

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОЧВЫ ПРИ КАЧЕНИИ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕС

Д. И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ

(Кафедра высшей математики)

Предложен метод определения параметров уравнения первого порядка, связывающего сжимающие напряжения, скорости изменения сжимающих напряжений и относительных деформаций сжатия почвы по данным экспериментальных эпюр нормальных контактных напряжений; разработана программа расчетов этих характеристик на ЭВМ. Найдены характеристики вязкоупругих свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой и торфяной почв в определенных интервалах изменения плотностей и влажностей этих почв. Определены величины сжимающих напряжений на поверхности исследованных почв при качении эластичных колес. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

Выявлены корреляционные зависимости характеристик вязкоупругих свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы от ее плотности, влажности и скорости деформирования катящимся колесом.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов расчета уплотняющего воздействия на почву, тяговых свойств тракторов и сопротивления движению тракторов и других мобильных машин.

Для расчетного определения плотности почвы после проходов тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники и разработки рекомендаций по снижению уплотняющего воздействия машин на почву необходимо располагать данными о закономерностях деформирования почв и колес с пневматическими шинами (эластичных колес). Зависимости между изменяющимися во времени напряжениями и деформациями

эластичных колес, а также почв при уплотнении отражают их вязкоупругие свойства. Использование определяющих уравнений, описывающих вязкоупругие свойства почв и эластичных колес, дает возможность получить более теоретически обоснованные и точные формулы для определения показателей взаимодействия ходовых систем машин и почвы, чем применение определяющих уравнений, не включающих в себя время.

Пусть эластичное колесо катится по расположенному горизонтально слою почвы. Математическое ожидание динамической вертикальной нагрузки на ось колеса равно G , давление воздуха в шине — p_w . Принимается, что скорость движения оси колеса $V = \text{const}$, угловая скорость колеса $\omega = \text{const}$.

Будем описывать вязкоупругие свойства почвы дифференциальным уравнением

$$\frac{d\sigma}{dt} + p\sigma = q \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где σ — вертикальные сжимающие напряжения в почве; ε — относительная деформация сжатия почвы в вертикальном направлении (относительная осадка); t — время; p, q — характеристики вязкоупругих свойств почвы. Адекватность описания свойств почвы уравнением (1) и достоинства применения этого определяющего уравнения для описания связи между изменяющимися во времени напряжениями и деформациями в некоторых почвах в определенных интервалах их влажностей показаны в ряде работ [6, 7, 9].

Вязкоупругие свойства эластичного колеса опишем дифференциальным уравнением [4]

$$\frac{d^2\sigma_{ш}}{dt^2} + p_1 \frac{d\sigma_{ш}}{dt} = q_1 \frac{d^2\varepsilon_{ш}}{dt^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ш}$ — вертикальные напряжения сжатия в шине; $\varepsilon_{ш}$ — относительные деформации сжатия шины в вертикальном направлении в зоне контакта с почвой; p_1, q_1 — характеристики вязкоупругих свойств эластичного колеса. Принимается, что

$\varepsilon_{ш} = \frac{h_{ш}}{H_{ш}}$, где $H_{ш}$ — высота профиля шины; $h_{ш}$ — сжатие шины в вертикальном направлении в различных точках вдоль линии контакта колеса и основания. Величина $h_{ш}$ определяется без учета смещения в вертикальном направлении под действием нагрузки оси колеса. Проверка подтвердила адекватность определяющего уравнения (2) закономерности сжатия ряда эластичных колес в определенных интервалах изменения G и p_w [8].

Известно, что связи $\sigma(\varepsilon)$ в эластичных колесах не зависят от скорости качения. Эта установленная экспериментально закономерность выполняется, если в уравнении (2) принять $p_1 = \omega g_1$, где g_1 — безразмерный, не зависящий от угловой скорости колеса параметр, который характеризует вязкие свойства эластичного колеса и определяется величиной угла сдвига фаз между деформациями и напряжениями в шине. Параметр q_1 характеризует и упругие, и вязкие свойства эластичного колеса.

На величины угла сдвига фаз и параметра g_1 оказывают влияние материал шины, ее конструкция, величины G и p_w . С увеличением p_w и уменьшением G угол сдвига фаз между деформациями и напряжениями в шине уменьшается, свойства эластичного колеса приближаются к упругим, параметр $g_1 \rightarrow 0$. Если $g_1 = 0$, то деформации сжатия эластичного колеса являются упругими. При линейной (в данном случае пропорциональной) зависимости между напряже-

ниями $\sigma_{ш}$ и деформациями $\varepsilon_{ш}$ в упругой шине параметр q_1 принимает значение коэффициента пропорциональности между ними $E_{ш}$, который может быть назван коэффициентом упругости шины. Закономерность деформирования линейно-упругих эластичных колес описывается уравнением

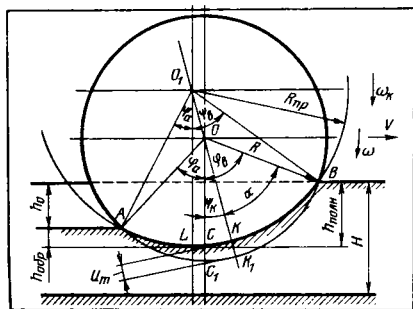
$$\sigma_{ш} = E_{ш} \varepsilon_{ш}. \quad (3)$$

Коэффициент $E_{ш}$ можно определять экспериментально [10] или расчетным путем [8].

На рис. 1 дана схема для определения размеров поверхности контакта вязкоупругого (в частном случае упругого) колеса с вязкоупругой почвой и показателей деформирования шины и почвы. Она соответствует продольному вертикальному сечению колеса, проходящему через середину ширины профиля шины. Радиус эластичного колеса

$R = \frac{D}{2}$, где D наружный диаметр шины; ширина профиля шины — $B_{ш}$. Действующие на колесо активные силы и реакция почвы на схеме не показаны. Поверхность контакта колеса и почвы представлена линией контак-

Рис. 1. Схема для определения размеров поверхности контакта эластичного колеса и почвы.



та — дугой, проходящей через точки В, К и А. В точках В и А входа колеса в контакт с почвой и выхода из этого контакта деформации шины и почвы равны нулю. Размеры контактной поверхности эластичного колеса характеризуются углами $\varphi_b = \angle BOC$ (угол набегания колеса) и $\varphi_a = \angle AOC$ (угол сбегания колеса) ($\varphi_b > 0$, $\varphi_a < 0$). Радиальная деформация шины в зоне контакта достигает максимального значения $u_m = KK_1$ в точке К; $\angle BOK = \angle AOK = (\varphi_b + |\varphi_a|)/2 = \alpha$. Расположение точки К по отношению к вертикальной оси ОС характеризуется углом $\varphi_k = (\varphi_b - \varphi_a)/2$; $u_m \approx h_{ш}(\varphi_k) \cos \varphi_k$. Линия контакта колеса и почвы аппроксимирована дугой окружности, проходящей через точки А, К и В. Назовем радиус этой окружности R_{np} приведенным радиусом эластичного колеса. При значительных деформациях шины задний участок дуги контакта близок, как видно из принятой схемы, к отрезку горизонтальной прямой, что соответствует имеющимся экспериментальным данным [1].

Жесткое колесо радиуса R_{np} оказывает на почву такое же результирующее деформирующее воздействие, как эластичное колесо с наружным диаметром шины D . Размеры поверхности контакта условного жесткого колеса и почвы характеризуются углами $\psi_b = \angle BO_1L$ и $\psi_a = \angle AO_1L$ ($\psi_b > 0$, $\psi_a < 0$).

В ряде работ получены экспериментальные данные об изменении нормальных (радиальных) напряжений вдоль линий контакта эластичных трактор-

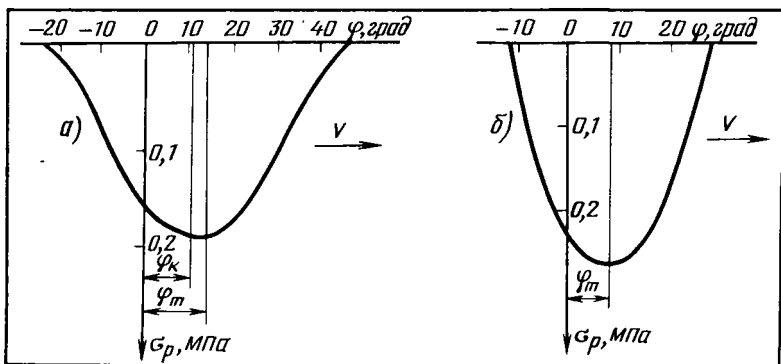


Рис. 2. Экспериментальные эпюры нормальных контактных напряжений на колесах тракторов и сельскохозяйственных машин.

a — на колесе сельхозмашины с широкопрофильной шиной $980 \times 390-457$ при качении по торфяной почве (фон — продискованное поле, влажность почвы $W=64-72\%$, $G=15$ кН, $p_w=0,3$ МПа); *б* — на тракторном колесе с шиной $16,9R38$ при качении по дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (фон — проборонованное поле, плотность почвы $\rho_0=1,285$ г/см³, $W=17,96\%$, $G=11,65$ кН, $p_w=0,09$ МПа).

ных колес и колес сельхозмашин с почвами разного механического состава при различных значениях плотности и влажности почвы, а также данные о соответствующих этим напряжениям радиальных деформациях шин [2, 4, 7], которые позволяют выявить закономерности деформирования эластичных колес и почв и определить характеризующие эти закономерности параметры.

На рис. 2 приведены экспериментальные эпюры радиальных контактных напряжений $\sigma_p(\varphi)$, возникающих при качении колес по почве. Для эпюры, полученной при качении по торфяной почве колеса с широкопрофильной шиной $980 \times 390-457$, используемого на сельхозмашинах [2], $\varphi_a=43,75^\circ$, $\varphi_a=-22,5^\circ$, $\varphi_k=10,625^\circ$; имеется сдвиг фаз между максимальным напряжением $(\sigma_p)_{\max}$, достигаемым при $\varphi=\varphi_m$, и максимальной радиальной деформацией шины, характеризующийся углом $\varphi_3=\varphi_m-\varphi_k$.

Колесо с шиной $980 \times 390-457$ при заданных значениях G и p_w обладает вязкоупругими свойствами, которые могут быть описаны уравнением (2).

На рис. 2, б дана эмпирическая линия регрессии серии экспериментальных эпюр $\sigma_p(\varphi)$ на колесе с шиной $16,9R38$, полученных при одном проходе по почве на пути $S=30$ м трактора МТЗ-82 в опытах, проведенных в ТСХА [7]. Для этой кривой $\varphi_a=30,11^\circ$, $\varphi_a=-12,13^\circ$, $\varphi_m=\varphi_k=8,99^\circ$. Эпюра $\sigma_p(\varphi)$ симметрична относительно вертикальной оси, проходящей через точку с абсциссой $\varphi=\varphi_k$. Вертикальные деформации сжатия шины $h_{sh}(\varphi)$ пропорциональны напряжениям $\sigma(\varphi)=\sigma_p(\varphi) \cos \varphi$. Полученные результаты показывают, что колесо с шиной $16,9R38$ при данных G и p_w деформируется как практически упругое; его свойства описываются уравнением (3).

По известным значениям углов φ_a и φ_b и максимальной де-

формации шины в зоне контакта определим приведенный радиус вязкоупругого или упругого эластичного колеса. Используя схему (см. рис. 1), получим уравнение, из которого находимся R_{np} :

$$R_{np} = R - u_m + \sqrt{R_{np}^2 - R^2 \sin^2 \alpha} - R \cos \alpha. \quad (4)$$

Текущий угол контакта с почвой условного жесткого колеса, соответствующий текущему углу φ эластичного колеса, равен

$$\psi = \arcsin \left[\left(\frac{R}{R_{np}} \sin \varphi + \frac{1}{R_{np}} \sqrt{R_{np}^2 - R^2 \sin^2 \alpha} - R \cos \alpha \right) \sin \varphi_k \right]. \quad (5)$$

При $\varphi = \varphi_b$ и $\varphi = \varphi_a$ по формуле (5) находят углы ψ_b и ψ_a . Угол $\psi = \psi_b - \omega_k t$, где $\omega_k = \frac{\omega R}{R_{np}}$ — угловая скорость жесткого колеса радиуса R_{np} , t — текущее время контакта колеса и почвы.

По известным значениям углов φ , соответствующих им углов ψ и контактных напряжений $\sigma(\varphi)$ могут быть построены эпюры

сжимающих напряжений на условном жестком колесе $\sigma(\psi)$. Эпюры напряжений $\sigma(\psi)$ выявляют закономерность деформирования почвы.

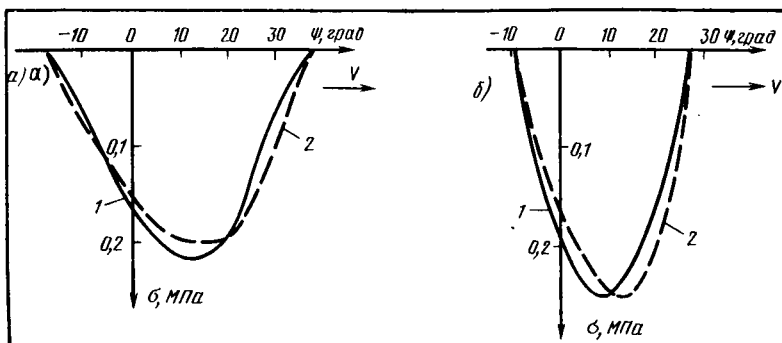
Наибольшая деформация сжатия почвы соответствует углу $\psi = 0$. Расчеты показывают, что максимум напряжений $\sigma(\psi)$ в исследованных почвах при уплотнении катящимися колесами смещен вперед по отношению к максимуму деформации (рис. 3). Сдвиг фаз между σ и ϵ и возникновение в почвах обратимых деформаций показывают, что эти почвы в том физическом состоянии, в котором они уплотняются под действием приложенной нагрузки, являются вязкоупругими.

Относительная деформация сжатия почвы колесом в вертикальном направлении на ее поверхности определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{h(\psi)}{H} = \frac{R_{np}}{H} (\cos \psi - \cos \psi_a), \quad (6)$$

где $h(\psi)$ — абсолютное значение деформации сжатия почвы;

Рис. 3. Эмпирические и теоретические линии регрессии вертикальных напряжений сжатия торфяной почвы при качении колеса с шиной 980×390—457 (а) и дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при качении колеса с шиной 16,9R38 (б). 1 — эмпирические линии регрессии; 2 — теоретические линии регрессии.



H — глубина распространения деформации сжатия почвы.

Учитывая, что $\psi = \psi_0 - \omega_k t$ и (6), найдем общее решение уравнения (1):

$$\sigma(\psi) = \frac{qR_{np}}{H(g^2+1)} (C e^{-g(\psi_0-\psi)} + \cos \psi + g \sin \psi), \quad (7)$$

где C — произвольная постоянная; $g = \frac{p}{\omega_k}$ — безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы.

Используя условия $\sigma(\psi_0) = 0$ и $\sigma(\psi_a) = 0$, после исключения $C = -(\cos \psi_0 + g \sin \psi_0)$ получим

$$e^{-g\psi_0} (\cos \psi_0 + g \sin \psi_0) - e^{-g\psi_a} (\cos \psi_a + g \sin \psi_a) = 0. \quad (8)$$

При известных значениях углов ψ_0 и ψ_a выражение (8) представляет собой уравнение, позволяющее определить параметр g .

Параметр q может быть найден после определения g путем обработки экспериментальных значений $\sigma(\psi)$ методом наименьших квадратов. Теоретическая линия регрессии напряжений $\sigma(\psi)$ задается уравнением (7), ее неизвестный параметр q равен

$$q = \frac{H(g^2+1) \sum_{i=1}^n \sigma_3(\psi_i)}{R_{np} \sum_{i=1}^n (C e^{-g(\psi_0-\psi_i)} + \cos \psi_i + g \sin \psi_i)}, \quad (9)$$

где $\sigma_3(\psi_i)$ — значение напряжения сжатия почвы в i -й точке эмпирической линии регрессии эпюр вертикальных контактных

напряжений; n — число измерений $\sigma_3(\psi_i)$.

По формулам (8) и (9) определены величины g и q с использованием данных ряда опытов, проведенных на торфяной и дерново-подзолистой легкосуглинистой почвах [2, 4, 7]. На рис. 3 приведены эмпирические и теоретические линии регрессии напряжений $\sigma(\psi)$, соответствующие эмпирическим линиям регрессии напряжений $\sigma_p(\varphi)$, данным на рис. 2. Теоретическая линия регрессии напряжений $\sigma(\psi)$ на поверхности торфяной почвы (рис. 3, а) имеет параметры: $g = 2,71$, $q = 3,44$ МПа (при $H = 1$ м). Для теоретической линии регрессии напряжений $\sigma(\psi)$ на поверхности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (рис. 3, б) $g = 5,70$, $q = 6,86$ МПа ($H = 1$ м). Сопоставление экспериментальных и рассчитанных по уравнению (7) значений напряжений $\sigma(\psi)$ показало пригодность уравнения (7) и, следовательно, определяющего дифференциального уравнения (1) для моделирования закономерности деформирования при сжатии торфяной почвы с влажностью $W = 58 - 74$ %. Пригодность уравнения (1) для моделирования свойств уплотняющейся дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы показана ранее [6, 7].

Определение параметра q уравнения (1) по формуле (9) является весьма трудоемким. Покажем, что величина q может быть найдена расчетным путем без обработки экспериментальных эпюр напряжений $\sigma(\psi)$ методом наименьших квадратов.

В каждой точке линии контакта вертикальные напряжения сжатия почвы равны вертикальным напряжениям сжатия шины:

$$\sigma(\psi) = \sigma_{\text{ш}}(\psi). \quad (10)$$

Используя условие (10), замену переменной $\psi = \psi_{\text{в}} - \omega_{\text{к}} t$ и формулу (7), найдем общее решение уравнения (2), выражающее $\varepsilon_{\text{ш}}$:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \frac{qR_{\text{нп}}}{q_1 H(g^2 + 1)} \left[\left(\frac{g_1}{g} - 1 \right) \times \right. \\ \times (\cos \psi_{\text{в}} + g \sin \psi_{\text{в}}) e^{-g(\psi_{\text{в}} - \psi)} + \\ \left. + (1 + gg_1) \cos \psi + (g - g_1) \sin \psi + \right. \\ \left. + \frac{\psi_{\text{в}} - \psi}{\omega_{\text{к}}} C_1 + C_2 \right]. \quad (11)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 , входящие в (11), находятся из условий: $\varepsilon_{\text{ш}}(\psi_{\text{в}}) = 0$ и $\varepsilon_{\text{ш}}(\psi_{\text{а}}) = 0$.

Радиальная деформация шины в каждой точке линии контакта $u_{\text{ш}}(\psi) \approx \frac{\varepsilon_{\text{ш}}(\psi)}{H_{\text{ш}}} \cos \psi$. Учитывая это соотношение, в результате преобразований получим, что радиальная деформация эластичного колеса с вязкоупругой шиной в точке К (рис. 1) при $\psi = \psi_{\text{к}}$ равна

$$u(\psi_{\text{к}}) = \frac{qR_{\text{нп}}H_{\text{ш}}}{q_1 H(g^2 + 1)} \left[\left(\frac{g_1}{g} - 1 \right) \times \right. \\ \times (\cos \psi_{\text{в}} + g \sin \psi_{\text{в}}) e^{\frac{-g(\psi_{\text{в}} - \psi_{\text{к}})}{2}} \times \\ \times \cos \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} + (1 + gg_1) \cos^2 \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} + \\ \left. + \frac{g - g_1}{2} \sin(\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}) - \frac{g_1(g^2 + 1)}{g} \times \right. \\ \left. \times \cos \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} \left(\sin \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} \sin \frac{\psi_{\text{в}} - \psi_{\text{а}}}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \psi_{\text{в}} \right) \right]. \quad (12)$$

Из выражения (12) можно, зная $u(\psi_{\text{к}})$ и другие параметры, определить величину q .

Полагая в формуле (12) $g_1 = 0$, $q_1 = E_{\text{ш}}$, получим выражение для определения максимальной радиальной деформации эластичного колеса с упругой шиной:

$$u_{\text{м}} = u(\psi_{\text{к}}).$$

Из этого выражения найдем

$$q = E_{\text{ш}} H(g^2 + 1) u_{\text{м}} / \left[\left(\cos^2 \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{g}{2} \sin(\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}) - (\cos \psi_{\text{в}} + \right. \right. \\ \left. \left. + g \sin \psi_{\text{в}}) e^{-\frac{g}{2}(\psi_{\text{в}} - \psi_{\text{а}})} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos \frac{\psi_{\text{в}} + \psi_{\text{а}}}{2} \right) R_{\text{нп}} \right]. \quad (13)$$

Формула (13) может быть использована для определения параметра q , так как относительные отклонения соответствующих друг другу численных значений q , установленных по формулам (13) и (9), не превосходят 5,3 %, т. е. находятся в пределах точности экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования и выполненные нами расчеты показали, что тракторные колеса с пневматическими шинами, соответствующими ГОСТ 7463—80 [5], при качественной деформируются, как практически упругие при всех допустимых значениях G и $\rho_{\text{в}}$. Свойства этих эластичных колес могут быть описаны уравнением (3).

Разработаны методика и программа расчета на ЭВМ параметров g и q уравнения (1) по экспериментальным данным. Исходными для расчета g и q данными являются величины

D , $E_{ш}$, φ_b , φ_a , σ_{mr} (максимальное радиальное контактное напряжение), H . По этой программе с помощью формул (4), (5), (8) и (13) последовательно определяются R_{np} , ψ_b , ψ_a , а затем g и q .

В формуле (4)
$$u_m = \frac{\sigma_{mr} \cos^2 \psi_k}{E_{ш}}$$

В процессе выполнения расчетов находятся численно решения трансцендентных уравнений (4) и (8) путем применения в начале поиска интервалов существования корней уравнений, а затем — уточнения найденных приближенных значений корней методом хорд. Погрешности определения R_{np} и g — соответственно $\varepsilon_1 < 10^{-5}$ м и $\varepsilon_2 < 10^{-6}$.

По данным проведенных в ТСХА опытов, в которых осуществлялись проходы трактора МТЗ-82 с практически упругими шинами 11,2—20 и 16,9R38 по дерново-подзолистой легкоосушливой почве на постоянном пути $S=30$ м [7], в Вычислительной лаборатории ТСХА на ЭВМ СМ-4-20 выполнен ряд расчетов. Изучалось воздействие на почву раздельно передних и задних колес, поэтому они были расставлены на различную колею. Плотность ρ ($\text{г}/\text{см}^3$) этой почвы перед проходами колес линейно зависела от глубины x (м):

$$\rho(x) = \rho_0 + ax,$$

где ρ_0 — плотность почвы на ее поверхности, a — коэффициент. Через ρ обозначена плотность абсолютно сухой почвы, равная $\rho = \rho_{вл} / (0,01W + 1)$, где W (%) — весовая влажность почвы; $\rho_{вл}$ ($\text{г}/\text{см}^3$) — плотность влажной почвы.

В опытах были получены эпюры нормальных контактных напряжений $\sigma_p(\varphi)$ на переднем и на заднем колесах трактора при различных значениях G , ρ_w , V , ω , Q_0 , a , W . При каждом проходе трактора по почве на осциллограммах записано по 9—11 эпюр $\sigma_p(\varphi)$ на переднем и по 5—7 эпюр на заднем колесе. Эпюры, соответствующие одному проходу колеса по почве, представляют собой результаты параллельных опытов по определению характеристик вязкоупругих свойств почвы. Они подвергались статистической обработке. В результате получены средние для каждого прохода колеса по почве значения σ_{mr} , φ_b , φ_a , представляющие собой данные 45 независимых опытов.

В таблице приведены результаты, характеризующие некоторые из этих независимых опытов и соответствующие им значения параметров g и q . При работе тракторов из-за их колебаний минимальные и максимальные значения динамических нагрузок на оси колес могут в 1,4 и более раза отличаться от их средних значений [2, 3]. Приведенные в таблице значения G представляют собой средние за один проход по почве значения динамических нагрузок на оси колес. Измеренные при каждом обороте колеса значения $\sigma_p(\varphi)$ и данные в таблице для каждого опыта значения σ_{mr} соответствуют динамическим нагрузкам, превышающим G в результате влияния колебаний трактора.

Расчеты показали, что значения параметров g и q не зависят от геометрических размеров (наружного диаметра, ширины и

Характеристики почв и показатели взаимодействия тракторных колес с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой

| Шины | Показатели взаимодействия | | | | | | | | | | Характеристики почвы | | | | | |
|-----------|---------------------------|-----------------------|---------|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------------|--------|----------------------|------------------------|------|------|-------|-------|
| | G, кН | P _{кв} , МПа | V, км/ч | ω, с ⁻¹ | E _{шт} , МН/м | σ _{шт} , МПа | φ _{ст} , градус | R _{шт} , м | Q _ш , г/см ³ | α | W, % | ε | | | | |
| | | | | | | | | | | | | определены по формулам | | | | |
| | | | | | | | | | | | 8 | 14 | 13 | 15 | | |
| 11,2—20 | 6,08 | 0,17 | 4,86 | 2,48 | 57,88 | 0,150 | 32,30 | —12,15 | 0,5264 | 1,1383 | 1,70 | 18,37 | 4,74 | 5,62 | 5,41 | 5,30 |
| | 6,08 | 0,17 | 8,82 | 4,94 | 57,88 | 0,165 | 31,46 | —12,78 | 0,5306 | 1,1383 | 1,70 | 18,37 | 4,41 | 4,31 | 5,88 | 5,84 |
| | 6,08 | 0,11 | 5,30 | 2,86 | 40,75 | 0,190 | 16,64 | —13,02 | 0,6826 | 1,5792 | 0,25 | 17,96 | 2,79 | 2,25 | 14,46 | 13,12 |
| | 6,08 | 0,11 | 10,26 | 5,77 | 40,75 | 0,265 | 19,69 | —17,04 | 0,6573 | 1,5542 | 0,35 | 17,96 | 1,22 | 1,02 | 12,85 | 13,26 |
| 16,9/R/38 | 11,65 | 0,11 | 8,82 | 3,51 | 38,83 | 0,278 | 31,81 | —12,14 | 0,9431 | 1,1383 | 1,70 | 18,37 | 5,30 | 5,15 | 6,40 | 5,49 |
| | 17,49 | 0,11 | 3,71 | 1,30 | 26,08 | 0,270 | 34,40 | —12,00 | 0,9762 | 1,2492 | 1,05 | 20,11 | 6,18 | 5,33 | 6,24 | 6,82 |
| | 11,65 | 0,09 | 4,20 | 1,66 | 30,13 | 0,264 | 30,11 | —12,13 | 0,9836 | 1,2850 | 1,30 | 17,96 | 5,70 | 4,97 | 6,86 | 7,73 |
| | 17,49 | 0,25 | 10,51 | 3,72 | 67,42 | 0,350 | 23,50 | —13,50 | 0,9503 | 1,3675 | 0,75 | 25,51 | 3,40 | 3,06 | 8,52 | 8,84 |

высоты профиля) и других параметров колес и вертикальных нагрузок на их оси. Таким образом, найденные по предлагаемой методике параметры g и q уравнения (7) кривых $\sigma(\psi)$ являются характеристиками вязкоупругих свойств почвы и могут использоваться в расчетах по определению уплотняющего воздействия на почву, сопротивления качению и тяговых свойств тракторов и других мобильных машин.

Проведено исследование с целью выявления основных факторов, влияющих на величину характеристик вязкоупругих свойств почвы, и зависимостей g и q от этих факторов.

Установлено, что характеристики g и q вязкоупругих свойств исследовавшейся легкосуглинистой почвы зависят от плотности и влажности почвы и скорости ее деформирования. Скорость деформирования почвы катящимся эластичным колесом определяется угловой скоростью $\omega_k = \frac{\omega R}{R_{пр}}$ условного жесткого колеса. Найдены линейные корреляционные зависимости $\bar{q} = \bar{q}(\rho, \omega_k, W)$, $\bar{q} = \bar{q}(\rho, \omega_k)$, $\bar{q} = \bar{q}(\rho_{вл}, \omega_k, W)$, $\bar{q} = \bar{q}(\rho_{вл}, \omega_k)$, которые имеют соответственно следующие значения коэффициентов множественной корреляции $R_{кор}$: 0,7930; 0,7834; 0,7931; 0,7148.

Выявлены также линейные корреляционные зависимости $\bar{g} = \bar{g}(\rho, \omega_k, W)$, $\bar{g} = \bar{g}(\rho, \omega_k)$, $\bar{g} = \bar{g}(\rho_{вл}, \omega_k, W)$, $\bar{g} = \bar{g}(\rho_{вл}, \omega_k)$, имеющие $R_{кор}$ соответственно 0,7537; 0,7525; 0,7528; 0,7428. Получены уравнения регрессии для значений плотности абсо-

лютно сухой почвы $\rho = 1,138...1,579$ г/см³, плотности влажной почвы $\rho_{вл} = 1,347...1,864$ г/см³, весовой влажности почвы $W = 16,26...25,51$ %, угловой скорости условного колеса $\omega_k = 0,93...5,06$ 1/с. Дополнение линейных уравнений регрессии слагаемыми, представляющими собой произведения величин влияющих факторов, практически не изменяет коэффициентов $R_{кор}$.

Анализ полученных результатов показывает, что влажность почвы W необходимо учитывать при определении величин g и q , если в расчетах используются значения $\rho_{вл}$. При использовании же значений плотности абсолютно сухой почвы влияние W на g и q оказывается незначительным.

Для расчетного определения характеристик вязкоупругих свойств исследовавшейся легкосуглинистой почвы по известным значениям ее плотности, влажности и скорости деформирования рекомендуются следующие уравнения регрессии:

$$\bar{g} = 14,6547 - 6,7162\rho_{вл} - 0,5781\omega_k + 0,0851W, \quad (14)$$

$$\bar{q} = -9,6542 + 14,9813\rho_{вл} + 0,2446\omega_k - 0,3150W \quad (15)$$

или

$$\bar{g} = 16,2434 - 7,9864\rho - 0,5728\omega_k, \quad (16)$$

$$\bar{q} = -15,9852 + 17,9155\rho + 0,2881\omega_k, \quad (17)$$

Найденные уравнения отражают физическую природу вязкоупругих деформаций почвы. С увеличением плотности почвы и скорости ее деформирования уменьшается и стремится к нулю

сдвиг фаз между деформациями и напряжениями в почве. Соответственно уменьшается и стремится к нулю характеристика g . Параметр q при этом возрастает. Если $|\psi_a| = |\psi_s|$, то почва является упругой, $g=0$. Эпюра напряжений $\sigma(\psi)$ при $g=0$ станет симметричной относительно вертикальной оси, проходящей через точку с абсциссой $\Psi=0$. В случае линейной упругости параметр q примет значение коэффициента упругости почвы $E=\sigma/\epsilon$. Для определения E по данным о совместном деформировании упругой шины и почвы используется формула (13) при $g=0$, $\psi_a = -\psi_s$.

При увеличении влажности почвы характеристика g возрастает, а q — убывает. Рост влажности почвы приводит к изменению ее физического состояния в сторону приближения к текучему состоянию.

Полученные результаты могут быть применены при разработке методов расчета уплотняющего воздействия на почву, тяговых свойств и сопротивления движению тракторов и других мобильных машин. Практическое использование этих методов позволит дать рекомендации по уменьшению уплотнения почвы ходовыми системами машин и улучшению тяговых свойств машин.

1. Агейкин Я. С. Пройодимость автомобилей. — М.: Машиностроение, 1981.— 2. Алексйчик Н. А., Будиоко Ю. В., Терехов Б. А. Пovyшение проходимости сельскохозяйственных машин.— Минск: Ураджай, 1979.— 3. Бахтеев Р. Х. Влияние колебаний трактора на величину давлений шины на почву (на примере трактора Т-150К). Автореф. канд. дис. М., 1985.— 4. Будиоко Ю. В. Исследование сопротивления качению и обоснование параметров ходовых систем сельскохозяйственных машин на торфяно-болотных почвах.— Автореф. канд. дис. Минск, 1975.— 5. ГОСТ 7463—80. Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия.— 6. Золотаревская Д. И. О трении качения при движении колес по уплотняющемуся грунту.— Докл. ТСХА, 1968, вып. 136, с. 153—160.— 7. Золотаревская Д. И., Бурдыкин В. И., Матвеев В. В. и др. Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействи колесного трактора.— Изв. ТСХА, 1989, № 1, с. 175—183.— 8. Золотаревская Д. И. Контактные напряжения и деформации шин при качении эластичных колес.— Тракторы и с.-х. машины, 1989, № 5, с. 19—23.— 9. Маслов В. А. Снижение уплотняющего воздействия на почву при работе трактора типа «Кировец» на возделывании зерновых культур.— Автореф. канд. дис. Рязань, 1987. — 10. Хабатов Р. Ш., Золотаревская Д. И., Матвеев В. В. и др. Закономерности деформирования тракторных колес с пневматическими шинами.— Изв. ТСХА, 1987, № 3, с. 173—180.

Статья поступила 24 ноября 1988 г.

SUMMARY

Mathematical models for deformation of elastic wheels are suggested, the procedure of determining their parameters is developed, and tough-resilient and resilient characteristics of a number of automobile and tractor wheels are found.