
МЕХАНИЗАЦИЯ С.-Х. ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 2, 1991 год

УДК 631.372:631.431.73:519.688

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВЫХ СИСТЕМ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ НА УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ И ТЯГОВЫЕ СВОЙСТВА

Д. И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ

(Кафедра высшей математики)

Предлагаются методы расчета тяговых свойств колесных тракторов и их уплотняющего воздействия на почву. Разработаны методики определения показателей уплотняющего воздействия на почву и тяговых свойств тракторов с практически упругими эластичными колесами.

Создание тракторов и комплектование машинно-тракторных агрегатов, оказывающих при высокой производительности допустимое уплотняющее воздействие на почву, представляет собой важнейшую проблему, решение которой должно способствовать сохранению и воспроизводству плодородия почв, а соответственно и обеспечению страны продовольствием. Для разработки рекомендаций по улучшению тяговых свойств тракторов при выполнении полевых работ и предотвращению переуплотнения почв их движителями необходимо, помимо проведения экспериментальных исследований, создать и широко использовать научно обоснованные расчетные методы определения показателей взаимодействия движителей с почвой, учитывающие закономерности деформирования различных почв и эластичных колес. Применение этих методов

позволит в короткие сроки выявить влияние различных факторов на исследуемые показатели и найти наилучшие варианты решения поставленных задач.

На основе исследования закономерностей деформирования во времени уплотняющихся почв и эластичных колес и процесса распространения затухающих волн деформаций и напряжений в почве при качении колес нами разработаны взаимосвязанные методы расчетного определения показателей уплотняющего воздействия колесных тракторов на почву и показателей их тяговых свойств.

Рассмотрены задачи о качении ведомого и ведущего эластичных колес с развитыми почвозацепами и без почвозацепов по уплотняющейся почве, расположенной слоем толщиной H на практически недеформирующейся почве.

Расчет уплотнения почвы колесами тракторов выполнен на основе работ [5, 6, 14]. В соответствии с результатами статистической обработки экспериментальных данных зависимость плотности ρ (г/см^3) деформирующегося слоя почвы до ее уплотнения колесами трактора от глубины y (м) принята в виде двух линейных участков

$$\rho(y) = \begin{cases} \rho_{01} + k_1 y & \text{при } 0 \leq y \leq H_1 \\ \rho_{02} + k_2 y & \text{при } H_1 < y \leq H_2 \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_{01} — плотность почвы на ее поверхности (при $y=0$), H_1 — толщина 1-го участка, k_1 и k_2 — угловые коэффициенты прямых соответственно на 1-м и 2-м участках, $\rho_{02} = \rho_{01} + (k_1 - k_2) H_1$.

Уплотняющиеся почвы и эластичные колеса обладают вязкоупругими свойствами. В частном случае эластичные колеса деформируются как практически упругие.

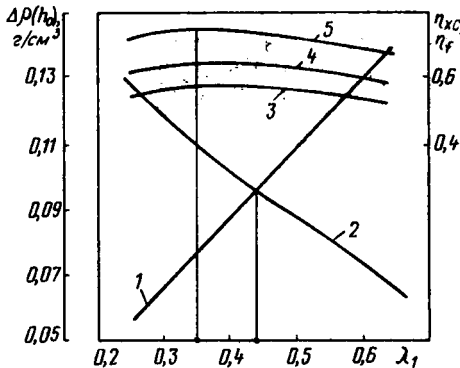


Рис. 3. Изменение КПД трактора и приращения плотности почвы $\Delta \rho$ (h_0) в зависимости от коэффициента λ_1 .

1, 2 — изменение $\Delta \rho$ (h_0) соответственно для переднего колеса с шиной 16,0—20 и заднего колеса с шиной 18,4R38; 3 — фактический КПД ходовой системы трактора (η_{xc}) $_{\phi}$ при $R_{кр} = 9,2$ кН, $\delta = 0,13$, $v_0 = 2,1$ м/с; 4 — максимально возможный КПД ходовой системы трактора (η_{xc}) $_{max}$ при $v_0 = 2,1$ м/с, $\delta = 0,13$; 5 — максимально возможный КПД трактора (η_f) $_{max}$, учитывающий силовые затраты на деформацию почвы при $v_0 = 2,1$ м/с, $\delta = 0,13$.

На рис.3 дана схема взаимодействия вязкоупругого (в частном случае упругого) ведущего эластичного колеса с уплотняющейся вязкоупругой почвой. Скорость оси колеса v_0 и его угловая скорость ω постоянны. Радиус эластичного колеса $R = \frac{D}{2}$ (D — наружный диаметр шины).

На колесо действуют приложенные к его оси вертикальная динамическая нагрузка G_0 и горизонтальная сила F , момент M и реакции почвы. Вертикальные и горизонтальные реакции почвы, распределенные по контактной поверхности, заменены равнодействующими вертикальной N и горизонтальной T . Для ведущего колеса $T > 0$ и $M > 0$ (см. рис. 3); для ведомого колеса $T < 0$.

Поверхность контакта колеса и почвы на рис.3 представлена линией контакта — кривой, проходящей через точки (В) входа колеса в контакт с почвой (А) и выхода из этого контакта и через расположенную на середине кривой АВ точку К, где радиальная деформация шины достигает максимального значения. Для колеса с почвозацепами линия контакта АКВ представляет на схеме условную поверхность контакта, проходящую через опорные поверхности почвозацепов. Длина линии контакта определяется по углам ϕ_b (угол набегания колеса) и ϕ_a (угол сбегания колеса), ($\phi_b > 0$, $\phi_a < 0$). Линия контакта аппроксимирована дугой окружности радиуса $R_{пр}$, проходя-

щей через точки А, К и В; $R_{пр}$ — приведенный радиус эластичного колеса. Соответственно этой аппроксимации длина контакта определяется по углам ψ_b и ψ_a ($\psi_a < 0$, $\psi_b > 0$).

Ширина профиля шины $V_{ш}$ достаточно большая, на основании этого деформация шины и почвы приближенно принята плоской. Однако, так как поверхность контакта колеса и почвы фактически отличается от цилиндрической, то напряжения в различных продольных сечениях отличаются от напряжений в центральном продольном сечении, что учтено путем использования в расчетах коэффициента формы k_ϕ .

Горизонтальные (u) и вертикальные (v) смещения почвы и шины на линии контакта являются функциями одного параметра — времени контакта t или соответствующего ему параметра $\psi = \psi_b - \omega_k t$ (ψ — текущий угол контакта, ω_k — угловая скорость условного жесткого колеса радиуса $R_{пр}$). Поэтому деформации сжатия почвы и шины и контактные напряжения представляют собой функции ψ .

На основании результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований [5, 6, 12] закономерность сжатия в вертикальном направлении вязкоупругой уплотняющейся почвы описана приближенно дифференциальным уравнением 1-го порядка

$$\frac{d\sigma_b}{dt} + p\sigma_b = q \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2)$$

где σ_b — вертикальные составляющие нормальных к поверхности контакта колеса и почвы напряжений σ ($\sigma_b = \sigma \cos \psi$), ε — относительная деформация сжатия почвы, p, q — характеристики вязкоупругих свойств почвы ($p = g\omega_k$, где g — безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы).

Закономерность сжатия в вертикальном направлении вязкоупругого эластичного колеса описана приближенно дифференциальным уравнением 2-го порядка [8]:

$$\frac{d^2\sigma_k}{dt^2} + p_1 \frac{d\sigma_k}{dt} = q_1 \frac{d^2h_k}{dt^2}, \quad (3)$$

где σ_k — вертикальные напряжения сжатия в шине, h_k — вертикальная деформация сжатия шины в различных точках линии контакта с почвой, p_1 и q_1 — характеристики вязкоупругих свойств эластичного колеса ($p_1 = g_1\omega_k$ где g_1 — безразмерный, не зависящий от ω_k параметр).

Экспериментальные исследования и выполненные расчеты показали, что тракторные колеса с пневматическими (соответствующими ГОСТ 7463—80) и перспективными шинами при качении деформируются как практически упругие при всех допустимых значениях G_0 и давления воздуха в шине p_n [8, 11]. Свойства этих эластичных колес описаны нами уравнением

$$\sigma_k = E_k h_k,$$

где E_k — коэффициент упругости эластичного колеса.

Деформация почвы катящимся колесом распространяется на глубину H_p .

$$\text{Поскольку } \varepsilon = \frac{R_{пр}}{H_p} (\cos \psi - \cos \psi_b),$$

общее решение уравнения (2) будет иметь следующий вид:

$$\sigma_b(\psi) = \frac{qR_{пр}}{H_p(g^2 + 1)} (Ce^{-g(\psi_b - \psi)} + \cos \psi + g \sin \psi), \quad (5)$$

где \bar{C} — произвольная постоянная. С учетом условий $\sigma_b(\psi_b) = 0$ и $\sigma_b(\psi_a) = 0$ после исключения $C = -(\cos \psi_b + g \sin \psi_b)$, получено уравнение, связывающее ψ_b и ψ_a :

$$e^{-g\psi_0} (\cos \psi_b + g \sin \psi_b) - \\ - e^{-g\psi_0} (\cos \psi_a + g \sin \psi_a) = 0. \quad (6)$$

В каждой точке линии контакта $\sigma_b = \sigma_k$. На основании этого найдено решение уравнения (3), выражающее $h_k(\psi)$, и физическое соотношение для определения радиальной e_m деформации вязкоупругого эластичного колеса в точке К при $\psi = \psi_k$:

$$e_{m\phi}(\psi_k) = \frac{qR_{np}}{q_1 H_r (g^2 + 1)} \left[(1 + \right. \\ \left. + gg_1) \cos^2 \frac{\psi_b + \psi_a}{2} + \frac{g - g_1}{2} \sin(\psi_b + \right. \\ \left. + \psi_a) - (\cos \psi_b + g \sin \psi_b) e^{-\frac{g(\psi_b - \psi_a)}{2}} \right] \times \\ \times \cos \frac{\psi_b + \psi_a}{2} \left(1 - \frac{g_1}{g} \right) - \frac{g_1 (g^2 + 1)}{g} \times \\ \times \cos \frac{\psi_b + \psi_a}{2} \left[\sin \frac{\psi_b + \psi_a}{2} \sin \frac{\psi_b - \psi_a}{2} + \right. \\ \left. + \cos \psi_b \right]. \quad (7)$$

Из (7) при $g_1 = 0$, $q_1 = K_k$ получаем выражение для определения $e_{m\phi}(\psi_k)$ упругого эластичного колеса.

Величина радиальной деформации e_m эластичного колеса при $\psi = \psi_k$ должна удовлетворять также геометрическому соотношению

$$e_{m\phi}(\psi_k) = R - R_{np} + R_{np} \cos \frac{\psi_b - \psi_a}{2} - \\ - \sqrt{R^2 - R_{np}^2 \sin^2 \frac{\psi_b - \psi_a}{2}}. \quad (8)$$

Из условий установившегося движения колеса следует, что

$$G_0 = 0,9k_\phi B_m R_{np} \int_{\psi_a}^{\psi_b} (1 \pm f \operatorname{tg} \psi) \sigma_b d\psi, \quad (9)$$

где f — коэффициент трения скольжения между шиной и почвой. Из двух знаков « \pm » в (9) и в нижеследующих выражениях верхние знаки соответствуют значениям буксования колес $\delta > 0$, а ниж-

ние — $\delta < 0$ ($\delta = 1 - \frac{v_0}{\omega R}$).

Величина коэффициента k_ϕ зависит в основном от плотности почвы, увеличиваясь с ее уменьшением, изменяется в интервале 0,62...0,86. При $q(0,05) \geq 1,2$ коэффициент $k_\phi \approx 0,62$, где $q(y)$ — масса единицы объема абсолютно сухой почвы.

Рассмотрено деформированное состояние почвы на различной глубине y в вертикальной плоскости Q, проходящей через середину ширины профиля шины. Горизонтальные u и вертикальные v смещения почвы являются функциями y и времени t (в пределах области, ограниченной горизонтальной проекцией дуги контакта АКВ). Вертикальные смещения вызывают распространение волны сжатия, а горизонтальные — волны сдвига. Изменение плотности почвы обусловлено ее вертикальными смещениями.

На основании использования определяющего уравнения (2) получено дифференциальное уравнение с частными производными 4-го порядка с двумя независимыми переменными y и t и переменными коэффициентами, описывающее распространение волны сжатия в вязкоупругой почве, плотность которой линейно связана с глубиной [5]. Математическая модель задачи по определению вертикальных смещений почвы представлена в виде двух последовательных задач определения $v(y, t)$: I — при

$t \in [0, t_1]$ и Π — при $t \in [t_1, \infty]$, $t_1 = (\psi_b + |\psi_a|)/\omega_k$ — время контакта колеса и почвы.

В результате решения задачи о деформировании почвы катящимся колесом получено, что смещения $v(y, t)$ приближенно равны

$$v(y, t) = \frac{h_0(H_p - y)}{H_p} + \sum_{k=1}^n C_k(t) \sin \frac{\pi k}{H_p} y, \quad (10)$$

где n — число точек, которыми производится деление отрезка $[0, H_p]$ при отыскании приближенного решения методом коллокации. При $t \rightarrow \infty$ $v(y, t) \rightarrow v_c(t)$, $C_k(t) \rightarrow C_k$, где $V_c(y)$ — стабилизированные смещения почвы, C_k — постоянные коэффициенты.

При $H_p = H$ и в ряде других случаев $C_k \approx 0$. Тогда приращение плотности почвы на глубине $y + v_c(y)$ приближенно равно

$$\Delta \rho(y + V_c(y)) = \frac{(2\rho_{01} + k_1 h_0) h_0}{(H_p + \mu h_0)^2} (H_p - y), \quad (11)$$

где μ — коэффициент поперечного расширения почвы, $h_0 = R_{np} (\cos \psi_a - \cos \psi_b)$ — остаточная после прохода колеса.

Для определения показателей уплотняющего воздействия на почву и тяговых свойств колеса необходимо найти величины ψ_b , ψ_a , R_{np} , H_p из системы нелинейных уравнений с 4 неизвестными, которая включает в себя уравнение (6) и уравнения, полученные из условий (9) и $v(H_{pr}(\psi_b + |\psi_a|)/\omega_k) = 0$, $e_{тф}(\psi_k) - e_{тн}(\psi_k) = 0$; H_{pr} — расчетная глубина распространения деформации в почве. При составлении системы уравнений при-

нято, что область распространения деформации в почве не ограничена снизу, т. е. $H_p < H$.

Если найденная при решении указанной системы уравнений расчетная глубина распространения деформации в почве $H_{pr} \leq H$, то фактическая глубина распространения деформации $H_p = H_{pr}$. Если же $H_{pr} > H$ или система уравнений будет несовместна в заданных областях изменения неизвестных, то область распространения деформации почвы ограничена снизу величиной H и $H_p = H$. В этом случае неизвестные ψ_b , ψ_a и R_{np} находятся как единственное решение совместной системы 3 нелинейных уравнений.

Плотность почвы после прохода колеса характеризуется при $C_k = 0$ зависимостью вида (1).

У колеса с почвозацепами касательные составляющие контактного напряжения, возникающего на опорных поверхностях почвозацепов под действием приложенного к оси колеса ведущего или тормозного моментов, равны $\tau_k = \sigma \operatorname{tg} \Phi \leq \sigma \operatorname{tg} \Theta$. В этом выражении Φ (ψ) $\leq \Theta$ — переменные значения угла трения покоя между шиной и почвой; $\operatorname{tg} \Theta = f$, где Θ и f — соответственно угол и коэффициент трения скольжения между шиной и почвой.

На основе работ [4, 10, 13] нами принято, что вследствие действия сил трения между вязкоупругой или упругой шиной и вязкоупругой почвой на поверхности контакта колеса и почвы образуются зоны сцепления и буксования или скольжения. Используя граничные условия в плоских контактных задачах [3] и принимая во внимание перемещение частиц почвы, расположенных на контактной поверхности, в направлениях векторов нагрузки при отсутствии

проскальзывания почвы относительно катящегося колеса [1], мы получили формулы для определения углов, характеризующих размеры и расположение зон вдоль линии контакта. Расчеты показали, что при реальных значениях f и буксования δ на поверхности контакта колеса и почвы бывает от 1 до 3 зон: 2 зоны сцепления и расположенная между ними у ведущих колес зона буксования, а у ведомых — зона скольжения.

Между почвозацепами по касательным к условной линии контакта, аппроксимированной дугой окружности радиуса R_{np} , действуют напряжения $\tau_k \leq c_0 + \sigma \operatorname{tg} \Theta_{rp}$, где c_0 — сцепление почвы, $\operatorname{tg} \Theta_{rp} = f_{rp}$, Θ_{rp} и f — соответственно угол и коэффициент внутреннего трения почвы. Предельное сопротивление почвы сдвигу $\tau_{cp} = c_0 + f_{rp} \sigma$. В области контакта при $\tau_k = \tau_{cp}$ происходит срез почвы почвозацепами. Из условия $\tau_k = \tau_{cp}$ найдено уравнение, позволяющее определить границы области этого среза: они могут быть как в зонах сцепления, так и в зонах скольжения (буксования).

Получены приближенные формулы для определения равнодействующих \bar{T}_b , $\bar{T}_{ск}$, $\bar{T}_{сц}$ и \bar{T}_b , $T_{ск}$, $T_{сц}$ элементарных горизонтальных реакций почвы на колесо в зонах буксования, скольжения и сцепления, принадлежащих соответственно областям среза почвы (первые 3 характеристики) и без среза почвы (вторые 3 характеристики) почвозацепами. Формулы для определения \bar{T}_b и $\bar{T}_{ск}$ найдены в результате интегрирования и других преобразований в зависимостях

$$T_{b,ск} \approx \frac{0,9k_{\Phi} B_{ш} R_{np} q}{(g^2 + 1) H_p} \left\{ v \int_{\psi_3}^{\psi_4} (\pm f - \operatorname{tg} \psi) \times \right. \\ \left. \times [\cos \psi + g \sin \psi - (\cos \psi_b + \right.$$

$$\left. + g \sin \psi_b) e^{-g(\psi_0 - \psi)} \right\} d\psi + \\ + (1 - v) \int_{\psi_3}^{\psi_4} (\pm f_{rp} - \operatorname{tg} \psi) [\cos \psi + \\ + g \sin \psi - (\cos \psi_b + g \sin \psi_b) \times \\ \times e^{-g(\psi_0 - \psi)}] d\psi + c_0 (\sin \psi_4 - \sin \psi_3) \Big\}, \quad (12)$$

где ψ_3 и ψ_4 — нижняя и верхняя границы зоны буксования (скольжения) в области контакта (при $\psi \in [\psi_a, \psi_b]$), v — коэффициент насыщенности рисунка протектора шины.

Равнодействующая горизонтальная реакция почвы на колесо находится как сумма горизонтальных реакций T_j во всех зонах контактной поверхности

$$T = \sum_{j=1}^m T_j \quad (13)$$

где m — число зон.

У ведущего колеса на участке набегания в зоне буксования она направлена в сторону движения его оси (положительна), а в зоне сцепления — в противоположную сторону (отрицательна). Горизонтальная реакция почвы на ведущее колесо положительна, на ведомое — отрицательна.

Получены также приближенные формулы для определения приложенного к колесу момента M , силы S и момента сопротивления качению колеса.

На основе теоретического исследования взаимодействия колесных движителей с почвой разработаны методики расчета тяговых свойств и уплотняющего воздействия колесных тракторов на почву, а для их реализации, в свою очередь — программы решения задач на ЭВМ. Взаимодействие с почвой передних и задних колес трактора рассматривается последовательно.

Исходными для расчета математических ожиданий показателей уплотняющего воздействия на почву, сопротивления качению ведомого или ведущего i -го колеса ($i=1$ для переднего и $i=2$ для заднего колеса), а также тяговых свойств ведущего колеса рассчитывали используя математическое ожидание вертикальной динамической нагрузки на ось колеса $m(G_{oi})$, величины R_i , $V_{ши}$, $E_{ки}$, v_i , v_0 , δ_i , ρ_{01} , k_1 , ρ_{02} , k_2 , H_1 , H , μ , f , $f_{гр}$, c_0 , k_f , влажность почвы w , коэффициенты корреляционных зависимостей характеристик g и q вязкоупругих свойств почвы заданного механического состава от ее плотности, влажности и ω_k . Ставится задача выявить расчетным путем возможность выполнения заданного вида полевых работ трактором в агрегате с заданной сельскохозяйственной машиной или прицепом (при заданном значении необходимой силы тяги на крюке трактора $P_{кр}$) на почве с известными физико-механическими свойствами и, при положительном результате, определить показатели работы трактора в этих условиях. В частном случае рассматривается холостой ход трактора.

Определяются для передних и задних колес R_{pri} , H_{pi} , ψ_{bi} , ψ_{ai} , h_{oi} , $\rho(y)$, силы S_i , T_i , моменты M_i и другие величины, а по характеристикам взаимодействия с почвой передних и задних колес находятся показатели работы трактора: расчетное значение силы тяги на крюке $(P_{кр})_p = 2(T_1 + T_2)$, КПД ходовой системы $\eta_{хс}$, мощность $N_{кр}$ и т. д. Если $(P_{кр})_p > P_{кр}$, то трактор может работать с меньшим буксованием, чем было задано в расчетах. Трактор не переуплотняет почву, если $\rho < \rho_{доп}$, где $\rho_{доп}$ — допустимая по агротехническим требованиям плотность почвы.

По разработанной методике выполнены расчеты, результаты которых сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в работе [6]. Среднее значение отклонения $\Delta = (P_{кр})_p - P_{кр}$ равно 0,09 кН, стандарт этого отклонения $\sigma(\Delta) = 0,35$ кН. Среднее значение относительного отклонения

$$\delta = \left| \frac{Q_p - Q_s}{Q_s} \right| \cdot 100 \% \quad \text{составляет}$$

4,33 %, его стандарт $\sigma(\delta) = 4,34 \%$, где Q_p и Q_s — соответственно расчетные и экспериментальные значения плотности почвы на различной заданной глубине. Отклонения расчетных значений силы тяги на крюке и плотности почвы на различной глубине от соответствующих экспериментальных данных находятся в пределах точности последних.

По разработанным программам на ЭВМ выполнены расчеты, позволяющие выявить влияние некоторых параметров ходовых систем и режимов работы колесных тракторов на их тяговые свойства и уплотняющее воздействие на почву.

Исследовалось взаимодействие эластичных тракторных колес с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой, физико-механические характеристики которой были определены экспериментально [6]. Для расчетных показателей g и q (МПа) ее вязкоупругих свойств использованы полученные нами следующие уравнения регрессии:

$$g = 14,6547 - 6,7162Q_{вп} - 0,5781\omega_k + 0,0850w, \quad (14)$$

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

где $\rho_{вп}$ — плотность влажной почвы. Угловая скорость ω_k характеризует скорость деформирования почвы. Величины ρ и $\rho_{вп}$ связаны

зависимостью $\rho = \rho_{\text{вн}} / (1 + 0,01w)$. Уравнения (14) и (15) получены для $\rho = 1,138 \dots 1,579^2 / \text{см}^3$, $\omega_k = 0,93 \dots 5,01^1 / \text{с}$, $w = 16,26 \dots 25,54 \%$ и применимы в указанных интервалах их изменения. При использовании зависимостей (14) и (15) в более широких интервалах изменения влияющих факторов точность расчетов снижается.

Выявлено влияние буксования δ и сил трения скольжения между колесом и вязкоупругой почвой на тягово-сцепные свойства эластичных колес. Для тракторных колес с шинами 11,2-20 и 16,9R38 найдены величины S , T , M , КПД ведущего колеса η , энергетических затрат на качение A_k и другие. Коэффициенты δ и f варьировали в интервалах $\delta \in [-0,3; 0,2]$, $f \in [0,4; 0,6]$.

На рис. 2 представлены кривые, характеризующие изменение величин T , M и η колес с шинами 11,2-20 и 16,9R38 в зависимости от δ (%). С ростом δ (%) величины T и M возрастают до некоторых предельных значений. У колеса с шиной 16,9R38 при $\delta = -0,8$ качение происходит с притормаживанием. При $-0,8 \leq \delta < 1,6$ движение возможно только в результате одновременного действия крутящего момента и толкающей силы. При $\delta = 1,6$ возникает свободное качение колеса, тогда $T = 0$. При $\delta > 1,6$ колесо становится ведущим.

Наибольшие положительные значения величин T и M при $G_0 = \text{const}$ достигаются при $\delta = \delta_0$, когда вся контактная поверхность колеса становится зоной буксования. Дальнейшее увеличение δ

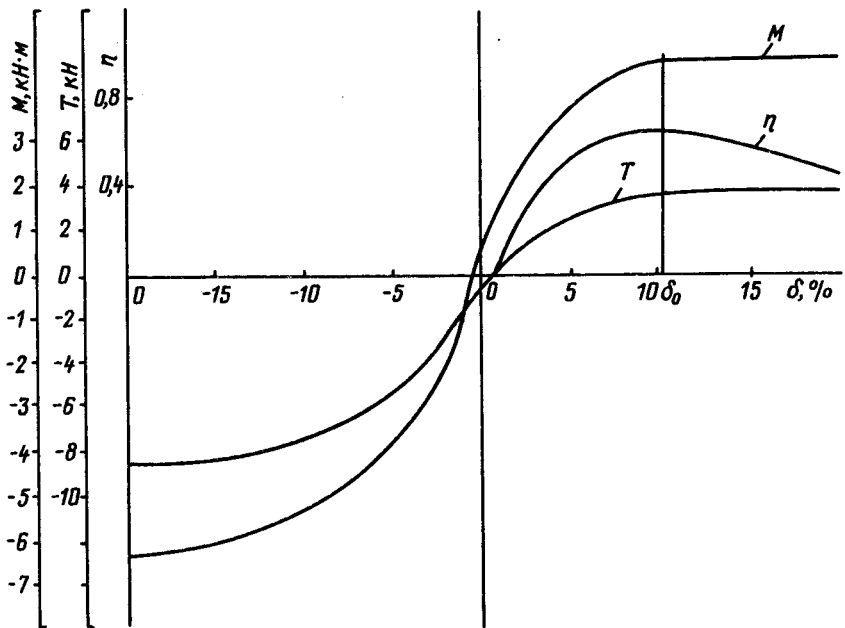
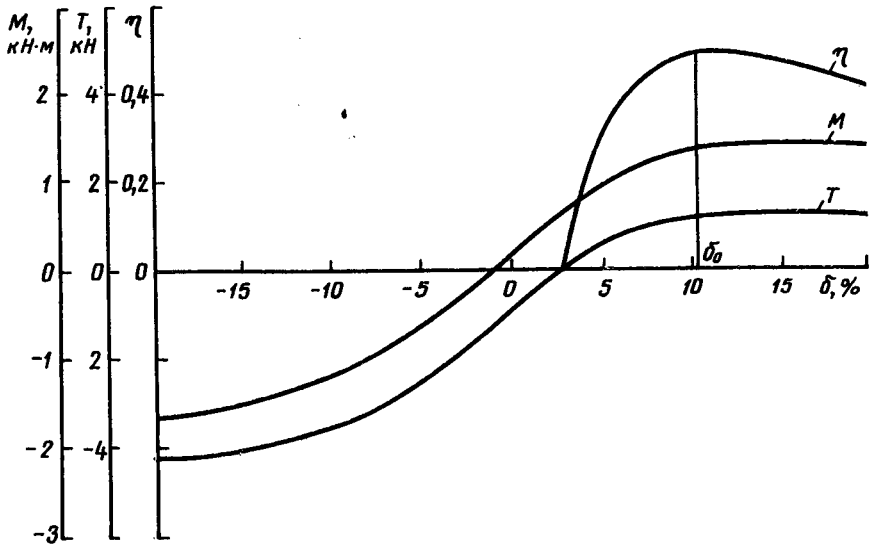
не приводит к изменению T и M (если не учитывать влияние углубления колес за счет выноса почвы из зоны контакта). Величина δ_0 зависит от коэффициента трения скольжения между шиной и почвой: она изменяется в интервале $7,2 \leq \delta_0 \leq 14,2$ при характерных для движения машин по сухой сушлистой почве значениях f ($0,4 \leq f \leq 0,6$).

Графики изменения КПД ведущих колес $\eta(\delta) = \frac{T(\delta)}{T(\delta) + S} (1 - \delta)$

представляют собой выпуклые кривые, имеющие максимум при $\delta = \delta_0$. Таким образом, увеличение буксования до того значения, при котором вся контактная поверхность колеса становится зоной буксования, способствует повышению тяговых свойств колеса т. е. чем больше f и $\delta \leq \delta_0$, тем лучше тяговые свойства.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показали, что работа трактора в ведущем режиме выгоднее, чем в ведомом, так как позволяет увеличить силу тяги на крюке трактора при равенстве энергетических затрат A_k на качение ведущего и ведомого колес. При качении ведомого колеса с притормаживанием величина A_k во многих случаях больше, чем при работе колеса в ведущем режиме. Результаты исследования влияния буксования колес на их тяговые свойства соответствуют полученным в работе [13] для случая качения жестких колес по ос-

Рис. 2. Изменение подводимого к колесу момента M , равнодействующей горизонтальной реакции почвы T , КПД колеса η в зависимости от буксования δ (%). $Q_{01} = 1,1383 \text{ г/см}^3$, $\kappa_1 = 1,7 \text{ г/см}^3 \cdot \text{м}$; $Q_{02} = 1,6268 \text{ г/см}^3$, $\kappa_2 = 0,1731 \text{ г/см}^3 \cdot \text{м}$; $H_1 = 0,32 \text{ м}$, $H_2 = 1 \text{ м}$, $w = 18,37 \%$; $f = 0,5$, $f_{2p} = 0,55$, $v_0 = 1,35 \text{ м/с}$. а — колесо с шиной 11,2-20 ($G_{01} = 6,08 \text{ кН}$, $p_{w1} = 1,7 \text{ МПа}$); б — колесо с шиной 16,9R38 ($G_{02} = 11,65 \text{ кН}$, $p_{w2} = 1,1 \text{ МПа}$).



нованию, деформации которого не зависят от времени и скорости воздействия нагрузки.

По разработанной программе на ЭВМ выполнен полный факторный машинный эксперимент типа 2^3 [2] для выявления влияния G_0 , p_w и v_0 на характеристики взаимодействия с почвой некоторых эластичных тракторных колес. Принималось, что $f=0,55$, $f_{гр}=0,392$, $c_0=4,652$ и $8,751$ кПа соответственно для рыхлой и для более плотной почвы, $\nu=0,318$, $\delta=0,13$. Нижние и верхние уровни варьирования факторов составляли соответственно 4 и 22 кН для G_0 , 100 и 180 кПа для p_w , 1 и 4,9 м/с для v_0 . В результате математической обработки полученных данных найдены корреляционные зависимости величин остаточной после прохода колеса осадки почвы h_0 , абсолютной величины плотности почвы $\rho_1(h_0)$ и ее приращения $\Delta\rho(h_0)$ на дне колеи после прохода колеса, максимального контактного напряжения σ_{\max} , силы S , коэффициента сопротивления качению колеса $f_{\text{кач}}$, равнодействующей горизонтальной реакции почвы на колесо T , максимальных значений коэффициентов сцепления колес φ_{\max} и КПД ведущего колеса η , которые могут быть реализованы по условиям взаимодействия с почвой, и других величин от G_0 , p_w , v_0 при качении колес по рыхлой ($\rho_{01}=1,14$ г/см³, $k_1=1,7$ г/см³·м) и по более плотной почве ($\rho_{01}=1,26$ г/см³, $k_1=1,6303$ г/см³·м) при $w=18,4$ %. Параметры уравнений регрессии найдены путем применения методики обработки данных полного факторного эксперимента.

В таблице приведены значения свободных членов и коэффициентов при переменных в уравнениях регрессии $f(x_1, x_2, x_3)=0$ с кодиро-

ванными x_1 , x_2 и x_3 значениями переменных для некоторых величин, характеризующих уплотняющее воздействие на почву и тяговые свойства колеса с шиной 16,9R38. Переход от кодированных к натуральным значениям x_j переменных x_j выполняется по формуле $x_j = x_{j0} + x_j$, где $j=1, 2, 3$, $J_j = |x_j - x_{j0}|$, x_{j0} — натуральное значение основного уровня фактора, равно отстоящее от нижнего и верхнего уровней соответствующей переменной. Через x_1 , x_2 и x_3 обозначены соответственно натуральные значения G_0 , p_w и v_0 .

Результаты расчетов и экспериментальные данные для $\Delta\rho(h_0)$, h_0 , $\rho_1(h_0)$, T , $f_{\text{кач}}$, φ_{\max} , η_{\max} и других величин хорошо согласуются между собой, расхождения находятся в пределах точности экспериментальных данных (5—9 %).

Из найденных уравнений регрессии следует, что значения h_0 , $\Delta\rho(h_0)$, $\rho_1(h_0)$, S , $f_{\text{кач}}$ увеличиваются при повышении G_0 и убывают с ростом v_0 . Реакции T возрастают при увеличении G_0 , v_0 и ρ_{01} и уменьшаются с ростом p_w . Величины φ_{\max} и η_{\max} при увеличении G_0 и p_w уменьшаются, а при увеличении ρ_{01} и v_0 возрастают. Величины σ_{\max} повышаются при увеличении всех этих факторов.

Характеристики взаимодействия колес и почвы в значительной мере зависят от ее начальной плотности. При увеличении начальной плотности на 10,5 % (с 1,14 до 1,26 г/см³) приращение плотности почвы $\Delta\rho(h_0)$ при качении колеса с шиной 16,9R38 уменьшается в среднем на 37,5 %, остаточная глубина колеи — на 44,8 %, сила сопротивления качению — на 40,4 %, а сила тяги F , равная T и передающаяся на ось колеса, максимальный КПД колеса η_{\max} и максимальные контактные напряжения

Корреляционные зависимости показателей уплотняющего воздействия на почву и тяговых свойств тракторного колеса от вертикальной нагрузки на ось колеса, давления воздуха в шине и скорости движения

Показатель	Шифр уравнения	Коэффициенты уравнений регрессии при:							
		1	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
$\Delta\rho(h_0)$, г/см ³	A	0,115	0,070	0,002	-0,040	0,002	-0,025		
	B	0,075	0,048	0,003	-0,026	0,003	-0,016	-0,001	-0,001
h_0 , см	A	4,999	3,301	0,085	-1,748	0,085	-1,070	-0,087	-0,087
	B	2,761	1,854	0,106	-1,006	0,104	-0,619	-0,041	-0,004
σ_{\max} кПа	A	138,32	69,19	1,92	10,54	1,92	6,92	1,57	1,57
	B	157,83	70,74	5,14	4,50	5,20	-0,82	3,86	3,81
F, кН	A	4,100	2,128	-0,108	0,778	-0,108	0,672	0,044	0,044
	B	5,143	2,841	-0,165	0,510	-0,169	0,510	-0,025	-0,025
$f_{\text{кач}}$	A	0,113	0,051	0,004	-0,038	0,004	-0,015	-0,002	-0,002
	B	0,068	0,030	0,004	-0,025	0,004	-0,011		
Φ_{\max}	A	0,501	-0,054	-0,001	0,008	-0,001	0,004		
	B	0,537	-0,076	-0,003	-0,002	-0,003	0,012	-0,014	-0,014
η_{\max}	A	0,661	-0,112	-0,008	0,008	-0,008	0,038	0,004	0,004
	B	0,750	-0,067	-0,009	0,004	-0,009	0,026		

Примечание. Уравнение получено для качения колеса по почве, имеющей $0 \leq y \leq 0,32$, $\rho(y) = 1,14 + 1,7y$ (A) и $\rho(y) = 1,26 + 1,63y$ (B).

σ_{\max} возрастают в среднем соответственно на 25,4, 12,8 и 14,1 %.

Установлено, что с повышением начальной плотности почвы влияние G_0 на h_0 , $\Delta\rho(h_0)$, $\rho_1(h_0)$, S, $f_{\text{кач}}$, η_{\max} уменьшается, а на Φ_{\max} , σ_{\max} , T возрастает. Кроме того, наблюдается возрастание влияния r_w и уменьшение влияния v_0 на все рассмотренные характеристики взаимодействия колеса и почвы, за исключением η_{\max} .

Основное влияние на уплотняющее воздействие на почву и тягово-сцепные свойства трактора, комплектованного шинами определенного типоразмера и работающего с заданной крутяковой нагрузкой, оказывают вертикальные динамические нагрузки на его оси. При их уменьшении на заднее коле-

со трактора с шиной 16,9R38 на 40,9 % (с 22 до 13 кН) приращение $\Delta\rho(h_0)$ плотности рыхлой ($\rho_{01} = 1,14$ г/см³) легкосуглинистой почвы и передающаяся на ось трактора сила тяги $F = T$ снижаются соответственно на 37,3 (с 0,246 до 0,153 г/см³) и 31,1 % (с 5,08 до 3,50 кН), а максимальный КПД ведущего колеса η_{\max} повышается на 28 % (от 0,5240 до 0,6709).

Для снижения уплотняющего воздействия тракторов на почву необходимо уменьшать их эксплуатационную массу до того предела, при котором обеспечивается работа трактора в составе МТА в заданных почвенных условиях и плотность почвы после его прохода не превышает $\rho_{\text{доп}}$.

Снижение давления воздуха в

шинах приводит к некоторому улучшению показателей работы ходовой системы трактора на уплотняющейся почве. Падение давления воздуха в шинах 16,9R38 задних колес на 44,4 % (со 180 до 100 кПа) обуславливает уменьшение приращения плотности рыхлой легкосуглинистой почвы в слое 0...0,1 м в среднем на 3,8 % и увеличение передающейся на ось трактора силы тяги и максимального КПД колеса соответственно на 13,6 и 12 % (при $G_0=22$ кН, $v_0=1$ м/с). На рыхлой почве снижение давления воздуха в шинах оказывает большее влияние на улучшение показателей работы ходовой системы трактора, чем на плотной.

Увеличение в определенных пределах скорости движения приводит к улучшению показателей работы трактора. При возрастании скорости с 1 до 2,45 м/с приращение плотности рыхлой почвы ($\rho_{01}=1,14$ г/см³) после прохода задних колес трактора МТЗ-142 с шинами 16,9R38 уменьшается в слое 0—0,1 м в среднем на 25 %, а осевая сила тяги колеса возрастает в среднем на 25 %. На рыхлой почве увеличение скорости оказывает большее влияние на улучшение средних значений показателей работы трактора, чем на плотной. В то же время увеличение скорости вызывает рост амплитуд колебаний этих показателей, в связи с чем увеличение скорости трактора должно быть ограничено.

Для снижения уплотняющего воздействия на почву и повышения тяговых свойств трактора необходимо найти оптимальное распределение вертикальных нагрузок по его осям. По разработанной программе на ЭВМ выполнены расчеты, в которых варьировал коэффициент $\lambda_1=G_1/(G_1+G_2)$ для трак-

торов МТЗ-142 и МТЗ-82, где G_1, G_2 — половины статических нагрузок соответственно на переднюю и заднюю оси трактора. Принималось, что на колесах поставлены шины 16,0—20 и 18,4R38, комплектация которыми обеспечивает наименьшее уплотнение почвы и наилучшие тяговые свойства машин этих типов. Рассматривалась работа тракторов в МТА на рыхлой почве ($\rho_{01}=1,14$ г/см³) с $v_0=2,1$ м/с, $\delta_1=\delta_2=0,13$, $P_{кр}=9,2$ кН к и различными следами передних и задних колес.

На рис. 1 приведены графики, характеризующие изменение КПД ходовой системы η_{xc} трактора типа МТЗ-82 и приращения плотности почвы $\Delta\rho(h_0)$ после прохода его передних и задних колес в зависимости от λ_1 . Максимум η_{xc} достигается при $\lambda_1=0,35$, а минимум $\Delta\rho(h_0)$ — при $\lambda_1=0,43$.

Точки максимума η_{xc} и минимума $\Delta\rho(h_0)$ близки друг к другу, в интервале между ними величины η_{xc} и $\Delta\rho(h_0)$ изменяются мало, поэтому можно рекомендовать $0,35 \leq \lambda_1 \leq 0,43$. При $P_{кр}=9,2$ кН этим значениям соответствуют $0,30 \leq (\lambda_1)_{дн} \leq 0,38$, где $(\lambda_1)_{дн}$ — коэффициент, определяющий долю динамической нагрузки, приходящейся на передние колеса. Для трактора типа МТЗ-142 $0,35 \leq (\lambda_1)_{дн} \leq 0,39$.

Анализ результатов выполненного исследования показывает, что для снижения уплотняющего воздействия тракторов на почву и повышения их тягово-цепных свойств необходимы, помимо указанных, следующие меры: использование шин с широким профилем, сдвигание колес с одновременным снижением давления воздуха в шинах, использование передних колес трактора, как и задних, для работы в ведущем режиме, повышение плавности хода трактора, умень-

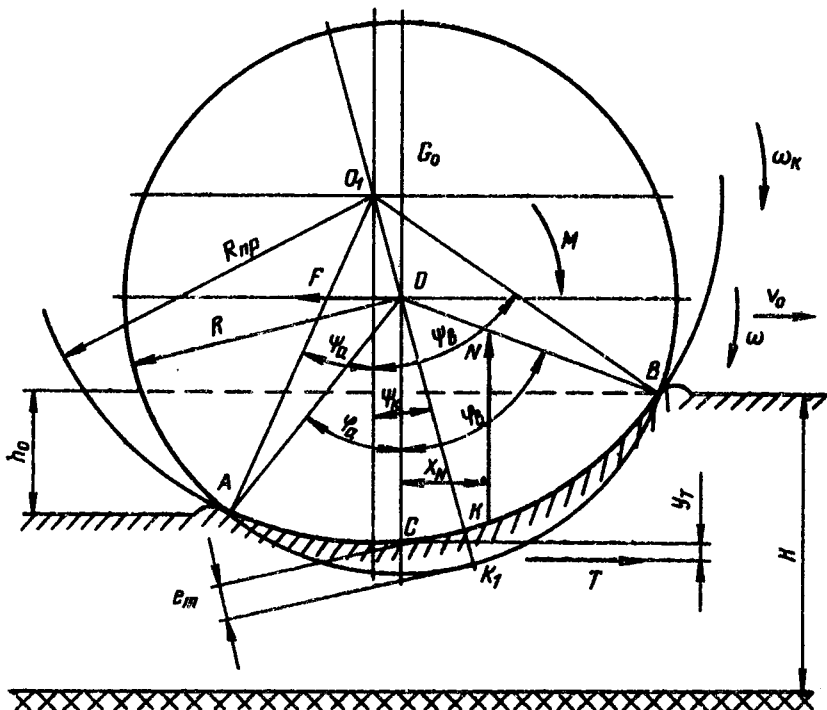


Рис. 3. Схема взаимодействия ведущего эластичного колеса с уплотняющейся вязкоупругой почвой.

шенне коэффициентов упругости шин путем улучшения их конструкции и использования более совершенных материалов покрышек. Оценка каждого из мероприятий по снижению уплотнения почвы тракторами и улучшению их тяговых свойств может быть выполнена на основании результатов расчетов по предлагаемым методикам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Я. С. Пройдяемость автомобилей.— М.: Машиностроение,

1981.— 2. Адлер Ю. П., Марков Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— М.: Наука, 1976.— 3. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости.— М.: Наука, 1980.— 4. Горячкин В. П. Земледельческая механика, ч. I.— Книгоиздательство студентов Петровской с.-х. академии, 1922.— 5. Золотаревская Д. И. Исследование и расчет уплотнения почвы колесными движителями.— Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1982, № 2, с. 28—32.— 6. Золотаревская Д. И., Бурдыкин В. И., Матвеев В. В. и др. Изменение вяз-

коупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора.— Изв. ТСХА, 1989, вып. 1, с. 175—183.— 7. *Золотаревская Д. И.* Взаимосвязь различных математических моделей деформирования почв.— Механизация и электрификация сельского хоз-ва, 1983, № 5, с. 10—16.— 8. *Золотаревская Д. И.* Контактные напряжения и деформации шин при качении эластичных колес.— Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1989, № 5, с. 19—23.— 9. *Золотаревская Д. И.* Деформации и напряжения в поверхностном слое почвы при качении эластичных колес.— Изв. ТСХА, 1990, № 4, с. 140—150.— 10. *Ишлинский А. Ю.* О проскальзывании в области контакта при трении качения.— Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 6, с. 3—15.— 11. *Ксенович И. П., Скотников В. А., Ляско М. И.* Ходовая система — почва — урожай.— М.: Агропромиздат, 1985.— 12. *Маслов В. А.* Снижение уплотняющего воздействия на почву при работе трактора типа «Кировец» на возделывании зерновых культур.— Автореф. канд. дис. Рязань, 1987.— 13. *Поletaев А. Ф.* Основы теории сопротивления качению и тяги жесткого колеса по деформируемому основанию.— М.: Машиностроение, 1971.— 14. *Хабатов Р. Ш., Золотаревская Д. И., Ходыкин В. Т.* Моделирование уплотнения почвы колесными движителями.— Тракторы и сельхозмашины, 1985, № 1, с. 6—9.

Статья поступила 9 февраля 1990 г.

SUMMARY

Methods for calculating traction properties of wheel tractors and their compacting action on the soil are suggested. Methods for determining the characters of compacting action on the soil and traction properties of tractors with practically resilient elastic wheels have been developed, as well as the programs of solving the problems by computer which allow to implement these methods.