

МЕХАНИЗАЦИЯ С.-Х. ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 3, 2002 год

УДК 631.17

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР РАБОЧИХ СКОРОСТЕЙ КОЛЕСНЫХ МАШИН И МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Д.И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ

(Кафедра высшей математики)

Проведено исследование взаимодействия с почвой машинно-тракторных агрегатов с колесными движителями и с перекатываемыми рабочими органами. Расчетные формулы и системы уравнений для определения показателей этого взаимодействия получены на основе моделирования закономерности деформирования во времени уплотняющейся почвы дифференциальным уравнением, характеризующим ее вязкоупругие свойства. Разработана методика расчета, позволяющая находить оптимальные параметры МТА и выбирать рациональные рабочие скорости с учетом агротехнических требований к плотности почвы.

По разработанным программам на ЭВМ найдены показатели сопротивления движению и уплотняющего воздействия на почву агрегата, составленного из трактора МТЗ-82 и гладкого цилиндрического катка. Определены величины вертикальной нагрузки на ось катка и скорости агрегата, а также выбраны комплекты шин к трактору МТЗ-82, которые обеспечивают при работе агрегата достижение плотности почвы, близкой к оптимальной.

Одной из наиболее актуальных экологических проблем является проблема сохранения и повышения плодородия почв. Однако работа на полях мобильной сельскохозяйственной техники приводит к их переуплотнению. С целью ограничения уплот-

няющего воздействия на почву мобильной сельскохозяйственной техники утверждены государственные стандарты. В качестве нормируемых показателей уплотняющего воздействия движителей мобильных машин на почву в ГОСТ 26955—86 приняты

максимальное давление q_k движителей на почву и максимальное напряжение $\sigma_{0,5}$ в почве на глубине 0,5 м. В то же время требования интенсификации сельскохозяйственного производства и роста производительности труда выдвигают в число наиболее актуальных проблему повышения тягово-сцепных качеств тракторов.

Нами разработаны методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники, тяговых свойств и сопротивления движению колесных тракторов [3]. Эти методы получили дальнейшее развитие и были использованы для оценки влияния распределения вертикальных 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 [4].

В данной работе поставлена задача исследовать и оценить количественно влияние ряда основных факторов на показатели уплотняющего воздействия на почву, сопротивления движению сельскохозяйственных машин, орудий и машинно-тракторных агрегатов с колесными движителями и перекатывающимися рабочи-

ми органами, тяговые свойства тракторов в составе МТА. Разработана методика расчета, позволяющая находить оптимальные параметры МТА и выбирать рациональные рабочие скорости с учетом агротехнических требований к плотности почвы.

Рассмотрена работа агрегата, предназначенного для выполнения операции прикатывания уплотняющейся почвы. Агрегат состоит из жесткого гладкого цилиндрического катка и движущего его колесного трактора. Выполнены теоретическое исследование взаимодействия катка с почвой и компьютерные эксперименты по разработанным нами программам, результаты которых позволили выбрать оптимальные параметры этого агрегата.

На основании результатов статистической обработки экспериментальных данных зависимость плотности ρ_e верхнего деформирующегося слоя почвы, распространенного на глубину H , до ее уплотнения катком и колесами трактора от глубины y при влажности почвы w приняли в виде двух линейных участков:

$$\rho_e(y) = \quad (1)$$

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

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

Деформации, возникающие в уплотняющихся почвах при действии внешних нагрузок, являются вязкоупругими. Зависимость между сжимающими напряжениями $\sqrt{\sigma_e}$ и относительными деформациями ϵ сжатия почвы, изменяющимися во времени t , описаны в данной работе, как и в работах [3, 4] дифференциальным уравнением

$$\dot{\sigma}_e + p\sigma_e = q\dot{\epsilon}, \quad (2)$$

где $\dot{\sigma}_e$ и $\dot{\epsilon}$ — производные по времени t от σ_e и ϵ ; p, q — характеристики вязкоупругих свойств почвы. Характеристика p, c^{-1} зависит от частоты ω, c^{-1} гармонического закона деформирования почвы; в формулах, полученных на основе определяющего уравнения (2), ее целесообразно представить в виде $p = g \cdot \omega$, где g — приведенная безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы.

Радиус окружности основания наружной цилиндрической поверхности пустотелого барабана катка равен R ,

длина катка — L . Деформация почвы при качении катка принята нами плоской. Так как длина L катка весьма большая, то погрешность при замене пространственной деформации почвы плоской мала. Скорость v_0 агрегата, угловая скорость ω катка и угловые скорости колес трактора приняты постоянными, поверхность почвы — горизонтальной. На каток со стороны агрегирующего его трактора действуют силы, которые приведены к приложенным к оси катка вертикальной G и горизонтальной F силам и моменту M_e . Равнодействующие распределенных по поверхности контакта катка и почвы элементарных вертикальных и равнодействующие элементарных горизонтальных реакций почвы соответственно равны N и T (рис. 1). Вертикальная нагрузка G на ось катка изменяется в зависимости от количества заливаемой во внутреннюю полость его барабана воды от 3 до 8 кН [5], что влечет за собой изменение сопротивления движению и уплотняющего воздействия катка на почву. Нужно найти оптимальные значения величин G и v_0 , при которых достигается необходимый уплотняющий эффект операции прикатывания почвы, но почва не переуплотняется.

Величина поверхности контакта катка с почвой зависит от его длины L , радиуса R и углов $\psi_b = \angle BOC$ и $\psi_a = \angle AOC$ (рис. 1); здесь ψ_b — угол набегания, он характеризует область сжатия почвы катком; ψ_a — угол сбегания, он характеризует область, в которой образуются при качении катка обратимые деформации почвы ($\psi_a > 0$, $\psi_a < 0$, $|\psi_b| > |\psi_a|$).

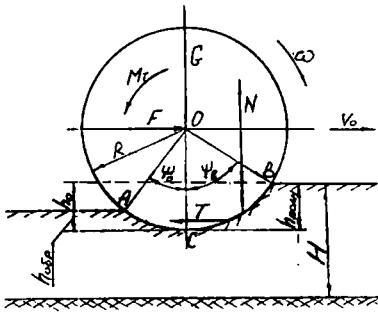


Рис. 1. Схема взаимодействия катка с почвой.

Во время качения катка в почве в вертикальной плоскости, проходящей через его ось, распространяется плоская волна деформации, которая состоит из волны сжатия, вызываемой вертикальными смещениями $\bar{v}(y, t)$ почвы, и волны сдвига, вызываемой ее горизонтальными смещениями. Изменение плотности почвы обусловлено в основном вертикальными смещениями ее частиц. Пос-

ле снятия нагрузки смещения $\bar{v}(y, t)$ почвы с течением времени (при $t \rightarrow \infty$) стабилизируются. Принято, что приращение $\Delta\rho$ плотности почвы после прохода катка на глубине $y + \bar{v}_c(y)$ пропорционально ее стабилизированным смещениям $\bar{v}_c(y) = \bar{v}(y, \infty)$.

Взаимодействие катка с почвой исследовано теоретически в различных случаях соотношений между предполагаемой глубиной H_{PT} распространения деформации сжатия почвы и величинами H_1 и H : $H_{PT} \leq H_1$, $H_1 < H_{PT} \leq H$, $H_{PT} > H$.

В качестве основных показателей уплотняющего воздействия катка на почву нами приняты величины, непосредственно характеризующие физические свойства почвы. Это: остаточная после прохода катка осадка h_0 почвы, приращения $\Delta\rho_s(y)$ и $\Delta\rho(y)$ плотности влажной и абсолютно сухой почвы, соответствующие этим приращениям значения $\rho_{1s}(y)$ и $\rho_1(y)$ плотности влажной и абсолютно сухой почвы на различной глубине y после прохода катка, глубина H_p распространения деформации сжатия почвы. Величины h_0 , $\Delta\rho_s(y)$, $\Delta\rho(y)$, а следовательно, значения $\rho_{1s}(y)$ и $\rho_1(y)$ могут быть найдены, если будут известны углы ψ_b и ψ_a , а также фактическая глубина H_p распространения деформации сжатия почвы.

Нами получена система 3 нелинейных уравнений с 3 неизвестными, позволяющая найти величины ψ_b , ψ_a и H_{pT} — предполагаемую глубину распространения деформации сжатия почвы

при условии, что область распространения деформации сжатия почвы не ограничена снизу, т.е. $H \rightarrow \infty$. Для того случая, когда $H_1 < H_{pT} \leq H$, эта система имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & e^{-g\psi_b}(\cos\psi_b + g \cdot \sin\psi_b) - e^{-g\psi_a}(\cos\psi_a + g \cdot \sin\psi_a) = 0, \\
 & G - \frac{0,9LR^2q}{H_{pT}} \left\{ \frac{1}{g}(\cos\psi_a - \cos\psi_b) - \frac{f}{g^2 + 1} [(\cos\psi_a - \cos\psi_b) + \right. \\
 & + g(\sin\psi_a - \sin\psi_b) + g \cdot \ln \left. \frac{\left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi_b}{2} \right) \right|}{\left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi_a}{2} \right) \right|} \right\} - \\
 & - (\cos\psi_a + g \cdot \sin\psi_a) e^{-g\psi_a} \int_{\psi_a}^{\psi_b} e^{g\psi} \operatorname{tg} \psi \cdot d\psi \Big] = 0, \\
 & \tilde{c}_{01} H_1 + \tilde{c}_{11} H_1^2 + \tilde{c}_{02} (H_{pT} - H_1) + \tilde{c}_{12} (H_{pT} - H_1)^2 - \psi_b + \psi_a = 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В системе (3) f — коэффициент трения скольжения между катком и почвой, $\tilde{c}_{01}, \tilde{c}_{11}$ и $\tilde{c}_{02}, \tilde{c}_{12}$ — коэффициенты, характеризующие затухание с глубиной y волны деформации сжатия почвы соответственно на первом и втором линейных участках изменения с глубиной плотности почвы, заданной зависимостью (1). Разработан алгоритм численного решения на ЭВМ этой системы в фиксированных интервалах изменения неизвестных ψ_b и ψ_a с любой заданной степенью точности.

Если при решении системы (3) получим $H_{pT} \leq H$, то

фактическая глубина распространения деформации сжатия почвы $H_p = H_{pT}$. Если $H_{pT} > H$, то это означает, что область распространения деформации сжатия почвы ограничена снизу величиной H . Границей $y = H$ возбуждается отраженная волна; при этом $H_p = H$. В этом случае неизвестные величины ψ_b и ψ_a находим как решение определенной системы двух уравнений с двумя неизвестными, состоящей из первого и второго уравнений системы (3).

Затем находим величины полной $h_{\text{полн}}$, обратимой $h_{\text{обр}}$ и остаточной h_0 после прохо-

да катка осадки почвы, а также приращение в результате его прохода плотности и плотность почвы на различной глубине.

Приращение плотности ρ_s влажной почвы на глубине $y + \bar{v}_c(y)$ определяем по следующей приближенной формуле

$$\Delta\rho_s(y + \bar{v}_c(y)) \approx \frac{h_0(2(\rho_{01})_a + k_1 h_0)(H_p - y)}{(H_p + \mu h_0)^2}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент поперечного расширения почвы. При $y = 0$ имеем $\bar{v}_c(y) = h_0$ и по формуле (4) находим $\Delta\rho_s(h_0)$.

Напряжения сжатия почвы в различных точках линии контакта катка с почвой равны

$$\sigma_a(\psi) = \frac{qR}{H_p(g^2 + 1)} \times [\cos\psi + g \cdot \sin\psi - (\cos\psi_s + g \cdot \sin\psi_s)e^{-g(\psi_s - \psi)}]. \quad (5)$$

Угол ψ_0 , характеризующий расположение на линии контакта точки, в которой напряжения $\sigma_s(\psi)$ принимают максимальное значение, нашли как корень трансцендентного уравнения

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

Уравнение (6) получили, воспользовавшись необходимым условием экстремума

функции (5): $\sigma'_s(\psi)|_{\psi=\psi_0} = 0$. Корень ψ_0 уравнения (6) находим на ЭВМ приближенно с любой заданной степенью точности. Подставив значение ψ_0 в (5), находим по этой формуле максимальное напряжение $\sigma_{s,\max}$ сжатия почвы катком, равное максимальному давлению q_k катка на почву.

Показатели сопротивления движению катка определяем аналитически в их взаимной связи с его уплотняющим воздействием на почву. Величины ψ_s , ψ_a и H_p , входящие в формулы для расчетного определения этих показателей, находим, как описано выше. На поверхности контакта жесткого катка и вязкоупругой почвы вследствие действия сил трения образуются зоны сцепления и скольжения. Величины центральных углов, характеризующих расположение на линии контакта, представленной на рис. 1 дугой ВСА, нижней и верхней границ зоны сцепления, зависят от коэффициента f трения скольжения между катком и почвой и коэффициента $\delta < 0$ буксования катка. При реальных значениях f , δ , углов ψ_s и ψ_a на поверхности контакта катка и почвы бывает от одной до трех зон (две зоны сцепления и одна зона скольжения). Формулы

для вычисления равнодействующих T_{cu} и T_{ck} , элементарных горизонтальных реак-

ций почвы на каток найдены в результате выполнения преобразований в зависимостях

$$T_{c\delta} = 0,9LR \int_{\psi_n}^{\psi_v} \left(\frac{1}{1-\delta} \operatorname{cosec}\psi - ctg\psi - tg\psi \right) \sigma_a(\psi) d\psi, \quad (7)$$

$$T_{c\epsilon} = -0,9LR \int_{\psi_n}^{\psi_v} (f + tg\psi) \sigma_a(\psi) d\psi, \quad (8)$$

где соответственно ψ_n и ψ_v — нижняя и верхняя границы рассматриваемой зоны.

Равнодействующая T элементарных горизонтальных реакций почвы на каток равна сумме равнодействующих элементарных горизонтальных реакций T_j во всех зонах контактной поверхности:

$$T = \sum_{j=1}^m T_j, \text{ где } m \text{ — число зон.}$$

Получена формула для расчета силы S , от которой зависят затраты энергии на деформирование вязкоупругой почвы катком без учета действия сил трения.

Разработана программа для ЭВМ, позволяющая найти по предложенному методу расчета показатели уплотняющего воздействия катка на почву (H_p , h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$) плотность ρ_{1s} (0,05) влажной и ρ_1 (0,05) абсолютно сухой почвы после прохода катка на глубине 0,05 м, максимальные $\sigma_{s,max}$ и средние $\sigma_{s,cp}$ напряжения в контакте катка с почвой и др.) и показа-

тели, характеризующие сопротивление его движению (необходимую силу тяги на крюке трактора $P_{кр} = |T|$, силу S , коэффициент $f_k = S/G$ сопротивления качению). По этой программе выполнили расчеты, в которых нашли показатели для катка с размерами $R = 0,35$ м и $L = 1,4$ м. Принимали, что агрегат состоит из катка и трактора МТЗ-82. Эксплуатационный вес трактора $G_0 = 38, 48$ кН, его база $L_0 = 2,45$ м.

Расчеты выполнены для случая работы агрегата на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве известного гранулометрического состава при ее влажности $w = 16-26$ %; закономерность деформирования этой почвы во времени в указанном интервале изменения ее влажности выявлена нами ранее экспериментально и описана математически уравнением (2) [3, 4]. Плотность почвы до проходов катка и трактора при $w = 18,37$ % характеризуется зависимостью (1) с параметрами: $H_1 = 0,32$ м;

$H = 1 \text{ м}$; $(\rho_{01})_s = 1,1383 \text{ г/см}^3$; $k_1 = 1,7 \text{ г/(см}^3 \cdot \text{м)}$; $(\rho_{02})_s = 1,6268 \text{ г/(см}^3 \cdot \text{м)}$; $k_1 = 0,1731 \text{ г/(см}^3 \cdot \text{м)}$. Характеристики g и q вязкоупругих свойств почвы определяли по уравнениям регрессии $g = g(\rho_s, \omega, w)$ и $q = q(\rho_s, \omega, w)$, приведенным в работе [4].

Исследовали влияние на показатели сопротивления качению и уплотняющего воздействия катка на почву величин G , v_0 , f и w . Для выявления характера влияния указанных величин и количественной оценки этого влияния по разработанным программам на компьютере выполнили ряд расчетов (компьютерных экспериментов). Проведено 4 серии однофакторных компьютерных экспериментов. В опытах каждой серии варьировали по одному из влияющих факторов G , v_0 , f и w . Каждая из серий однофакторных опытов состояла из 9 опытов. При исследовании характера и количественной оценки влияния вертикальной нагрузки на ось катка, величину G изменяли от 3 до 8 кН, а другие факторы сохраняли постоянными: $v_0 = 2 \text{ м/с}$, $f = 0,3$; при определении характера и количественной оценки влияния скорости, принимали $G = 8 \text{ кН}$, $f = 0,3$, а v_0 изменяли от 1 до 3 м/с; при исследовании влияния трения скольжения между катком и почвой при-

нимали $G = 8 \text{ кН}$, $v_0 = 2 \text{ м/с}$, а f изменяли от 0,25 до 0,54; при определении влияния влажности почвы принимали $G = 5 \text{ кН}$, $v_0 = 2,1 \text{ м/с}$, $f = 0,32$, а w изменяли от 14 до 26%.

Результаты расчетов использованы для получения корреляционных зависимостей величин $P_{кр} = |T|$, S , f_k , h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, ρ_{1s} (0,05), $h_{полн}$, h_0 , $h_{обр}$, максимальных $\sigma_{s,max}$ и средних $\sigma_{s,ср}$ напряжений сжатия почвы от G , v_0 , f и w . Для нахождения уравнений регрессии использовали линейную

$$\hat{y}_i = a_i \tilde{x}_j + b_i \quad (9)$$

и квадратичную

$$\hat{y}_i = a_{1i} \tilde{x}_j^2 + b_{1i} \tilde{x}_j + c_{1i} \quad (10)$$

функции, где \hat{y}_i — исследуемый показатель, i — номер показателя, j — номер влияющего фактора, $\tilde{x}_1 = G$, $\tilde{x}_2 = v_0$, $\tilde{x}_3 = f$ и $\tilde{x}_4 = w$; a_i , b_i , a_{1i} , b_{1i} , c_{1i} — коэффициенты. Для всех исследуемых показателей найдены коэффициенты корреляции r_i , характеризующие тесноту линейной зависимости между \hat{y}_i и фактором x_j . Для каждого показателя найдены также величины e_{1i} и e_{2i} , равные суммам квадратов отклонений опытных значений этого показателя от соответствующих значений \hat{y}_i , найденных по формулам (9) и (10). Сравнение между собой величин e_{1i} и e_{2i} позволило выявить, ка-

кая из формул ((9) или (10)) лучше согласуется с опытными данными. В табл. 1 приведены коэффициенты зависимостей вида (9) и (10), характеризующих влияние скорости v_0 на исследованные показатели, а также соответствующие этим зависимостям величины r_i , e_{1i} и e_{2i} . Полученные результаты показывают, что зависимости показателей от v_0 могут быть приняты линейными, так как абсолютные значения коэффициента корреляции весьма велики: $|r_2| \in [0,8461; 0,9986]$. Для зависимостей от

v_0 всех показателей, кроме $\sigma_{s, \max}$, $\sigma_{s, \text{ср}}$ (а также $h_{\text{обр}}$) коэффициенты $r_i < 0$, что свидетельствует о тенденции снижения уплотняющего воздействия катка на почву и сопротивления его движению с ростом скорости. Для зависимостей от v_0 величин $\sigma_{s, \max}$ и $\sigma_{s, \text{ср}}$ коэффициенты корреляции $r_i > 0$; это означает, что при увеличении v_0 напряжения возрастают (в то время, как приращение плотности почвы снижается). Несколько более точно, чем с помощью линейной функции, влияние скорости

Т а б л и ц а 1

Корреляционные зависимости показателей сопротивления движению и уплотняющего воздействия катка на почву от скорости агрегата

Показатель	Линейные зависимости показателей от v_0 , м/с				Квадратичные зависимости показателей от v_0 , м/с			
	параметры линейной зависимости		коэффициент корреляции r_i	e_{1i}	параметры квадратичной зависимости			e_{2i}
	a_i	b_i			a_{1i}	b_{1i}	c_{1i}	
$[T]$, кН	-1,53	8,55	-0,8461	2,2512	1,49	-7,42	13,80	0,2485
P_f , кН	-1,04	4,03	-0,9812	0,0936	0,32	-2,31	5,16	0,0054
f_k	-0,129	0,504	-0,9812	0,0014	0,040	-0,289	0,645	0,0001
$h_{\text{ном}}$, см	-1,957	8,319	-0,9845	0,2589	0,556	-4,154	10,277	0,0083
h_0 , см	-2,095	8,132	-0,9873	0,2419	0,538	-4,222	10,028	0,0078
$h_{\text{обр}}$, см	0,137	0,185	0,9986	0,0001				
$\Delta p_s(h_0)$, г/см ³	-0,047	0,186	-0,9862	0,0001				
ρ_{1s} (0,05), г/см ³	-0,087	1,542	-0,9198	0,0003	0,037	-0,235	1,674	0,0028
$\sigma_{s, \max}$, кПа	5,82	29,90	0,9979	0,2842	-0,61	8,22	27,76	0,0001
$\sigma_{s, \text{ср}}$, кПа	3,62	24,33	0,9984	0,0828	-0,33	4,94	23,15	0,0004

Однофакторные корреляционные зависимости показателей сопротивления движению и уплотняющего воздействия катка на почву от вертикальной нагрузки на его ось, коэффициента трения скольжения между катком и почвой и влажности почвы

Показатель	Зависимости показателей от G , кН			Зависимости показателей от f			Зависимости показателей от w , %		
	параметры линейной зависимости		r_i	параметры линейной зависимости		r_i	параметры линейной зависимости		r_i
	a_i	b_i		a_i	b_i		a_i	b_i	
$ T $, кН	0,66	-0,33	0,9999	5,69	3,27	0,9980	0,37	-1,76	0,9540
P , кН	0,30	-0,64	0,9937	0,87	1,58	0,9992	0,06	-0,31	0,9541
f_k	0,024	0,039	0,9999	0,106	0,198	0,9821	0,013	-0,060	0,9513
$h_{пл}$, см	0,500	0,198	0,9999	1,025	3,894	0,9994	0,247	-1,790	0,9537
h_0 , см	0,477	-0,085	0,9999	0,999	3,894	0,9994	0,241	-2,086	0,9515
$h_{отр}$, см	0,023	0,282	0,9868	0,026	0,447	0,9950	0,006	0,296	0,9960
$\Delta\rho_n(h_0)$, г/см ³	0,011	-0,002	0,9998	0,023	0,079	0,9993	0,006	-0,060	0,9513
$\rho_{1,в}$ (0,05), г/см ³	0,018	1,219	0,9999	0,041	1,356	0,9944	0,021	0,933	0,9879
$\sigma_{н,макс}$, кПа	3,83	11,73	0,9982	6,31	39,87	0,9995	-0,81	46,45	-0,9948
$\sigma_{н,ср}$, кПа	2,96	8,40	0,9986	2,82	32,54	0,9989	-0,58	39,42	-0,9816

на средние значения исследуемых показателей (кроме $h_{\text{но.тн}}$ и $\Delta\rho_e(h_0)$) описывается квадратичной функцией (10). На рис. 2 представлены зависимости ряда показателей от скорости v_0 , полученные по результатам однофакторных компьютерных экспериментов. Выявлено, что увеличение v_0 от 1 до 2,5 м/с приводит к снижению средних значений показателей сопротивления движению и уплотняющего воздействия катка на почву. Расчеты по уравнениям регрессии вида (10) показывают, что при $G = 8 \text{ кН}$ и $f = 0,3$ с ростом v_0 от 1 до 2,5 м/с происходит следующее снижение средних значений показателей: $|T|$ — от 7,02 до 4,73 кН (на 32,62%); f_k — от 0,3742 до 0,1799 (на 51,92%), h_0 — от 6,04 до 2,89 см (на 57%), $\Delta\rho_e(h_0)$ — от 0,139 до 0,0685 г/см³ (на 50,72%). При этом среднее

значение $\sigma_{e,\text{max}}$ возрастает от 35,73 до 44,45 кПа (на 24,44%). В то же время следует учитывать, что дальнейшее увеличение скорости приводит к возрастанию колебаний трактора и катка, что вызывает рост амплитуд колебаний показателей взаимодействия катка с почвой. Поэтому рост скорости агрегата должен быть ограничен.

Зависимости исследуемых показателей от G , f , w с большой степенью точности можно принять линейными. В табл. 2 приведены параметры a и b , зависимостей (9), характеризующих влияние $\tilde{x}_1 = G$, $\tilde{x}_3 = f$ и $\tilde{x}_4 = w$ на эти показатели, а также величины коэффициентов корреляции r_i найденных уравнений регрессии. В полученных зависимостях $|r_i| \in [0,9513; 0,9999]$, что характеризует эти зависимости как имеющие весьма большую тесноту связи.

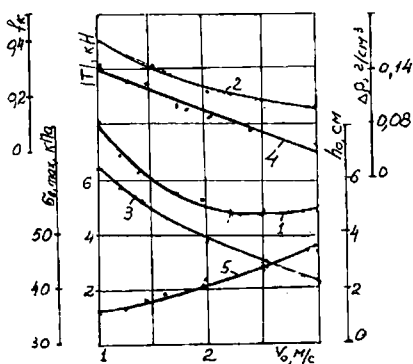


Рис. 2. Зависимости показателей сопротивления качению и уплотняющего воздействия катка на почву от скорости v_0 агрегата.

1, 2, 3, 4, 5 — зависимости от v_0 соответственно величин $|T|$, f_k , h_0 , $\Delta\rho_e(h_0)$, $\sigma_{e,\text{max}}$.

Расчеты по найденным уравнения регрессии свидетельствуют о том, что с ростом вертикальной нагрузки G на ось катка все показатели сопротивления его движению и уплотняющего воздействия на почву существенно возрастают. При $v_0 = 2$ м/с, $f = 0,3$ увеличение G от 3 до 8 кН приводит к возрастанию средних значений $|T|$, f_k , h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, $\sigma_{s,max}$ соответственно в 3; 2,05; 2,7; 2,77; 1,82 раза. Следует отметить, что возрастание с ростом G остаточной осадки и приращения плотности почвы на глубине h_0 не соответствует темпу роста напряжений $\sigma_{s,max}$, а значительно превосходит его.

Изменение коэффициента трения скольжения f между катком и почвой, как видно из результатов расчетов по уравнениям регрессии вида (9), существенно влияет только на $|T|$ — абсолютную величину равнодействующей элементарных горизонтальных реакций почвы на каток, другие показатели взаимодействия катка с почвой от величины f зависят мало. При $G = 5$ кН, $v_0 = 2,1$ м/с увеличение f в 2 раза от 0,25 до 0,5 приводит к возрастанию среднего значения $|T|$ на 30,4%, средние значения величин f_k , h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, $\sigma_{s,max}$ возрастают в этих условиях соответственно на 11,8; 6,8; 6,5; 3,8%.

На рис. 3. представлены корреляционные зависимости ряда исследованных показателей от абсолютной влажности ($w, \%$) почвы. Результаты расчетов по уравнениям регрессии вида (9) показывают, что с ростом w сопротивление движению катка и уплотнение почвы при его качении возрастают; в то же время напряжения $\sigma_{s,max}$ при этом снижаются. Увеличение w от 14 до 26% при $G = 5$ кН, $v_0 = 2,1$ м/с и $f = 0,32$ приводит к возрастанию средних значений $|T|$ от 3,40 до 7,82 кН (на 130%), силы S — от 0,529 до 1,249 кН (на 136,1%), коэффициента f_k — от 0,119 до 0,273 (на 129,4%). При этом средние значения величин $h_{полн}$, h_0 , $h_{обр}$, $\Delta\rho_s(h_0)$, ρ_{1s} (0,05) повышаются соответственно на 177,6; 225,0; 201,6; 282,9; 20,3%; в то же время $\sigma_{s,max}$ уменьшаются на 27,9%. Изменение влажности почвы приводит к изменению ее вязкоупругих свойств: с ростом w снижается величина

$$d_0 = \frac{h_{обр}}{h_{полн}} \text{ — доля обратимой деформации почвы в ее полной деформации.}$$

Корреляционная зависимость величины d_0 от w имеет вид: $d_0 = 0,2933 - 0,0074w$; ее коэффициент корреляции $r = -0,9979$. При увеличении w от 14 до 26% среднее значение d_0 уменьшается на 46,8%.

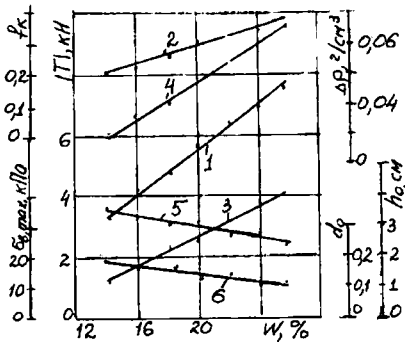


Рис. 3. Зависимости показателей сопротивления качению и уплотняющего воздействия катка на почву от влажности w почвы.

1, 2, 3, 4, 5, 6 — зависимости от w соответственно величин $|T|$, f_k , h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, $\sigma_{a,max}$, d_0 .

С ростом влажности упругие и обратимые вязкие деформации почвы снижается; при больших значениях w свойства почвы становятся близкими к текучим.

Для исследования характера и количественной оценки влияния на показатели взаимодействия с катком с почвой величин G , v_0 и f , помимо

$$\hat{y}_i = b_{0i} + b_{1i}x_1 + b_{2i}x_2 + b_{3i}x_3 + b_{4i}x_1x_2 + b_{5i}x_1x_3 + b_{6i}x_2x_3 + b_{7i}x_1x_2x_3. \quad (11)$$

где \hat{y}_i — значение i -го показателя; b_{0i} , b_{1i} , ..., b_{7i} — постоянные коэффициенты; $x_j = (\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}) / (\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0})$ — кодированные значения переменных \tilde{x}_j ; \tilde{x}_{j0} — натуральное

описанных выше однофакторных опытов, по разработанным программам на компьютере выполнили ряд расчетов, которые представляют собой опыты в серии полного факторного эксперимента типа $N = 2^3$. Здесь N — число опытов в серии, 3 — число влияющих факторов, 2 — число уровней варьирования факторов [1]. Для каждого влияющего фактора были выбраны основной уровень и по 2 уровня, равно отстоящих от основного — нижний и верхний. Нижний, основной и верхний уровни варьирования факторов соответственно равны: для G : 3; 5,5 и 8 кН; для v_0 : 1,5; 2,25 и 3 м/с; для f : 0,3, 0,4 и 0,5.

Результаты расчетов использовали для получения корреляционных зависимостей указанных показателей от G , v_0 и f по методике обработки данных полных факторных экспериментов [1]. Влияющие факторы обозначены: $\tilde{x}_1 = G$, $\tilde{x}_2 = v_0$, $\tilde{x}_3 = f$.

Уравнения регрессии отыскивали в виде:

значение основного уровня фактора; $j = 1, 2, 3$.

По методике из [1] на основании данных трехфакторных компьютерных экспериментов нашли коэффициен-

ты уравнений вида (11). По уравнениям регрессии вида (11) определили средние значения показателей сопротивления движению катка и его уплотняющего воздействия на почву. Результаты выполненных расчетов позволили оценить количественно влияние G , v_0 и f на эти показатели при совместном изменении указанных влияющих факторов.

В результате расчетов по уравнениям регрессии вида (11) подтверждено, что с ростом G все исследованные показатели существенно возрастают. Увеличение сопротивления движению катка и уплотнения почвы при его качении происходит также с ростом коэффициента трения скольжения между катком и почвой.

Возрастание скорости агрегата в определенных пределах способствует снижению показателей сопротивления движению и уплотняющего воздействия катка на почву. С ростом скорости от 1,5 до 2,25 м/с при $G = 5,5$ кН и $f = 0,4$ происходят следующие снижения средних значений исследованных показателей: $|T|$ — на 8,9%, силы S — на 27,5%, f_k — на 26,9%. Средние значения величин $h_{\text{полн}}$, h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, $\rho_{1s}(0,05)$ снижаются в этих условиях на 23,2; 27,8; 28,2; 2,7%. В то же время $\sigma_{s,\text{max}}$ увеличиваются на 9,2%.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при увеличении скорости v_0 агрегата и снижении влажности w почвы показатели, непосредственно характеризующие свойства почвы после прохода катка, влияющие на ее плодородие, сопротивление обработке и проходимость машин (величины $h_{\text{полн}}$, h_0 , $\Delta\rho_s(h_0)$, $\rho_{1s}(0,05)$), уменьшаются, а напряжения $\sigma_{s,\text{max}}$ возрастают. Полученные результаты показывают, что величина максимального давления на почву, равная напряжению $\sigma_{s,\text{max}}$, не может быть использована в качестве основного нормируемого показателя уплотняющего воздействия на почву катка и колесных движителей мобильных машин.

Оптимальные значения плотности, при которых достигается максимальная урожайность сельскохозяйственных культур, для легкосуглинистых почв составляют 1,1...1,4 г/см³ [2]; критические значения плотности этих почв — 1,4...1,6 г/см³. В результате расчетов на ЭВМ по разработанным нами программам определили, что при качении катка плотности почвы $\rho_{1s}(0,05)$, равная 1,307 г/см³, достигается, если $G = 5$ кН (при $v_0 = 2,1$ м/с; $f = 0,32$; $w = 18,37\%$). Это значение вертикальной нагрузки на ось катка в рассмотренных

условиях его работы является оптимальным. Расчетным путем найдено, что при этом сила тяги на крюке $P_{кр}$ агрегирующего каток трактора должна быть равна 3,05 кН.

Машинно-тракторный агрегат нужно составить так, чтобы трактор обеспечивал заданную силу тяги на крюке и не переуплотнял почву. Снижению уплотняющего воздействия на почву трактора оптимизации конструкции способствует расстановка его передних и задних колес на различную колею, оптимизация буксования колес, выбор шин оптимальных типоразмеров, сдвигание колес, работа трактора схемы 4x4 с включенным передним мостом, кинематически согласованные режимы работы передних и задних колес [3, 4, 6, 7]. В связи с этим при исследовании работы рассматриваемого агрегата, принимали, что следы передних и задних колес трактора МТЗ – 82 различны, трактор работает с включенным передним мостом.

Рассмотрен вопрос о выборе на основе результатов сравнительных расчетов по разработанной нами методике шин оптимальных типоразмеров к трактору данной марки, обеспечивающих при работе агрегата с заданной скоростью наименьшее уплотнение почвы.

С учетом результатов приведенных в работе [7], а так-

же рекомендаций НАТИ, определены уплотняющее воздействие на почву и тяговые свойства трактора МТЗ-82, укомплектованного шинами: 1) 11,2–20 и 15,5R38; 2) 11,2–20 и 11,2–42; 3) 8,3–20 и 15,5R38; 4) 9,0–20 (ведущие) и 15,5R38; 5) 13,6–20 и 16,9R38; 6) 16,0–20 и 16,9R38; 7) 16,0–20 и 18,4R38.

В расчетах показателей взаимодействия движителей трактора с почвой приняты заданное значение силы тяги на крюке трактора $P_{кр} = 3,05$ кН, давление воздуха в шинах передних и задних колес для всех шин $p_{к1} = p_{к2} = 100$ кПа. Приняв коэффициент трения скольжения между шинами и рыхлой почвой $f_i = 0,6$ ($i = 1$ для переднего и $i = 2$ для заднего колеса) нашли, что вся условная поверхность контакта ведущего колеса и почвы состоит из одной зоны буксования и колесо развивает максимальную силу тяги при буксовании $\delta_0 = 14,3\%$, это буксование является оптимальным. Если $\delta \geq \delta_0$, то сила тяги ведущего колеса остается постоянной и равной ее значению при буксовании δ_0 . Приняли расчетное буксование передних и задних колес $\delta_s = 15\%$.

Некоторые из найденных в результате расчетов на ЭВМ показателей взаимодействия с почвой агрегирующего каток трактора МТЗ-82, укомплектованного шинами

различных типоразмеров, приведены в табл. 3. В этой таблице \bar{G}_{0i} — вертикальные динамические нагрузки на оси переднего и заднего колес трактора. Коэффициенты $(\eta_{xc})_{\max}$ и $(\eta_p)_{\max}$ — соответственно максимально возможное значение КПД ходовой системы трактора и максимально возможное значение КПД, учитывающего затраты энергии на деформацию почвы без учета влияния трения скольжения.

Для трактора МТЗ-82 расчетное значение силы тяги на крюке $P_{крп} = 2(T_1 + T_2)$ больше заданного значения $P_{крп} = 3,05$ кН при оснащении всеми рассмотренными комплектами шин. Так как $P_{крп} >$

$> P_{крп}$, то необходимая сила тяги реализуется при буксовании меньшем того, которое было принято в расчетах.

На рис. 4 представлены графики, характеризующие зависимости от глубины y плотности почвы после прохода передних (а) и задних (б) колес трактора, снабженных шинами различных типоразмеров. Следы передних и задних колес трактора различны, поэтому приращение плотности почвы после прохода трактора равно большому из значений приращения плотности почвы после прохода передних и прохода задних колес. Выявлено, что уменьшению приращения плотности почвы после про-

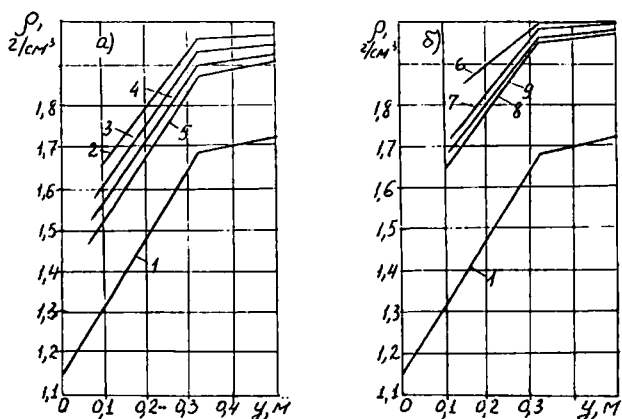


Рис. 4. Уплотнение почвы передними (а) и задними (б) колесами трактора МТЗ – 82 с шинами различных типоразмеров.

1 — плотность почвы до прохода колес; 2, 3, 4, 5 — плотность почвы после прохода передних колес соответственно с шинами 8,3 – 20; 11,2 – 20; 13,6 – 20; 16,0 – 20; 6, 7, 8, 9 — плотность почвы после прохода задних колес соответственно с шинами 11,2 – 42; 15,5R38; 16,9R38; 18,4R38.

Т а б л и ц а 3

Уплотняющее воздействие на почву и тяговые свойства трактора МТЗ-82 в агрегате с катком при использовании шин различных типоразмеров

№ п/п	Типо-размеры шин	$\tilde{C}_{об}$ кН	Показатели для переднего и заднего колес						Показатели тяговых свойств трактора					
			$\tilde{h}_{об}$ с.м	$\Delta \tilde{p}_m(\tilde{h}_{об})$ г/см ³	плотность почвы после прохода колеса			\tilde{S}_b кН	\tilde{T}_p кН	$\tilde{P}_{кН}$	$\tilde{P}_{кН}^{г/р}$	\tilde{J}_k	$(\eta_{кН})_{max}$	
					$(\rho_{об})_п$ г/см ³	$k_{пр}$ г/(см ² ·м)	$\tilde{\rho}_m(0,05)$ г/см ³							
1	11,2-20 15,5R38	5,55 12,73	7,80 11,16	0,179 0,257	1,451 1,586	1,505 1,410	1,527 1,657	1,31 2,94	1,87 3,90	8,51	11,52	0,233	0,575	0,489
2	11,2-20 11,2-42	5,55 12,64	7,80 14,84	0,179 0,342	1,451 1,734	1,505 1,297	1,527 1,799	1,31 3,54	1,87 3,01	9,71	9,74	0,267	0,501	0,426
3	8,3-20 15,5R38	5,36 12,73	9,47 11,16	0,217 0,257	1,518 1,586	1,459 1,410	1,591 1,657	1,47 2,94	1,46 3,90	8,83	10,71	0,244	0,548	0,466
4	9,0-20 15,5R38	5,59 12,73	8,97 11,16	0,206 0,257	1,498 1,586	1,473 1,410	1,572 1,657	1,47 2,94	2,02 3,90	8,82	11,83	0,241	0,573	0,487
5	13,6-20 16,9R38	5,73 13,27	6,74 10,58	0,154 0,243	1,409 1,563	1,534 1,428	1,486 1,634	1,24 2,84	1,99 4,41	8,17	12,80	0,215	0,610	0,519
6	16,0-20 16,9R38	5,75 13,27	5,78 10,58	0,132 0,243	1,370 1,563	1,559 1,428	1,448 1,634	1,06 2,84	2,35 4,41	7,81	13,51	0,205	0,634	0,539
7	16,0-20 18,4R38	5,75 13,52	5,78 9,71	0,132 0,223	1,370 1,528	1,559 1,452	1,448 1,600	1,06 2,68	2,35 4,83	7,48	14,35	0,195	0,657	0,559

хода трактора соответствует увеличению КПД его ходовой системы. При работе в рассмотренных условиях лучшие свойства среди шин передних колес имеют шины 16,0 – 20, а среди шин задних колес – шины 18,4R38.

Выявлено, что наименьшее уплотнение почвы и наибольший КПД ходовой системы трактора МТЗ-82 достигаются при его комплектации шинами 16,0 – 20 и 18,4R38. Выполнение операции прикапывания почвы агрегатом, составленным на базе трактора

МТЗ-82 с шинами оптимальных типоразмеров способствует существенному снижению остаточной глубины колеи \tilde{h}_0 и приращения $\Delta\tilde{\rho}_e(\tilde{h}_0)$ плотности почвы после прохода трактора, что должно привести к повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Использование на тракторе МТЗ-82 при его работе в составе рассмотренного агрегата на исследованной нами почве комплекта шин 16,0–20 и 18,4R38 вместо часто применяемого при эксплуатации таких тракторов комплекта

Т а б л и ц а 4

Уплотняющее воздействие на почву трактора МТЗ-82 в агрегате с катком при использовании сдвоенных шин задних колес

Типоразмеры шин	$\tilde{G}_{кН}$	Показатели для переднего и заднего колес				
		$\tilde{h}_{оп}$ см	$\Delta\tilde{\rho}_e(\tilde{h}_0)$, г/см ³	плотность почвы после прохода колеса		
				$(\rho_{01})_1$, г/см ³	k_{11} , г/(см ³ ·м)	$\tilde{\rho}_{10}(0,05)$, г/см ³
11,2–20	5,55	7,80	0,179	1,451	1,505	1,527
(15,5R38)*2	12,73	5,88	0,135	1,375	1,556	1,453
11,2–20	5,55	7,80	1,179	1,451	1,505	1,527
(11,2–42)*2	12,64	8,02	0,184	1,461	1,499	1,535
8,3–20	5,36	9,47	0,217	1,518	1,459	1,591
(15,5R38)*2	12,73	5,88	0,135	1,375	1,556	1,453
9,0–20	5,59	8,97	0,206	1,498	1,473	1,572
(15,5R38)*2	12,73	5,88	0,135	1,375	1,556	1,453
13,6–20	5,73	6,74	0,154	1,409	1,534	1,486
(16,9R38)*2	13,27	5,55	0,127	1,362	1,565	1,440
16,0–20	5,75	5,78	0,132	1,370	1,559	1,448
(16,R38)*2	13,27	5,55	0,127	1,362	1,565	1,440
16,0–20	5,75	7,78	0,132	1,370	1,559	1,448
(18,4R38)*2	13,52	5,08	0,116	1,343	1,577	1,421

шин 8,3–20 и 15,5R38 способствует уменьшению \bar{h}_0 на 1,453 см, а $\Delta\bar{\rho}_s(\bar{h}_0)$ — на 0,034 г/см³.

Таким образом, для снижения уплотняющего воздействия на почву желательнее снабдить трактор комплектом шин 16,0–20 и 18,4R38. В то же время, как видно из таблицы 3, плотность почвы $\rho_s(0,05)$ после прохода трактора при его комплектации шинами всех рассмотренных типоразмеров больше оптимальной, поэтому нужны дополнительные меры по снижению уплотняющего воздействия трактора на почву. К таким мерам относится сдвигание колес.

Нами исследована работа трактора со сдвоенными шинами задних колес. В табл. 4 приведены полученные нами данные об уплотнении почвы трактором МТЗ-82 со сдвоенными шинами задних колес. Как видно из табл. 4, в вариантах 6 и 7, т. е. при установке на тракторе передних колес с одинарными шинами 16,0 – 20 и задних колес со сдвоенными шинами 16,9R38, а также со сдвоенными шинами 18,4R38, плотность почвы в слое 0...10 см после прохода трактора близка к оптимальной. Такая комплектация трактора шинами является наиболее целесообразной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. — 2. Бондарев А.Г., Сапожников П.М., Уткаева В.Ф., Щепотьев В.Н. — Сб. науч. трудов ВИМ. Воздействие движителей на почву, М., т. 118, 1988. — 3. Золотаревская Д.И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники. Автореф. докт. дис. М., ВИСХОМ, 1997. — 4. Золотаревская Д.И. Математические методы оценки тяговых свойств и уплотняющего воздействия на почву колесных тракторов. — Изв. ТСХА, 2000, вып. 2, с. 160–180. — 5. Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Колос, 1980. — 6. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система — почва — урожай. М.: Агропромиздат, 1985. — 7. Кривицкий А.М. Оценка эффективности колесного движителя для выбора и обоснования характеристик шин универсально-пропашных тракторов. Автореф. канд. дис. Минск, БПИ, 1986.

*Статья поступила
8 февраля 2001 г.*