D.I. Viscoelastic and elastic charac-teristics of elastic wheels. Izv. TSKHA. 1989. Vyp. 2, pp. 142–151 (in Russ.).
9. Habatov R.SH., Zolotarevskaya D.I., Matveev V.V., Trushin V.G., Trushin A.G., Lyadin V.P. Patterns of deformation of tractor wheels with pneumatic tires. Izv. TSKHA. 1987. Vyp. 3, pp. 173–180 (in Russ.).
10. Zolotarevskaya D.I. Mathematical models of defor-mation of elastic wheels. Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 1989. No 1, pp. 45–49 (in Russ.).
11. Zolotarevskaya D.I. Mathematical modeling of wheel tractor vibrations. Traktory i sel'hozmashiny. 2011. No 7, pp. 14–18 (in Russ.).
12. Zolotarevskaya D.I. Mathematical modeling of wheel tractor vibrations with shock absorbers on the front suspen-sion. Traktory i sel'hozmashiny. 2014. No 1, pp. 6–9 (in Russ.).
13. Zolotarevskaya D.I. Analysis of the influence of the main factors on the characteristics of the elastic properties of the elastic wheels of tractors. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. No 4, pp. 71–78 (in Russ.).
14. Adler YU.P., Markova E.V., Granovskij YU.V. Planirovanie eksperimenta pri po iske optimal'nyh uslovij [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 280 p.
15. Zolotarevskaya D.I., Ivancova N.N., Lyadin V.P. Mathematical modeling of soil deformation during rolling of wheels. Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny. 2008. No 5, pp. 28–33 (in Russ.).
16. Barskij I.B. Konstruirovanie i raschet traktor-ov [Design and calculation of tractors]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1980. 335 p.