

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЯГОВЫХ СВОЙСТВ И УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ

Д.П. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ

(Кафедра высшей математики)

На основе использования предложенных автором методов расчета тяговых свойств колесных тракторов, сопротивления движению и уплотняющего воздействия на почву мобильной колесной сельскохозяйственной техники по разработанным программам на ЭВМ определены показатели взаимодействия с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой трактора МТЗ-82 при его работе в составе МТА. Расчеты выполнены для случаев работы трактора на двух почвенных фонах, с разными эксплуатационными характеристиками, различными скоростями.

По разработанным программам на ЭВМ проведены полные факторные машинные эксперименты типа 2^4 для выявления зависимостей исследуемых показателей от динамического коэффициента нагрузки передней оси, давления воздуха в шинах передних и задних колес и скорости трактора. По результатам полных факторных экспериментов найдены уравнения регрессии, позволившие оценить влияние варьируемых факторов на показатели тяговых свойств, сопротивления движению и уплотняющего воздействия трактора на почву в различных условиях эксплуатации и дать рекомендации по улучшению этих показателей.

Проблемы снижения уплотняющего воздействия на почву, уменьшения сопротивления движению и повышения тягово-сцепных свойств тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники относятся в настоящее время к числу наиболее актуальных [1, 2]. При разработке и модернизации конструкций тракторов, комплектовании МТА и выборе режимов их работы с учетом требований снижения уплотняющего воздействия на почву и повышения тяговых свойств важное значение имеет использование научно обоснованных уточненных расчетных методов определения показателей взаимодействия тракторов с почвой.

Предложены методы расчета уплотняющего воздействия на почву и тяговых свойств колесных тракторов, которые основаны на математическом моделировании дифференциальными уравнениями закономерностей деформирования во времени почв, эластичных колесных движителей и процесса распространения вязкоупругих волн деформации сжатия почвы при качении колес; разработаны программы для ЭВМ, дающие возможность реализовать эти методы. Достоинства предложенных методов расчета подтверждены экспериментально [3—5].

В данной работе на основе использования полученных ранее результатов проведено теоретическое исследование, позволившее получить более точные и в то же время менее трудоемкие, чем приведенные в работах [3—5], алгоритмы расчета показателей взаимодействия колесных движителей и тракторов с почвой, а также реализовать эти алгоритмы программы для ЭВМ. По разработанным программам на ЭВМ выполнен ряд серий расчетов, проведены полные факторные машинные эксперименты.

На основании результатов статистической обработки экспериментальных данных зависимость плотности ρ верхнего деформирующегося слоя почвы, распространяемого на глубину H , до ее уплотнения колесами трактора от глубины y принята в виде 2 линейных участков:

$$\rho(y) = \begin{cases} \rho_{01} + k_1 y & \text{при } y \in [0; H_1], \\ \rho_{02} + k_2 y & \text{при } y \in (H_1; H], \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_{01} и $\rho_{02} = \rho_{01} + (k_1 - k_2)H_1$ — отрезки, отсекаемые на оси ρ прямыми $\rho(y) = \rho_{01} + k_1 y$ и $\rho(y) = \rho_{02} + k_2 y$, k_1 и k_2 — угловые коэффициенты этих прямых, H_1 — глубина первого участка.

При исследовании качения колеса по почве скорость v_0 оси колеса и его угловую скорость ω считали постоянными, поверхность почвы — горизонтальной. Вертикальную динамическую нагрузку на ось колеса обозначили через G_0 .

Уплотняющиеся почвы и эластичные колеса обладают вязкоупругими свойствами [6—8]; в частном случае эластичные колеса деформируются как практически упругие [7, 9, 10].

Радиус эластичного колеса $R = D/2$, где D — наружный диаметр шины (рис. 1). Линия контакта колеса с почвой в центральном продольном сечении аппроксимирована дугой окружности радиуса R_{np} , проходящей через тт. B и A входа колеса в контакт с почвой и выхода из контакта и через расположенную в середине кривой AB т. K ; в этой точке радиальная деформация шины достигает максимального значения e_m . Соответственно этой аппроксимации длина линии контакта определяется по углам $\psi_b > 0$ и $\psi_a < 0$ (углы набегания и сбегания условного жесткого колеса радиуса R_{np}). У колеса с почвозацепами линия контакта представляет условную поверхность контакта, проходящую через опорные поверхности почвозацепов.

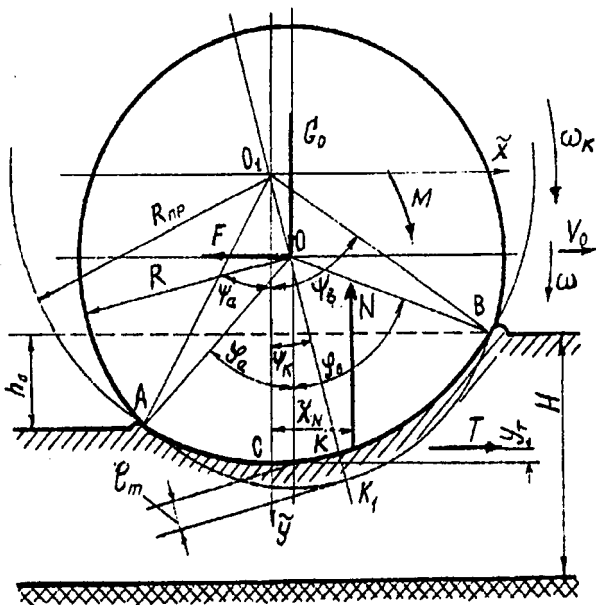


Рис. 1. Схема взаимодействия с уплотняющейся почвой ведущего эластичного колеса.

Приимая во внимание, что ширина B_m профиля шины большая, деформация шины и почвы приближенно принята плоской. Однако в связи с тем, что поверхность контакта колеса с почвой фактически отличается от цилиндрической, напряжения в почве распределены неравномерно не только вдоль линии контакта. В различных продольных сечениях колеса они отличаются от напряжений, возникающих в центральном продольном сечении. В расчетах эти различия учтены путем использования коэффициента k_ϕ формы, величина которого, зависящая в основном от плотности почвы, возрастает с ее уменьшением, изменяясь в интервале 0,62–0,86. При $\rho(0,05) > 1,2 \text{ г/см}^3$ коэффициент $k_\phi \approx 0,62$.

На линии контакта горизонтальные u и вертикальные v смещения почвы и шины, а следовательно, деформации и контактные напряжения являются функциями одного параметра – времени t или соответствующего ему текущего угла контакта $\psi = \psi_b - \omega_k t$ ($\psi_a \leq \psi \leq \psi_b$), где ω_k — угловая скорость условного колеса радиуса R_{np} .

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований [8, 10, 11] закономерность сжатия вязкоупругой уплотняющейся почвы в вертикальном направлении описан приближенно дифференциальным уравнением первого порядка

$$\dot{\sigma}_a + p\sigma_a = q\dot{\epsilon}. \quad (2)$$

где σ_a — сжимающее напряжение; ϵ — относительная деформация сжатия почвы; p, q — характеристики вязкоупругих свойств почвы.

Экспериментальные исследования и расчеты показали, что тракторные колеса с пневматическими шинами, соответствующими ГОСТ 7463-80, ГОСТ 7463-89, и с перспективными при качении по почве деформируются как практически линейно-упругие при всех допустимых значениях G_0 и давления p_w воздуха в шинах [9, 12]. В соответствии с результатами этих исследований закономерность сжатия эластичного колеса в вертикальном направлении опишем уравнением

$$\sigma_k = E_k h_k. \quad (3)$$

где σ_k, h_k и E_k — соответственно сжимающее напряжение, деформация сжатия и коэффициент упругости эластичного колеса.

При исследовании процесса взаимодействия колеса с почвой переменная l в уравнении (2) заменена на ψ .

При качении колеса деформация сжатия почвы распространяется на глубину $H_p \leq H$. Относительная деформация сжатия почвы колесом в каждой точке линии контакта равна $\epsilon = R_{np}(\cos \psi - \cos \psi_b)/H_p$. На основании использования этого выражения для ϵ , а также краевых условий $\sigma_a(\psi_b) = 0$ и $\sigma_a(\psi_a) = 0$ получены исходя из уравнения (2) формула для определения напряжений сжатия почвы в различных точках линии контакта

$$\sigma_a(\psi) = \frac{qR_{np}}{H_p(g^2 + 1)} \left[\cos \psi + g \cdot \sin \psi - (\cos \psi_b + g \cdot \sin \psi_b) e^{-g(\psi_b - \psi)} \right] \quad (4)$$

и уравнение, связывающее ψ_a и ψ_b ,

$$e^{-g\psi_b} (\cos \psi_b + g \cdot \sin \psi_b) - e^{-g\psi_a} (\cos \psi_a + g \cdot \sin \psi_a) = 0, \quad (5)$$

где $g = p/\omega_k$ — безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы.

Получена формула для определения максимального давления эластичного колеса на почву. Максимальное давление колеса, равное максимальному сжимающему напряжению $\sigma_{a, \max}$, определяется по формуле (4) при значении $\psi = (\psi_b + |\psi_a|)/2$.

Равнодействующая N распределенных по поверхности контакта элементарных вертикальных реакций почвы на колесо определена в результате выполнения преобразований в зависимости

$$N = 0,9 B_m k_\phi R_{np} \int_{\psi_a}^{\psi_b} (1 \pm f \cdot \operatorname{tg} \psi) \sigma_a(\psi) d\psi, \quad (6)$$

где напряжения $\sigma_a(\psi)$ определяются формулой (4), f — коэффициент трения скольжения между шиной и почвой. Из двух знаков «+» и «-» в (6) и в нижеследующих выражениях верхние соответствуют качению ведущего колеса (с буксованием $\delta > 0$), а нижние — ведомого колеса с тормозным моментом $M_T \neq 0$ (с буксованием $\delta < 0$). Из условий установившегося движения следует, что $N = G_0$.

При качении колеса в почве в вертикальной плоскости, проходящей через середину ширины профиля шины, распространяется плоская волна деформации, состоящая из волны сжатия, вызываемой вертикальными смещениями $v(y, t)$ почвы, и волны сдвига, вызываемой ее горизонтальными смещениями. Изменение плотности почвы обусловлено в основном ее вертикальными смещениями. После снятия нагрузки смещения $v(y, t)$ почвы с течением времени (при $t \rightarrow \infty$) стабилизируются. Принято, что приращение $\Delta\rho$ плотности почвы на глубине $y + v_c(y)$ пропорционально ее стабилизированным смещениям $v_c(y) = v(y, \infty)$.

На основании использования определяющего для почвы уравнения (2) получено дифференциальное уравнение с частными производными четвертого порядка с 2 независимыми переменными y и t и с переменными коэффициентами, моделирующее распространение волны сжатия в вязкоупругой почве переменной плотности, линейно зависящей от глубины,

$$\rho(y)v_{y'y'y'}^{IV} - q(y)v_{y'y'}^{IV} + k_n v_{y'y}'' + p(y)\rho(y)v_{y'y}'' - b_n v_{y'y}'' + [2c_n \rho(y) + k_n p(y)]v_{y'}' = 0, \quad (7)$$

где k_n, b_n, c_n — коэффициенты при y в линейных зависимостях $\rho(y), q(y), p(y)$; $n = 1$ при $y \in [0; H_1]$ и $n = 2$ при $y \in (H_1; H]$.

При $k_n = b_n = c_n = 0$ уравнение (7) преобразуется в волновое уравнение для вязкоупругой почвы постоянной плотности

$$\rho v_{y'y'y'}^{IV} - q v_{y'y'}^{IV} - p \rho v_{y'y}'' = 0, \quad (8)$$

где $\rho = \text{const}, p, q$ — постоянные характеристики вязкоупругих свойств почвы. Уравнение (8) по своей структуре аналогично волновому уравнению для среды Максвелла, приведенному в работе [13], и отличается от него физическим смыслом параметров, характеризующих вязкоупругие свойства почвы.

Получены формулы для приближенного определения вертикальных смещений $v(y, t)$ почвы. Смещение $v(y, t)$ почвы находим вначале при $t \in [0; t_1]$, а затем при $t \in [t_1, \infty]$, где $t_1 = (\nu_b + |\nu_a|)/\omega_k$ — время контакта колеса с почвой при одном обороте колеса.

Смещения $v(y, t)$ найдены при различных соотношениях между глубиной H_p распространения деформации сжатия почвы и величинами H_1 и H : $H_p \leq H_1, H_1 < H_p \leq H$. В частных случаях $H = H_1$, плотность почвы $\rho(y) = \rho_{01} + k_y y$ или же $\rho = \text{const}$ при всех $y \in [0; H]$. Приняв, что при качении колеса фактическая глубина распространения деформации в почве $H_p < H$, считаем, что область распространения деформации не ограничена снизу ($H \rightarrow \infty$).

Для случаев линейной зависимости $\rho = \rho_{01} + k_y y$ при всех $y \in [0; H]$ и $H_p < H$, а также кусочно-линейной зависимости (1) и $H_p < H$ решение уравнения (7), удовлетворяющее граничным и начальным условиям,

$$\left. \begin{aligned} v(0; t) &= R_{np} [\sin(\alpha_0 + \omega_k t) - \sin \alpha_0]; \\ v(\infty; t) &= 0 \end{aligned} \right\} t \in [0; t_1], \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} v(y; 0) &= 0; \quad v'(y; 0) = 0; \\ v''(y; 0) &= 0 \end{aligned} \right\} y \in [0; \infty)$$

получено при $t \in [0; t_1]$ в виде

$$v(y; t) = \begin{cases} R_{np} e^{-w(y)} [\sin(\alpha_0 + \omega_k t - z(y)) - \sin \alpha_0] & \text{при } t > 0, \\ 0 & \text{при } t \leq 0, \end{cases} \quad (10)$$

$y \in [0; \infty)$. В формулах (9) и (10) $\alpha_0 = \pi/2 - \psi_b$, $w(y) = w_1(y) + w_2(y - H_1)$ и $z(y) = z_1(y) + z_2(y - H_1)$, $w_1(y) = y \cdot f_1(y) \geq 0$, $w_2(y - H_1) = (y - H_1) \times f_2(y - H_1) \geq 0$, $z_1(y) = y \cdot \tilde{c}_1(y) \geq 0$, $z_2(y - H_1) = (y - H_1) \cdot \tilde{c}_2(y - H_1) \geq 0$.

Функции $w(y)$ и $z(y)$ характеризуют затухание с глубиной волны деформации сжатия почвы, причем слагаемые $w_1(y)$ и $z_1(y)$ характеризуют затухание этой волны при $y \in [0, H_1]$, а $w_2(y - H_1)$ и $z_2(y - H_1)$ — при $y \in (H_1, H]$. В данной работе в отличие от результатов, приведенных в работах [3, 4], переменные коэффициенты $f_1(y)$, $f_2(y - H_1)$, $\tilde{c}_1(y)$ и $\tilde{c}_2(y - H_1)$ искомым функциям $w(y)$ и $z(y)$ определены методом коллокации [14]. Приняли приближенно, что при $y \in [0; H_1]$

$$f_1(y) = f_{01} + f_{11}y; \quad \tilde{c}_1(y) = \tilde{c}_{01} + \tilde{c}_{11}y; \quad (11)$$

а при $y \in (H_1; H]$

$$f_2(y - H_1) = f_{02} + f_{12}(y - H); \quad \tilde{c}_2(y - H_1) = \tilde{c}_{02} + \tilde{c}_{12}(y - H), \quad (12)$$

где f_{01} , f_{11} , \tilde{c}_{01} , \tilde{c}_{11} , f_{02} , f_{12} , \tilde{c}_{02} , \tilde{c}_{12} — постоянные коэффициенты; $f_{02} = f_{01} + f_{11}H_1$, $\tilde{c}_{02} = \tilde{c}_{01} + \tilde{c}_{11}H_1$.

Для определения указанных постоянных коэффициентов потребовались в выбранных точках из отрезка $[0; H]$ (в точках коллокации). В остальных точках этого отрезка решение краевой задачи будет приближенным. В случае зависимости (1) плотности почвы от глубины в качестве точек коллокации приняли точки $y_0 = 0$, $y_1 = H_1$ и $y_2 = H$. При $y_0 = 0$ имеем $\rho(y) = \rho(0) = \rho_0$, $q(y) = q(0) = q_0$, $p(y) = p(0) = p_0$, уравнение (7) преобразуется в волновое уравнение (8) с постоянными коэффициентами. Параметры уравнения (8) при $y_0 = 0$ равны $\rho = \rho_0$, $q = q_0$, $p = p_0$; затухание волны сжатия почвы характеризуют коэффициенты $f_1(y) = f_1(0) = f_{01}$, $\tilde{c}_1(y) = \tilde{c}_1(0) = \tilde{c}_{01}$. Постоянные коэффициенты f_{01} и \tilde{c}_{01} определяем по формулам

$$f_{01} = \omega_k \sqrt{\frac{\rho_0}{2q_0} \sqrt{g_0^2 + 1}}, \quad \tilde{c}_{01} = \frac{\rho_0 \omega_k^2 g_0}{2q_0 f_{01}}, \quad (13)$$

где $g_0 = p_0/\omega_k$.

При $y = H_1$ имеем $\rho_{H_1} = \rho(H_1) = \rho_0 + k_1 H_1$, $q_{H_1} = q(H_1) = q_0 + b H_1$, $p_{H_1} = p(H_1) = p_0 + c H_1$, $g_{H_1} = p_{H_1} / \omega_k$. Уравнение (7) преобразуется в волновое уравнение (8) с постоянными коэффициентами, равными $\rho = \rho_{H_1}$, $q = q_{H_1}$, $p = p_{H_1}$. Коэффициенты f_{H_1} и \tilde{c}_{H_1} находим по формулам (13), в которые подставляем вместо ρ_0 , q_0 и g_0 соответственно ρ_{H_1} , q_{H_1} и g_{H_1} .

Коэффициенты f_{11} и \tilde{c}_{11} , входящие в формулы (11), определяем по формулам

$$f_{11} = \frac{f_{H_1} - f_{01}}{H_1}; \quad \tilde{c}_{11} = \frac{\tilde{c}_{H_1} - \tilde{c}_{01}}{H_1}. \quad (14)$$

Зная коэффициенты f_{01} , f_{11} , \tilde{c}_{01} , \tilde{c}_{11} , находим функции $w_1(y) = y \cdot f_1(y) = f_{01}y + f_{11}y^2$ и $z_1(y) = y \cdot \tilde{c}_1(y) = \tilde{c}_{01}y + \tilde{c}_{11}y^2$. Аналогично определяем функции $w_2(y - H_1)$ и $z_2(y - H_1)$.

В формулы для определения вертикальных смещений почвы и равнодействующих вертикальных и горизонтальных реакций почвы на колесо входят неизвестные величины ψ_b , ψ_n , R_{np} и H_p . Эти величины определяем как решение полученной в работе системы 4 нелинейных уравнений с 4 неизвестными и с переменными коэффициентами. Указанная система включает в себя: уравнение (5); уравнение $N = G_0$, где N определяется на основании зависимости (6); уравнения, полученные из условий $e_\phi(\psi_k) - e_T(\psi_k) = 0$ и $v(H_p, t) = 0$, где $e_\phi(\psi_k)$ и $e_T(\psi_k)$ — радиальная деформация эластичного колеса в точке K , определяемая соответственно из физических и геометрических соотношений (рис. 1). Если предположить, что деформация почвы распространяется на глубину, большую H_1 , но меньшую H , то четвертым уравнением системы будет следующее:

$$\tilde{c}_{01} H_1 + \tilde{c}_{11} H_1^2 + \tilde{c}_{02} (H_p - H_1) + \tilde{c}_{12} (H_p - H_1)^2 - \psi_b + \psi_n = 0. \quad (15)$$

В результате решения указанной системы 4 нелинейных уравнений находим предполагаемую глубину распространения деформации почвы, которую обозначаем через H_{PT} . Если при решении системы будет получено, что $H_{PT} \leq H$, то фактическая глубина распространения деформации сжатия почвы $H_p = H_{PT}$. Если будет получено $H_{PT} > H$, то это будет означать, что область распространения деформации сжатия почвы ограничена снизу величиной H и $H_p = H$. Границей $y = H$ возбуждается отраженная волна. В этом случае неизвестные величины ψ_b , ψ_n и R_{np} находим как решение системы 3 трансцендентных уравнений с 3 неизвестными, которая состоит из первых 3 уравнений предыдущей системы.

Определив ψ_b , ψ_n и R_{np} , H_p по формуле (10) найдем вертикальные смещения почвы $v(y, t)$ при $t \in [0, t_1]$. Смещения почвы $v(y, t)$ при

$t \in (t_1, \infty)$ находим так же, как это сделано в работе [4]. Приближенное решение краевой задачи об определении $v(y, t)$ при $t \in (t_1, \infty)$, полученное путем применения преобразования Лапласа-Карсона и метода коллокации, имеет вид

$$v(y, t) = \frac{h_0(H_p - y)}{H_p} + \sum_{k=1}^n C_k(t) \sin \frac{\pi k}{H_p} y, \quad (16)$$

где n — число точек коллокации. При $t \rightarrow \infty$ смещения $v(y, t) \rightarrow v_c(t)$, $C_k(t) \rightarrow \bar{C}_k$, где \bar{C}_k — постоянные коэффициенты. Если границей $y = H$ возбуждается отраженная волна, то приближенно можно принять, что $v(y, t)$ определяется только первым членом формулы (16). При $C_k \approx 0$ и $H_p \leq H_1$ приращение плотности почвы на глубине $y + v_c(y) \leq H_p$ приближенно равно

$$\Delta \rho(y + v_c(y)) = \frac{h_0(2\rho_{01} + k_1 h_0)(H_p - y)}{(H_p + \mu h_0)^2}, \quad (17)$$

где μ — коэффициент поперечного расширения почвы,

$$h_0 = R_{np}(\cos \psi_a - \cos \psi_b) \quad (18)$$

остаточная после прохода колеса осадка почвы.

В результате выполненных расчетов выявлено, что если начальная плотность почвы описывается зависимостью (1) и $H_1 < H_p \leq H$, то плотность почвы после прохода колеса также характеризуется приближенно зависимостью, состоящей из 2 линейных участков. Она определяет начальную плотность почвы перед вторым проходом того же или первым проходом другого колеса.

Сопроотивление качению и тяговые свойства колесных движителей определены аналитически в их взаимной связи с уплотняющим воздействием на почву. Величины ψ_b , ψ_a , R_{np} , H_p входящие в формулы для определения характеристик тяговых свойств колес, находим, как описано выше. Учтено, что на поверхности контакта колеса и почвы имеются зоны сцепления и буксования (или скольжения); при качении колеса с почвозацепами на контактных поверхностях почвозацепов возникают области сдвига и среза почвы.

Получены формулы для определения равнодействующих \tilde{T}_b , \tilde{T}_{cx} , \tilde{T}_{cy} и T_b , T_{cx} , T_{cy} элементарных горизонтальных реакций почвы на колесо в зонах буксования, скольжения и сцепления, принадлежащих соответственно областям среза и без среза (со сдвигом) почвы почвозацепами. Формулы для определения \tilde{T}_b , \tilde{T}_{cx} и \tilde{T}_{cy} найдены в результате выполнения преобразований в зависимостях

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{\text{в.сх}} &= 0,9\kappa_{\phi} B_w R_{np} [v \int_{\psi_n}^{\psi_v} (\pm f - \text{tg } \psi) d\psi + \\ &+ (1-v) \int_{\psi_n}^{\psi_v} (\pm f_{nv} - \text{tg } \psi) \sigma_a(\psi) d\psi \pm c_0(\sin \psi_v - \sin \psi_n)], \\ \tilde{T}_{\text{сч}} &= 0,9\kappa_{\phi} B_w R_{np} [v \int_{\psi_n}^{\psi_v} \left(\frac{1}{1-\delta} \text{cosec } \psi - \text{ctg } \psi - \text{tg } \psi \right) \sigma_a(\psi) d\psi + \\ &+ (1-v) \int_{\psi_n}^{\psi_v} (\pm f_{nv} - \text{tg } \psi) \sigma_a(\psi) d\psi \pm c_0(\sin \psi_v - \sin \psi_n)], \end{aligned} \quad (20)$$

где v — коэффициент насыщения рисунка протектора шины, f_{nv} — коэффициент внутреннего трения почвы, c_0 — сцепление почвы, ψ_n и ψ_v — соответственно нижняя и верхняя границы рассматриваемой зоны (буксования, скольжения или сцепления).

Равнодействующая T элементарных горизонтальных реакций почвы на колесо определена как сумма равнодействующих горизонтальных

реакций T_j во всех зонах контактной поверхности: $T = \sum_{j=1}^m T_j$, где m — число зон.

Получены аналитические зависимости для определения приложенного к оси колеса момента M (ведущего или тормозного), силы S и момента сопротивления качению колеса и другие.

На основании результатов выполненного теоретического исследования процесса взаимодействия с почвой колесных движителей нами предложены методы и разработаны соответствующие методики расчетного определения показателей уплотняющего воздействия на почву, тяговых свойств и сопротивления движению колесных тракторов.

В качестве показателей уплотняющего воздействия на почву тракторов и другой мобильной сельскохозяйственной техники предложено использовать следующие: приращение плотности и плотность почвы в следах движителей; определенные на различной глубине; остаточная глубина колес; глубина распространения деформации сжатия почвы.

Оценку и сравнение уплотняющего воздействия различных колесных машин на одну и ту же почву с одинаковыми при работе этих машин значениями начальной плотности и влажности почвы можно производить по величинам максимальных и средних сжимающих напряжений, возникающих в контакте движителей с почвой. Эти показатели предложено определять расчетным путем, используя разработанные нами методы.

В соответствии со сделанными в данной работе изменениями методики расчетов, предложенной в работах [3—5], нами также выполнены изменения программ для ЭВМ. По разработанным программам

на ЭВМ проведены расчеты, результаты которых сопоставлены с полученными нами экспериментальными данными, характеризующими взаимодействие с почвой движителей трактора МТЗ-82. Для опыгов по уплотнению почвы трактором МТЗ-82 среднее значение относительных отклонений расчетных значений плотности после проходов колес на глубине h_0 от соответствующих экспериментальных значений равно 4,33%, их стандарт (среднее квадратическое отклонение) составляет 4,34%. Среднее значение отклонений расчетных значений силы тяги на крюке трактора от ее экспериментальных значений равно 0,08 кН, стандарт этих отклонений равен 0,33 кН. Расхождения расчетных и экспериментальных значений всех исследуемых показателей находятся в пределах точности экспериментальных данных.

Нами была поставлена задача оценить влияние распределения вертикальных динамических нагрузок по осям трактора, давления воздуха в шинах передних и задних колес, а также скорости трактора на показатели его уплотняющего воздействия на почву, тяговых свойств и сопротивления движению. По разработанным программам на ЭВМ выполнены расчеты, позволившие выполнить такую оценку.

В расчетах по разработанной методике рассматриваем движение колесного трактора в агрегате с сельхозмашиной или прицепом со скоростью $v_0 = \text{const}$ по уплотняющей почве. Начальная плотность почвы описывается зависимостью (1). В результате расчета выявляется возможность выполнения данного вида полевых работ трактором при заданном значении $P_{кр}$ — необходимой силы тяги на крюке трактора на почве с известными физико-механическими свойствами. Если в результате расчета выявляется такая возможность (расчетное значение силы тяги на крюке $P_{кpp} \leq P_{кр}$), то определяем показатели уплотняющего воздействия и другие показатели работы трактора: силу сопротивления движению, фактический и максимально возможный в данных условиях КПД ходовой системы трактора и т. п.

Исходными данными для расчета средних значений показателей уплотняющего воздействия на почву, сопротивления качению i -го колеса ($i = 1$ для переднего и $i = 2$ для заднего), а также тяговых свойств ведущего колеса являются: среднее значение G_0 , вертикальной динамической нагрузки на ось колеса, радиус $R_i = D_i/2$, где D_i — наружный диаметр шины, ширина $B_{ши}$ профиля шины, коэффициент упругости $E_{ки}$ эластичного колеса, коэффициент насыщенности рисунка протектора шины v_p , скорость v_0 , буксование колеса δ , коэффициент формы $k_{фш}$, параметры зависимости вида (1) плотности влажной почвы от глубины, коэффициент поперечного расширения μ почвы, связность c_0 почвы, коэффициент внутреннего трения $f_{вч}$ почвы, влажность w почвы, коэффициент трения скольжения f_i между шиной и почвой, коэффициенты корреляционных зависимостей характеристик g и q вязкоупругих свойств почвы от ρ_s , w и угловой скорости ω_k условного колеса радиуса R_{np} , характеризующей скорость деформирования почвы. Коэффициенты упругости $E_{ки}$ эластичных колес определяем по мето-

дике, данной в [9]. Характеристики g и q вязкоупругих свойств почвы находим путем обработки опытных данных по методике, приведенной в [8]. Для различных почв нужно получить и использовать в расчетах корреляционные зависимости величины g и q от ρ_w , w и ω_k . Для исследованной нами дерново-подзолистой почвы рекомендуем использовать полученные нами обработкой экспериментальных данных (при $\rho = \rho_d / (1 + 0,01w) = 1,138-1,579 \text{ г/см}^3$, $w = 16,26-25,54\%$, $\omega_k = 0,93-5,01 \text{ с}^{-1}$) следующие линейные уравнения регрессии:

$$g = 14,655 - 6,716\rho_w - 0,581\omega_k + 0,085w; \quad (21)$$

$$q = -9,654 + 14,981\rho_w - 0,245\omega_k + 0,315w \quad (22)$$

с коэффициентами множественной корреляции, равными соответственно 0,7931 и 0,7528, где ρ_w и ρ — плотность соответственно влажной и абсолютно сухой почвы ненарушенной структуры.

Для определения характеристик c_p , f_{np} и μ почвы использовали методику, разработанную в НАТИ М. И. Ляско [7].

Рассмотрена работа машинно-тракторного агрегата на базе трактора МТЗ-82 с заданным значением силы тяги на крюке трактора $P_{кр} = 9,2 \text{ кН}$ на 2 различных почвенных фонах легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы. Эксплуатационная масса трактора $G_0 = 38,48 \text{ кН}$, трактор укомплектован шинами 9,0-20 (ведущие) и 15,5R38 соответственно для передних и задних колес. Влажность почвы $w = 18,4\%$. Закономерность деформирования почвы подчиняется уравнению (2), характеристики g и q ее вязкоупругих свойств — уравнениям регрессии (21) и (22). Плотность почвы до прохода трактора характеризуется зависимостью (1). Параметры этой зависимости для менее плотной почвы (фон 1) и для более плотной почвы (фон 2) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики почвы

Фон	ρ_{01} , г/см ³	κ_1 , г/см ²	ρ_{02} , г/см ³	κ_2 , г/см ²	H_1 , м	H_2 , м
1	1,3498	2,0198	1,9257	0,2049	0,32	1,00
2	1,4910	0,6400	2,0133	0,1294	0,29	0,97

Исследованы 2 вида вариантов работы трактора в составе МТА. Варианты первого вида различаются характером расстановки колес трактора на колею. Рассмотрены 2 случая расстановки колес: а) следы передних и задних колес различны; б) задние колеса движутся по следу передних. Варианты второго вида различаются числом ведущих колес трактора. Рассмотрены следующие случаи работы трактора: а) с включенным передним мостом, т. е. по схеме 4×4; б) с выключенным передним мостом, т. е. по схеме 4×2.

Для выявления влияния на исследуемые показатели распределения вертикальной динамической нагрузки по осям трактора, давления воздуха в шинах передних и задних колес и скорости МТА по разработанным программам на ЭВМ выполнены расчеты. Эти расчеты представляют собой опыты в сериях полных факторных машинных экспериментов типа $N = 2^4$, где N — число опытов в серии, 4 — число влияющих факторов, 2 — число уровней варьирования факторов. Варьировали следующие 4 фактора: λ_{10} — динамический коэффициент нагрузки передней оси; v_0 , м/с — скорость МТА; p_{w1} и p_{w2} , кПа — давление воздуха в шинах соответственно передних и задних колес трактора. Для каждого варьиремого фактора были выбраны основной уровень и по 2 уровня, равно отстоящих от основного (нижний и верхний) (табл. 2).

Таблица 2

Условия опытов				
Фактор	Уровень факторов			Интервал варьирования
	нижний -1	основной 0	верхний +1	
λ_1	0,2	0,4	0,6	0,2
v , м/с	1,0	2,5	4,0	1,5
p_{w1} , кПа	80	80	160	80
p_{w2} , кПа	80	80	160	80

Проведено 8 различных серий опытов. Каждая из этих серий опытов состояла из 16 4-факторных опытов (расчетов) и соответствовала условиям, указанным в табл. 3.

Таблица 3

Условия работы трактора			
Номер серий опытов	Почвенный фон	Схема расстановки передних и задних колес	Характер использования переднего моста
1	1	Следы различны	Выключен
2	1	След в след	— » —
3	1	Следы различны	Включен
4	1	След в след	— » —
5	2	Следы различны	Выключен
6	2	След в след	— » —
7	2	Следы различны	Включен
8	2	След в след	— » —

Взаимодействие с почвой передних и задних колес рассматривали последовательно. В случае движения задних колес по следу передних данные о плотности почвы после прохода передних колес были исходными для определения характеристик взаимодействия с почвой задних колес. Если ширина B_{m2} профиля шины заднего колеса больше ширины B_{m1} профиля шины переднего и заднее колесо движется по следу переднего, то равнодействующая T_2 элементарных горизонтальных реакций почвы на заднее колесо равна сумме двух слагаемых: $T_2 = T_{21} + T_{22}$. Слагаемые T_{21} и T_{22} представляют собой равнодействующие элементарных горизонтальных реакций почвы от движения соответственно по уплотненной и по неуплотненной передним колесом почве. Почва уплотнена передним колесом по ширине его следа, равной $0,9B_{m1}$. Неуплотненная почва находится в зоне, общая ширина которой равна $0,9(B_{m2} - B_{m1})$. Принято, что уплотнение почвы задним колесом по ширине следа переднего колеса происходит под действием вертикальной нагрузки $G_{21} = k_1 G_2$, где $k_1 = B_{m1}/B_{m2}$. Сила $T_{22} = k_2 \tilde{T}_2$, где \tilde{T}_2 — равнодействующая элементарных горизонтальных реакций почвы на заднем колесе, распределенных по ширине его следа в случае движения заднего колеса по неуплотненной почве (т. е. в том случае, когда следы передних и задних колес различны), а коэффициент $k_2 = (B_{m2} - B_{m1})/B_{m2}$. Соответствующим образом определены сила S_2 сопротивления движению и касательная сила тяги P_2 заднего колеса в случае его движения по следу переднего.

При выполнении расчетов вначале определяем для i -го колеса величины $R_{крp}$, $H_{крp}$, ψ_{br} , ψ_{op} , h_{op} , плотность почвы после его прохода $\rho_{it}(y)$, равнодействующие горизонтальные реакции почвы на колесо S_i , T_i , моменты M_i и другие показатели. По данным, характеризующим взаимодействие с почвой передних и задних колес, находим показатели для трактора: расчетное значение силы тяги на крюке $P_{крp} = 2(T_1 + T_2)$, силу сопротивления движению $P_f = 2(S_1 + S_2)$, максимально возможный в данных условиях и фактический КПД ходовой системы и другие. Работа МТА в заданных условиях возможна в том случае, когда $P_{крp} \geq P_{кр}$. Если $P_{крp} > P_{кр}$, то трактор может развить заданную силу тяги на крюке при работе с меньшим буксованием, чем было задано в расчетах. При движении по схеме «следы различны» в качестве остаточной после прохода трактора осадки h_o почвы принимаем большее из значений h_{o1} и h_{o2} . При движении по схеме «след в след» $h_o = h_{o1} + h_{o2}$.

В каждом из 128 опытов определены показатели 2 групп: 1) сопротивления движению и тяговых свойств трактора (показатели первой группы) и 2) уплотняющего воздействия трактора на почву (показатели второй группы). К числу найденных показателей первой группы относятся следующие: P_f и f_k — соответственно сила и коэффициент сопротивления движению; P_k — касательная сила тяги ведущих колес; $P_{крp}$ — сила тяги на крюке (расчетное значение); $\eta_{кс}$ — максимально возможное значение КПД ходовой системы трактора; η_f — КПД, учитывающий потери на деформирование почвы. В число найденных по-

казателей второй группы входят h_0 — глубина колес, оставшейся после прохода трактора; $\Delta\rho_n(h_0)$ и $\Delta\rho(h_0)$ — приращение плотности на глубине h_0 соответственно влажной и абсолютно сухой почвы; $\rho_{1\sigma}(0,05)$ и $\rho_1(0,05)$ — плотность после прохода трактора на глубине 0,05 м соответственно влажной и абсолютно сухой почвы; $\sigma_{n, \max}$ и $\sigma_{n, ср}$ — соответственно максимальное и среднее сжимающее напряжение на контактной поверхности колеса и почвы.

Результаты выполненных расчетов использованы для получения корреляционных зависимостей указанных показателей от 4 варьируемых факторов $\lambda_{1\sigma}$, v_0 , p_{w1} , p_{w2} по методике обработки данных полных факторных экспериментов [15]. Введены следующие обозначения: $\tilde{x}_1 = \lambda_{1\sigma}$, $\tilde{x}_2 = v_0$, $\tilde{x}_3 = p_{w1}$, $\tilde{x}_4 = p_{w2}$. Натуральные значения переменных \tilde{x}_1 , \tilde{x}_2 , \tilde{x}_3 , \tilde{x}_4 преобразованы в соответствующие кодированные значения по формуле

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (23)$$

где $j = 1, 2, 3, 4$ — номера фактора, \tilde{x}_{j0} — натуральное значение основного уровня, $I_j = |\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}|$ — интервал варьирования.

Уравнения регрессии отыскивали в следующем виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_1x_4 + b_8x_2x_3 + b_9x_2x_4 + b_{10}x_3x_4 + b_{11}x_1x_2x_3 + b_{12}x_1x_2x_4 + b_{13}x_1x_3x_4 + b_{14}x_2x_3x_4 + b_{15}x_1x_2x_3x_4, \quad (24)$$

где y — значение результативного фактора, b_0, b_1, \dots, b_{15} — постоянные коэффициенты.

По методике из [15] определили коэффициенты уравнений вида (24), используя данные всех опытов.

Проведена проверка адекватности линейных моделей вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (25)$$

по критерию Фишера при 5% уровне значимости. Сопоставление расчетных значений критерия Фишера с табличными [15] показало, что для всех результативных факторов в каждой из 8 серий опытов линейные модели (25) являются адекватными, поэтому членами уравнений (24), содержащими произведения факторов x_1, x_2, x_3, x_4 , можно пренебречь.

В результате сопоставления найденных коэффициентов b_j ($j = 1, 2, 3, 4$) с величинами доверительных интервалов для них выявлено, что значимы только коэффициенты b_1 и b_2 . Таким образом, основное влияние на исследуемые показатели в заданных интервалах варьирования факторов оказывают распределение вертикальных нагрузок по осям трактора и скорость агрегата; изменение давления воздуха в шинах влияет незначительно. Значимые коэффициенты полученных уравнений регрессии для ряда показателей приведены в табл. 4. Для

уточнения степени влияния давления воздуха в шинах проведены дополнительно полные факторные машинные эксперименты плана 2^2 с двумя варьируемыми факторами p_{w1} и p_{w2} . Выполненные расчеты подтвердили, что влияние изменения в заданных интервалах величин p_{w1} и p_{w2} весьма мало.

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты уравнений регрессии для показателей работы трактора на почвенном фоне 1 (числитель) и на фоне 2 (знаменатель)

Номер серий опытов	Показатель тяговых свойств	Коэффициенты уравнений регрессии			Показатели уплотняющего воздействия	Коэффициенты уравнений регрессии		
		b_0	b_1	b_2		b_0	b_1	b_2
1 5	$P_{кпп}$, кН	<u>1,96</u>	<u>-5,33</u>	<u>3,83</u>	h_0 , м	<u>0,084</u>	<u>0,040</u>	<u>-0,041</u>
		5,15	-4,33	2,36		0,045	0,023	-0,026
	P_f , кН	<u>8,23</u>	<u>2,21</u>	<u>-3,65</u>	$\Delta\rho_a(h_0)$, г/см ³	<u>0,225</u>	<u>0,111</u>	<u>-0,112</u>
		4,95	1,27	-2,23		0,138	0,072	-0,079
f_k	<u>0,214</u>	<u>0,057</u>	<u>-0,094</u>	$\rho_{1a}(0,05)$, г/см ³	<u>1,829</u>	<u>0,185</u>	<u>-0,188</u>	
	0,129	0,033	-0,058		1,806	0,113	-0,124	
η_f	<u>0,029</u>	<u>-0,515</u>	<u>0,466</u>	$\sigma_{e, max}$, кПа	<u>175,4</u>	<u>46,9</u>	<u>20,9</u>	
	0,416	-0,302	0,280		216,2	68,6	21,8	
2 6	$P_{кпп}$, кН	<u>3,10</u>	<u>-5,02</u>	<u>2,47</u>	h_0 , м	<u>0,107</u>	<u>0,027</u>	<u>-0,045</u>
		5,79	-4,22	2,05		0,062	0,012	-0,027
	P_f , кН	<u>7,42</u>	<u>1,93</u>	<u>-3,31</u>	$\Delta\rho_a(h_0)$, г/см ³	<u>0,262</u>	<u>0,098</u>	<u>-0,129</u>
		4,58	1,12	-1,96		0,160	0,056	-0,090
f_k	<u>0,188</u>	<u>0,052</u>	<u>-0,092</u>	$\rho_{1a}(0,05)$, г/см ³	<u>1,810</u>	<u>0,103</u>	<u>-0,041</u>	
	0,119	0,029	-0,051		1,894	0,056	-0,135	
η_f	<u>0,160</u>	<u>-0,422</u>	<u>0,382</u>	$\sigma_{e, max}$, кПа	<u>200,3</u>	<u>-44,9</u>	<u>-10,2</u>	
	0,478	-0,264	0,239		210,8	-33,17	-8,37	
3 7	$P_{кпп}$, кН	<u>10,89</u>	<u>-0,49</u>	<u>3,04</u>	h_0 , м	<u>0,058</u>	<u>0,023</u>	<u>-0,048</u>
		13,44	0,03	2,25		0,036	0,016	-0,023
	P_f , кН	<u>5,95</u>	<u>0,28</u>	<u>-1,95</u>	$\Delta\rho_a(h_0)$, г/см ³	<u>0,141</u>	<u>-0,046</u>	<u>-0,040</u>
		3,97	0,39	-1,78		0,111	0,051	-0,040
f_k	<u>0,165</u>	<u>0,017</u>	<u>-0,062</u>	$\rho_{1a}(0,05)$, г/см ³	<u>1,690</u>	<u>0,078</u>	<u>-0,067</u>	
	0,156	0,012	-0,053		1,762	0,080	-0,111	
η_f	<u>0,626</u>	<u>-0,038</u>	<u>0,154</u>	$\sigma_{e, max}$, кПа	<u>142,49</u>	<u>-29,42</u>	<u>8,39</u>	
	0,769	-0,019	0,107		208,91	66,15	-25,46	
4 8	$P_{кпп}$, кН	<u>12,33</u>	<u>-0,138</u>	<u>2,08</u>	h_0 , м	<u>0,090</u>	<u>0,014</u>	<u>-0,030</u>
		13,95	-0,080	1,92		0,054	0,006	-0,024
	P_f , кН	<u>4,99</u>	<u>0,215</u>	<u>-1,44</u>	$\Delta\rho_a(h_0)$, г/см ³	<u>0,081</u>	<u>-0,052</u>	<u>-0,007</u>
		3,63	0,320	-1,60		0,064	-0,034	-0,008
f_k	<u>0,144</u>	<u>0,020</u>	<u>-0,052</u>	$\rho_{1a}(0,05)$, г/см ³	<u>1,867</u>	<u>0,068</u>	<u>-0,141</u>	
	0,096	0,010	-0,040		1,935	0,065	-0,146	
η_f	<u>0,687</u>	<u>-0,035</u>	<u>0,115</u>	$\sigma_{e, max}$, кПа	<u>198,17</u>	<u>-24,34</u>	<u>-11,93</u>	
	0,788	-0,020	0,091		215,15	-27,78	-13,56	

По уравнениям регрессии вида (25), коэффициенты которых приведены в табл. 4, нами определены показатели тяговых свойств, сопротивления движению и уплотняющего воздействия на почву трактора во всех 8 сериях опытов. Результаты выполненных расчетов позволили выявить влияние $\lambda_{1,0}$ и v_0 на эти показатели.

Кроме того исследовано влияние на показатели тяговых свойств, сопротивления движению и уплотняющего воздействия трактора на почву характеристик почвенных условий и варьируемых параметров ходовой системы трактора. Для выявления этого влияния проведено сопоставление между собой соответствующих показателей, найденных по уравнениям регрессии, полученным для различных серий опытов.

Сравнили результаты в следующих вариантах работы тракторного агрегата: *a* — на рыхлой почве (фон 1) и на более плотной почве (фон 2); *б* — по схемам «следы различны» и «след в след»; *в* — с выключенным передним мостом (по схеме 4×2) и с включенным передним мостом (по схеме 4×4).

В варианте *a* между собой сопоставлены исследуемые показатели, найденные по уравнениям регрессии, соответствующим результатам следующих пар серий опытов: 1-й и 3-й, 2-й и 6-й, 3-й и 7-й, 4-й и 8-й. Сравнение показало, что на более плотной почве тяговые свойства трактора выше, сопротивление движению ниже и уплотнение почвы меньше, чем на более рыхлой. На фоне 2 по сравнению с фоном 1 расчетное значение силы тяги на крюке трактора $P_{крп}$ больше в 1,1–6,7 раза, показатели P_r , h_0 , $\Delta\rho_n(h_0)$ меньше соответственно на 27,2–51,8%, 40–57% и 35–46,2%. При этом максимальные и средние контактные напряжения на фоне 2 больше, чем на фоне 1, соответственно на 33,5–40,7% и на 16,5–23,2%. С увеличением начальной плотности почвы $\sigma_{n, \max}$ возрастает (при прочих равных условиях), а приращение плотности почвы убывает. Более высоким максимальным контактным напряжениям при большей начальной плотности почвы соответствует ее меньшее уплотнение. Таким образом, в данной работе, как и в работе [16], подтверждено, что на более плотной почве при большем максимальном давлении движителей на почву их уплотняющее воздействие меньше. Однозначного соответствия между максимальным давлением движителя на почву и его уплотняющим воздействием на почву нет. Использование в качестве нормируемых показателей только максимального давления q_k колесного движителя на почву, равного максимальному контактному напряжению, и нормального напряжения σ в почве на глубине 0,5 м, как это принято в ГОСТ 26953-86, не позволяет однозначно и полно выявить влияние проходов машин по почве на изменение ее агрофизических свойств. В качестве оценочного показателя уплотняющего воздействия движителей машин на почву надо использовать показатели: приращение плотности почвы на различной глубине после прохода машины; остаточную глубину колен; глубину распространения деформации сжатия почвы.

Расчеты по найденным уравнениям регрессии показали, что при увеличении динамического коэффициента λ_{10} нагрузки передней оси трактора от 0,2 до 0,4 при $v_0 = 4$ м/с величины $P_{крп}$ и η_{xc} уменьшаются соответственно на 0,2–48% и 4,1–48,5%. Для опытов 1-й серии при таком изменении λ_{10} сила тяги на крюке $P_{крп}$ уменьшается от 11,12 до 5,79 кН, т.е. на 48%, η_{xc} уменьшается от 0,99 до 0,495, т.е. примерно на 50%. В 5-й серии опытов соответственно $P_{крп}$ уменьшается от 11,85 до 7,52 кН, т.е. на 36,5%, а η_{xc} — от 0,988 до 0,696, т.е. на 30,3%.

Сила сопротивления движению трактора P_f при $v_0 = 4$ м/с с ростом λ_{10} от 0,2 до 0,4 увеличивается на 6,4–93,2%. Для опытов 1-й серии это увеличение λ_{10} приводит к росту P_f от 2,37 до 4,58 кН, т.е. на 93,2%, а для опытов 5-й серии — к росту P_f от 1,45 до 2,72 кН, т.е. на 87,6%.

Изменение λ_{10} приводит также к изменению показателей уплотняющего воздействия трактора на почву. С ростом λ_{10} уплотнение почвы передними колесами возрастает, а задними — снижается. Во 2-й, 4-й, 6-й и 8-й сериях опытов рассматривали движение колес трактора по схеме «след в след». Для опытов этих серий получено, что с ростом λ_{10} уплотняющее воздействие трактора на почву возрастает. При скорости $v_0 = 2,5$ м/с с увеличением λ_{10} от 0,2 до 0,4 величины h_0 и $\Delta\rho_a(h_0)$ возрастают соответственно на 11,1–23,8% и 2,9–8,3%. По данным опытов 6-й серии пашни, что указанное увеличение λ_{10} приводит к росту h_0 от 0,0504 до 0,0624 см, т.е. на 23,8% и к росту $\Delta\rho_a(h_0)$ от 1,838 до 2,9 г/см³, т.е. на 2,9%; при этом $\sigma_{a, \max}$ снижаются от 244,5 до 210,8 МПа, т.е. на 16%.

В 1-й, 3-й, 5-й и 7-й сериях опытов рассматривали движение колес трактора по схеме «следы различны». На рис. 2 представлены зависимости h_0 и $\Delta\rho_a(h_0)$ от λ_{10} для переднего и заднего колес трактора, соответствующие $v_0 = 2,5$ м/с. Из рисунка видно, что при расстановке передних и задних колес на различную колею трактор оказывает наименьшее уплотняющее воздействие на почву в том случае, когда приращения плотности почвы после проходов переднего и заднего колес равны, т.е. при $\Delta\rho_a(h_{01}) = \Delta\rho_a(h_{02})$. Соответствующее значение коэффициента λ_{10} можно считать оптимальным. Пусть приращения плотности почвы после проходов переднего и заднего колес описываются уравнениями регрессии:

$$\begin{aligned} \Delta\rho_a(h_{01}) &= a_{01} + a_{11}\lambda_{10}, \\ \Delta\rho_a(h_{02}) &= a_{02} + a_{12}\lambda_{10}, \end{aligned} \quad (26)$$

где a_{01} , a_{11} , a_{02} , a_{12} — коэффициенты.

Принимая $\Delta\rho_a(h_{01}) = \Delta\rho_a(h_{02})$, найдем оптимальное значение λ_{10} по формуле

$$\lambda_{10} = (a_{02} - a_{01}) / (a_{11} - a_{12}) \quad (27)$$

По результатам опытов 1-й серии с использованием уравнений регрессии и формулы (27) получено, что оптимальное значение динамического коэффициента нагрузки передней оси $\lambda_{10, \text{опт}} = 0,296 \approx 0,3$.

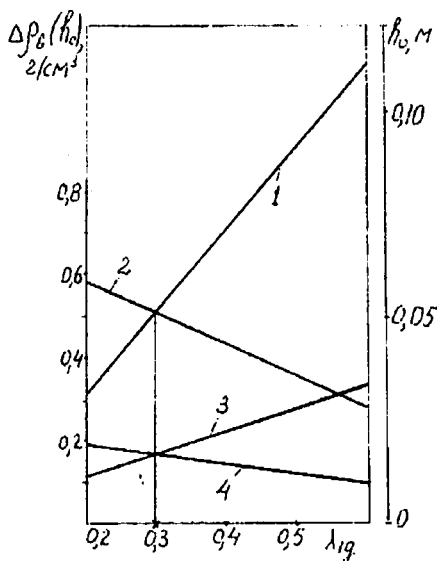


Рис. 2. Зависимости приращения плотности и остаточной осадки почвы от динамического коэффициента λ_{10} нагрузки его передней оси.

1 и 2 — зависимости от λ_{10} соответственно h_{01} — остаточной осадки почвы после прохода переднего колеса и h_{02} — остаточной осадки почвы после прохода заднего колеса. 3 и 4 зависимости от λ_{10} соответственно $\Delta\rho(h_{01})$ — приращения на глубине h_{01} плотности почвы после прохода переднего колеса и $\Delta\rho(h_{02})$ — приращения на глубине h_{02} плотности почвы после прохода заднего колеса.

(Результаты 1-й серии опытов; $v_0 = 2,5$ м/с).

Соответствующее значение статического коэффициента нагрузки передней оси $\lambda_{10.ст} \approx 0,35$.

В варианте б сопоставлены между собой исследуемые показатели, определенные по уравнениям регрессии пар серий опытов: 1-й и 2-й, 3-й и 4-й, 5-й и 6-й, 7-й и 8-й. Сравнение показало, что при работе по схеме «след в след» тяговые свойства трактора выше, чем по схеме «следы различны». В то же время сопротивление движению и уплотняющее воздействие трактора на почву в первом случае также больше, чем во втором. В опытах 2, 4, 6 и 8-й серий («след в след») по сравнению с опытами 1, 3, 5 и 7-й серий («следы различны») $P_{кпп}$ больше на 3,8–13,2%, P_f меньше на 7,5–16,1%, а h_0 и $\Delta\rho_g(h_0)$ больше соответственно на 38,05–49,2% и 4,9–6,0%.

Таким образом, выполненные нами расчеты подтвердили, что для снижения уплотняющего воздействия трактора на почву при его работе в составе МТА передние и задние колеса трактора должны быть расставлены на различную колею. Однако при расстановке колес трактора на различную колею его тяговые свойства снижаются.

В варианте в сопоставлены друг с другом соответствующие показатели, определенные по уравнениям регрессии, полученным по результатам следующих пар серий опытов: 1-й и 3-й, 2-й и 4-й, 5-й и 7-й, 6-й и 8-й. Сравнение показало, что у трактора с колесной формулой 4×4 тяговые свойства выше, а сопротивление движению и уплотнение почвы ниже, чем у трактора с колесной формулой 4×2. В 3, 4, 7 и 8-й сериях опытов (с включенным передним мостом) по сравнению с опытами 1, 2, 5 и 6-й серий, $P_{кпп}$ больше в 2,4–5,6 раза, показатели P_f , h_0 , $\Delta\rho_g(h_0)$ меньше соответственно на 19,8–37,7%, 20,0–25,0%, 2,4–7,6%.

Таким образом, использование тракторов с 4 ведущими колесами более целесообразно, чем с 2. Передние колеса трактора выгоднее использовать для работы в ведущем режиме, чем в ведомом. Этот результат соответствует результату, полученному в работе [17].

Наше исследование влияния скорости МТА на показатели взаимодействия с почвой трактора показало, что повышение скорости МТА в интервале от 1 до 4 м/с приводит во всех сериях опытов к улучшению средних значений показателей взаимодействия движителей трактора с почвой (без учета влияния колебаний трактора, которое при этих скоростях невелико). На рис. 3 представлены графики, характеризующие изменение с ростом скорости показателей тяговых свойств, сопротивления движению и уплотняющего воздействия трактора на почву. Графики соответствуют уравнениям регрессии, коэффициенты которых приведены в табл. 4 для 1-й и 5-й серий опытов. С ростом v_0 величины $P_{крр}$ и η_{xc} возрастают, а сопротивление движению падает; также улучшаются показатели уплотняющего воздействия трактора

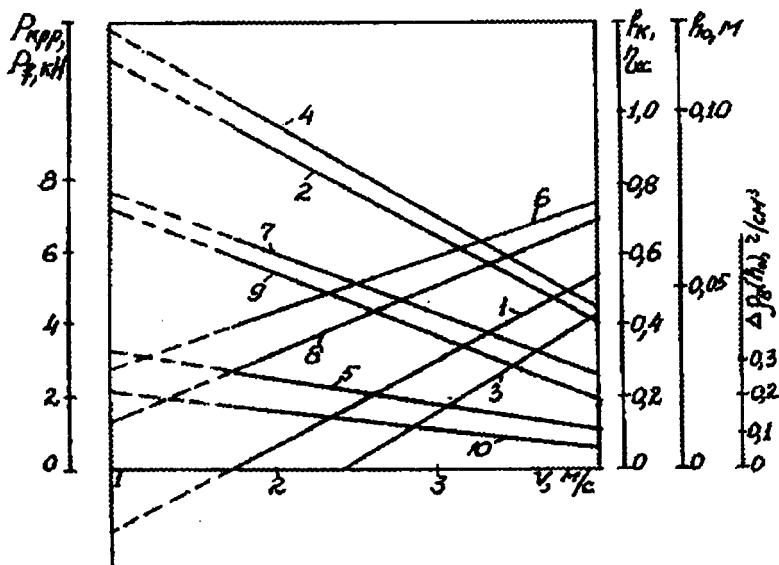


Рис. 3. Зависимости показателей тяговых свойств, сопротивления движению и уплотняющего воздействия трактора на почву от скорости v_0 трактора.

1, 2, 3, 4, 5 — зависимости от v_0 соответственно $P_{крр}$ — расчетного значения силы тяги на крюке трактора, P_f — сопротивление движению трактора, η_{xc} — максимально возможного КПД ходовой системы трактора, h_0 — остаточной осадки почвы после прохода трактора, $\Delta\rho(h_0)$ — приращения плотности почвы на глубине h_0 после прохода трактора в 1-й серии опытов. 6, 7, 8, 9, 10 — зависимости от v соответственно $P_{крр}$, P_f , η_{xc} , h_0 , $\Delta\rho(h_0)$ в 5-й серии опытов. ($\lambda_{10} = 0,4$).

на почву: остаточная осадка почвы и приращение плотности почвы после прохода трактора снижаются. При $\lambda_{10} = 0,4$ с увеличением скорости от 2,5 до 4 м/с для 3-й серии опытов $P_{крп}$ и η_f возрастают соответственно на 27,9 и 32,6%, сила сопротивления движению P_f уменьшается на 32,9%. При этом h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$ и $\rho_{10}(0,05)$ снижаются соответственно на 28,4 и 28,3%; максимальные контактные напряжения $\sigma_{s, \max}$ возрастают при этом на 3,96%. Для опытов 8-й серии (плотная почва, «след в след», включен передний мост) при $\lambda_{10} = 0,4$ с увеличением v_0 от 2,5 до 4 м/с величины $P_{крп}$ и η_f возрастают соответственно на 13,8 и 11,6%, сила сопротивления движению P_f снижается на 44,1%. При этом h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$ и $\rho_{s1}(h_0)$ снижаются соответственно на 44,4, 12,5 и 7,6%; $\sigma_{s, \max}$ уменьшается на 6,02%. На рыхлой почве изменение скорости оказывает большее влияние на исследуемые показатели, чем на более плотной. Изменение скорости сильнее влияет на эти показатели у трактора с 2 ведущими колесами, чем с 4, а также больше влияет на эти показатели при работе по схеме «следы различны», чем по схеме «след в след».

Таким образом, предложенные в работе методы расчета уплотняющего воздействия на почву и тяговых свойств колесных тракторов и другой мобильной колесной сельскохозяйственной техники позволяют эффективно оценивать показатели взаимодействия движителей этой техники с почвой и разрабатывать рекомендации по улучшению этих показателей в различных условиях эксплуатации машин. Проведенные с использованием разработанных нами программ для ЭВМ полные 4-факторные машинные эксперименты позволили выявить, что основное влияние на показатели тяговых свойств и уплотняющее воздействие трактора на почву оказывают распределение вертикальной динамической нагрузки по осям трактора и скорость МТА. Получены уравнения регрессии для определения исследуемых показателей в зависимости от динамического коэффициента нагрузки передней оси трактора и скорости. На основе использования этих уравнений подтверждено, что снижению уплотнения почвы при проходах трактора способствует расстановка его колес на различную колею и использование тракторов с колесной формулой 4×4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.—
2. Демидович Б.П., Марон Н.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М.: Наука, 1967. — 3. Золотаревская Д.И. Исследование и расчет уплотнения почвы колесными движителями. — Механизация и электрификация сельск. хоз-ва, 1982. № 2. — 4. Золотаревская Д.И. Расчет уплотнения почвы колесными тракторами. — Тракторы и с.-х. машины, 1990, № 6. — 5. Золотаревская Д.И. Влияние вязкоупругих свойств почвы и сил трения на тяговые свойства и уплотняющее воздействие на почву колесных тракторов. — Тракторы и с.-х. машины, 1991,

№ 3. — 6. *Золотаревская Д.П., Бурдыкин В.П., Матвеев В.В. и др.* Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора. — Изв. ТСХА, 1989, вып. 1, с. 175—183. — 7. *Золотаревская Д.П.* Характеристики вязкоупругих и упругих свойств эластичных колес. — Изв. ТСХА, 1989, вып. 2, с. 142—151. — 8. *Золотаревская Д.П.* Закономерности деформирования почв и их математическое моделирование. — Почвоведение, 1998, № 1. — 9. *Золотаревская Д.П.* Контактные напряжения и деформации шин при качении эластичных колес. — Тракторы и с.-х. машины, 1989, № 5. — 10. *Кармановский Л.П.* Некоторые обоснования пропашного трактора будущего. — Техника в сельск. хоз-ве, 1998, № 1. — 11. *Кушанов А.С.* Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву. Автореф. докт. дис. Челябинск, 1981. — 12. *Ксенович П.П., Скотников В.А., Ляско М.П.* Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат, 1985. — 13. *Кольский Г.* Волны напряжения в твердых телах. М.: ИИЛ, 1955. — 14. *Маслов В.А.* Снижение уплотняющего воздействия на почву при работе трактора типа «Кировец» на возделывании зерновых культур. Автореф. канд. дис. Рязань, Рязанский СХИ, 1987. — 15. *Полетаев А.Ф.* Тяговые свойства колесных тракторов различных конструктивных схем. — Сб.: Вопросы надежности, долговечности и тяговых качеств трактора. М.: 1985. — 16. *Хабатов Р.Ш., Золотаревская Д.П., Матвеев В.В. и др.* Закономерности деформирования тракторных колес с пневматическими шинами. — Изв. ТСХА, 1987, вып. 3, с. 173—180. — 17. *Цукуров А.М.* Методика расчета эксплуатационной массы трактора по ограничению воздействия на почву. — Тракторы и с.-х. машины, 1998, № 2.

Статья поступила 29 октября 1999 г.

SUMMARY

Indicators of interaction of a tractor of MTZ-82 working as a compound in MTA with soddy-podzolic light-textured loamy soil have been determined on the basis of using methods of calculating draught properties of wheel tractors, resistance to movement and packing effect of wheel agricultural machinery on the soil. These methods of calculation were proposed by the author, and calculations were made on computers according to developed programs. Calculations have been made for such cases when tractors worked on 2 soil backgrounds, with different operational characteristics and different speeds.

According to developed computer programs full factor machine experiments of 2⁴ type were conducted to find dependence of indicators examined on dynamic coefficient of front axis load, air pressure in tyres of front and back wheels and tractor speed. According to the results of full factor experiments, regression equations have been found which allowed to estimate the effect of varied factors on indicators of draught properties, resistance to movement and packing effect of a tractor of soil imder, different conditions of operation and to give recommendations for improving these indicators.