

УДК 629.114. 2.073.286

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА С ВЯЗКОУПРУГОЙ ПЕРЕДНЕЙ ПОДВЕСКОЙ

Золотаревская Д.И.

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
Москва, e-mail: zolot@gagarinclub.ru*

Рассмотрены вертикальные колебания передней и задней осей колесного трактора с полужесткой подвеской. Подвеска переднего ведущего моста трактора снабжена упругими рессорами и двумя гидравлическими амортизаторами. Предложены математическая модель и метод расчета вертикальных колебаний осей трактора, метод расчета показателей уплотнения вязкоупругой почвы при движении трактора с учетом его колебаний. Исследовано влияние скорости трактора, амплитуд и частот колебаний возмущающих сил, коэффициента демпфирования амортизаторов на амплитуды вертикальных колебаний осей.

Ключевые слова: колесный трактор, математическое моделирование, метод расчета, колебания осей трактора, вязкоупругие свойства почв, рессора, амортизатор

MATHEMATICAL MODELING OF THE WHEEL TRACTOR WITH THE VISCOELASTIC FRONT SUSPENSION OSCILLATION

Zolotarevskaya D.I.

*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, e-mail: zolot@gagarinclub.ru*

We considered vertical oscillation of the front and the rear wheel tractor axles with semi-rigid suspension. Tractor drive axle suspension have elastic springs and two hydraulic shock-absorber. We proposed mathematical model and calculation method for axels vertical oscillation, calculation method for indexes of viscoelastic soil compaction as a result of tractor moving taking into account it's oscillation. It was investigated tractor speed, amplitude and oscillation frequencies disturbing forces, damper coefficient of the shock-absorber action on vertical axels amplitude oscillation.

Keywords: wheel tractor, mathematical modeling, calculation methods, tractor axles oscillation, viscous elasticity soils properties, spring, shock-absorber

При выполнении трактором полевых работ возникают колебания его остова, появляющиеся из-за неравномерности сопротивления его передвижению и движению агрегируемой трактором машины. Колебания трактора обусловлены тем, что на его остов передаются толчки и удары от неровностей поверхности почвы. Колебания остова ухудшают условия труда и снижают работоспособность водителя, нарушают требования, предъявляемые к технологическому процессу (глубина обработки почвы, заделки семян и др.), ухудшают тягово-сцепные свойства трактора, оказывают вредное влияние на работу механизмов, вызывая их преждевременный износ, а в некоторых случаях даже поломку. Колебания работающих тракторов приводят к ухудшению плодородия почв вследствие увеличения уплотняющего воздействия тракторов на почву. Необходимо разрабатывать и широко использовать меры, способствующие повышению плавности хода тракторов. Весьма важные исследования колебаний тракторов выполнены многими авторами [2, 3, 10, 12, 13]. Однако целый ряд вопросов еще не решен.

Значительную роль в разработке мер по снижению колебаний тракторов долж-

ны сыграть методы расчета показателей плавности хода тракторов, основывающиеся на результатах углубленных исследований упругих или вязкоупругих свойств их подвесок и вязкоупругих свойств почв. В настоящее время такие методы разработаны мало.

Цели данной работы состояли в следующем: разработать математическую модель задачи определения вертикальных колебаний передней и задней осей колесного трактора с вязкоупругой передней подвеской, работающего на уплотняющейся связной почве; разработать метод расчета вертикальных колебаний такого трактора; найти показатели уплотнения почвы трактором с учетом влияния его колебаний при работе; расчетным путем оценить количественно влияние основных факторов на показатели плавности хода трактора.

Материалы и методы исследований

Нами проведены теоретическое исследование вертикальных колебаний передней и задней осей колесного трактора с вязкоупругой передней подвеской при его движении по уплотняющейся связной почве, экспериментальное исследование вязкоупругих свойств и уплотнения уплотняющейся связной почвы трактором, компьютерные эксперименты по разработанным программам.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты теоретического исследования вертикальных колебаний осей колесного трактора с вязкоупругой передней подвеской

Рассмотрим работу машинно-тракторного агрегата, состоящего из трактора с полужесткой подвеской и агрегируемой им машины. При полужесткой подвеске задние колеса трактора не поддрессорены [13]. Исследуем работу трактора, подвеска переднего моста которого содержит упругие элементы, представляющие собой две продольные полуэллиптические рессоры, и два гидравлических амортизатора. Такая подвеска обладает вязкоупругими свойствами. Вязкоупругой передней подвеской в числе некоторых других тракторов снабжен трактор Т-150К.

Поверхность почвы примем горизонтальной. Основное влияние на плавность хода трактора оказывают колебания поступательные вертикальные и угловые продольные. Введем вертикальные оси координат x и y , проходящие через вертикальные диаметры переднего и заднего колес, расположенных на одной и той же стороне трактора. Начало каждой из осей расположим на опорной поверхности. Обозначим через x и y вертикальные отклонения от положения равновесия при колебаниях соответственно передней и задней осей трактора.

Каждая из рессор передней подвески представляет собой упругий элемент с линейной характеристикой. Приведенная жесткость упругого элемента передней подвески равна

$$c_{np} = c_p c_1 / (c_p + c_1) \quad (1)$$

где c_p – жесткость рессоры; $c_1 = G_1/f_1$ – жесткость шины переднего колеса; G_1 – вертикальная нагрузка на ось переднего колеса; f_1 – вертикальное перемещение его оси [10, 13].

Амортизатор оказывает вязкое сопротивление $R = \eta x'$, где η – коэффициент демпфирования.

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

$$\begin{cases} m_1 x'' + \eta x' + c_{np} x + c_2 y = p_1 \sin \omega_1 t, \\ m_2 y'' + c_2 y + \eta x' + c_{np} x = p_2 \sin \omega_2 t, \end{cases} \quad (2)$$

где $c_2 = G_2/f_2$ – жесткость шины заднего колеса; G_2 – вертикальная нагрузка на ось заднего колеса; f_2 – вертикальное переме-

щение его оси; m_j – поддрессоренные части массы трактора, приходящиеся соответственно на его переднюю и заднюю полуоси (здесь и далее для переднего колеса $j = 1$, а для заднего – $j = 2$); p_j и ω_j – амплитуды и круговые частоты колебаний возмущающих сил соответственно; t – время. Величины f_j находятся по формуле из работы [9]. Неподдрессоренные массы трактора (массы колес) приближенно не учитываем, так как они существенно меньше поддрессоренных [10, 13].

Вертикальные колебания передней и задней осей трактора найдем как решение следующей задачи: найти частное решение системы дифференциальных уравнений (2), удовлетворяющее начальным условиям:

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

где h_1 и h_2 – полная осадка почвы соответственно под передним и под задним колесом трактора, найденная без учета влияния колебаний трактора.

Общее решение системы неоднородных дифференциальных уравнений (2) равно сумме общего решения (X, Y) системы однородных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_1 x'' + \eta x' + c_{np} x + c_2 y = 0, \\ m_2 y'' + c_2 y + \eta x' + c_{np} x = 0, \end{cases} \quad (4)$$

соответствующей системе (2), и какого-либо ее частного решения (x_q, y_q) .

Общее решение системы (4) описывает свободные (собственные) вертикальные колебания осей трактора. В случае малого коэффициента демпфирования амортизаторов общее решение этой системы имеет вид:

$$X = A_0 e^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi_0);$$

$$Y = B_0 e^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi_0) + C_1 t + C_2, \quad (5)$$

где $B_0 = (m_1/m_2)A_0$. Угол $\beta t + \phi_0$ – фаза колебаний; ϕ_0 – начальная фаза. Из физического смысла задачи следует, что $C_1 = 0$. Круговая частота свободных колебаний β и коэффициент α равны:

$$\beta = \sqrt{n^2 - p^2/4}; \quad (6)$$

$$\alpha = -p/2, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad p = \eta/m_1; \quad (8)$$

$$n = ((c_2 m_1 + c_{gt} m_2) / (m_1 m_2))^{0.5}, \quad (9)$$

причем $p < n$ (если это соотношение выполняется, то коэффициент демпфирования

амортизаторов считают малым). Величины A_0 , ϕ_0 и C_2 должны быть определены.

Частное решение системы (2) отыскиваем в виде:

$$\begin{cases} x = A_1 \sin(\omega_1 t + \gamma_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \gamma_2) + A_3 \cos(\omega_1 t + \gamma_1) + A_4 \cos(\omega_2 t + \gamma_2), \\ y = B_1 \sin(\omega_1 t + \gamma_1) + B_2 \sin(\omega_2 t + \gamma_2) + B_3 \cos(\omega_1 t + \gamma_1) + B_4 \cos(\omega_2 t + \gamma_2), \end{cases} \quad (10)$$

где A_j и B_j ($j = 1, 2, 3, 4$) – амплитуды слагаемых гармоник; γ_1 и γ_2 – сдвиги фаз слагаемых гармоник по отношению к фазам возмущающих сил; нашли $\gamma_1 = \gamma_2 = \pi$. В результате преобразований получили систему 8-и линейных алгебраических уравнений с 8-ю неизвестными A_j и B_j . Полученная система уравнений является со-

вместной и определенной. Решая ее, находим A_j и B_j .

Используя общее решение системы (2) и начальные условия (3), нашли формулы для определения A_0 , ϕ_0 и $C_2 = D$.

Таким образом, вертикальные колебания передней и задней осей трактора, удовлетворяющие начальным условиям (3), описываются формулами:

$$\begin{cases} x(t) = A_0 e^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi_0) - A_1 \sin \omega_1 t - A_2 \sin \omega_2 t - A_3 \cos \omega_1 t - A_4 \cos \omega_2 t, \\ y(t) = B_0 e^{\alpha t} \sin(\beta t + \phi_0) - B_1 \sin \omega_1 t - B_2 \sin \omega_2 t - B_3 \cos \omega_1 t - B_4 \cos \omega_2 t + D. \end{cases} \quad (11)$$

Первые члены алгебраических сумм, стоящих в правых частях формул (11), характеризуют свободные, а остальные – вынужденные колебания осей трактора. Выражения $A_0 e^{\alpha t}$ и $B_0 e^{\alpha t}$ представляют собой комплексные амплитуды свободных вертикальных колебаний осей, эти амплитуды зависят от времени t . Так как $\alpha < 0$, то $A_0 e^{\alpha t} \rightarrow 0$ и $B_0 e^{\alpha t} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, то есть свободные вертикальные колебания осей трактора со временем затухают. Круговые частоты вынужденных колебаний осей равны частотам ω_1 и ω_2 возмущающих сил. Вынужденные колебания, в отличие от свободных, со временем не затухают.

Метод расчета вертикальных колебаний осей трактора и уплотнения почвы при его проходе

На основе выполненного математического моделирования нами предложен метод расчета вертикальных колебаний передней и задней осей трактора при его работе и разработаны компьютерные программы, позволяющие реализовать этот метод. Предложен метод расчета уплотнения почвы работающим трактором с учетом влияния его колебаний на уплотняющее воздействие на почву.

Для выполнения расчетов этими методами необходимо располагать данными о закономерностях деформирования почвы, эластичных колес трактора, а также его подвески. Ранее нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования по выявлению закономерностей деформирования уплотняющихся связных почв, эластичных тракторных колес, разработаны методы расчета показателей взаимодействия движителей мобильных колесных

машин с почвой при различных законах изменения по глубине начальной плотности почвы [4–7]. Вертикальные реакции почвы на колеса рассчитывали при включении в соответствующие формулы полученного путем обработки экспериментальных данных наших и других исследований множителя $1,1 \leq K_{кл} \leq 1,5$. Тем самым приближенно учитывали влияние вертикальных колебаний осей трактора на показатели взаимодействия трактора с почвой. Расчеты выполняли по разработанным нами компьютерным программам Soil, Modul E, Shina и стандартной программе SGWIN 1.1.

В представленной работе использованы результаты наших предыдущих исследований. По найденным ранее формулам находим показатели уплотнения почвы при работе трактора без учета влияния его колебаний. Результаты наших исследований позволяют также найти по приведенным выше формулам данные о колебаниях трактора. Помимо названных выше и примененных в данной работе компьютерных программ, разработаны и применены для выполнения расчетов компьютерные программы Tractor и Density.

Приняли, что верхний деформирующийся слой почвы, распространенный на глубину H , расположен на практически недеформирующемся основании. Поверхность почвы горизонтальна. Зависимость плотности ρ верхнего слоя почвы до проходов трактора от глубины z приняли квадратичной:

$$\rho(z) = \rho_0 + k_1 z + k_2 z^2, \quad z \in [0; H], \quad (12)$$

где k_1 и $k_2 \neq 0$ – коэффициенты; ρ_0 – свободный член, соответствующий $\rho(0)$ (при $z = 0$). Зависимость (12) получена в результате ста-

тистической обработки экспериментальных данных [4, 6, 7].

При качении колес почва деформируется по гармоническому закону. Экспериментально подтверждено [4–7], что исследованные уплотняющиеся почвы в рассмотренных интервалах ρ и влажности w являются вязкоупругими и при гармоническом законе деформирования их свойства адекватно моделируются для каждого фиксированного z дифференциальным уравнением

$$\sigma'_t + \omega g \sigma = q \varepsilon'_t, \quad (13)$$

где σ – сжимающие напряжения, МПа; ε – относительные деформации сжатия; q , МПа и g – характеристики реологических (вязкоупругих) свойств почвы; ω – круговая частота гармонического процесса деформирования, с^{-1} . Будем моделировать вязкоупругие свойства почв этим уравнением.

Расчеты выполняем следующим образом. По компьютерной программе Soil находим по экспериментальным данным характеристики g и q вязкоупругих свойств почвы при $z = 0$. Путем статистической обработки экспериментальных значений g и q , полученных при различных ρ , ω и w , по компьютерной программе SGWIN 1.1 находим уравнения регрессии $g = g(\rho, \omega, w)$ и $q = q(\rho, \omega, w)$. По компьютерной программе Modul E вычисляем коэффициенты упругости E_{kj} колес при различных вертикальных нагрузках на оси колес и давлениях воздуха в шинах, а также жесткость c_1 и c_2 шин передних и задних колес [5]. По компьютерной программе Shina находим (принимая $K_{\text{кл}} = 1$) для переднего и заднего колес их приведенные радиусы R_p , приведенные угловые скорости колес, величины h_1 и h_2 , приращение плотности и плотность почвы в результате прохода колес.

При определении $x(t)$ и $y(t)$ за начало отсчета t принимаем те моменты времени, в которые нижние точки переднего колеса находятся на глубине h_1 , а заднего – на глубине h_2 . По разработанной нами компьютерной программе Tractor находим вертикальные перемещения осей трактора, вызванные его колебаниями. Используя найденные значения амплитуд колебаний, по компьютерной программе Density определяем уточненные значения показателей уплотнения почвы работающим трактором.

Результаты экспериментальных исследований и компьютерных расчетов. Анализ полученных результатов

Нами проведены опыты на поле экспериментального хозяйства РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева [7]. Почва на этом поле – дерново-подзолистая супесчаная.

Исследовали вязкоупругие свойства почвы, ее уплотнение колесами трактора МТЗ-82 на постоянном пути 30 м, влияние колебаний трактора на уплотнение почвы. Тяговую нагрузку на МТЗ-82 создавал сцепленный с ним трактор Т-25А, которым управлял второй тракторист. Для отдельной оценки уплотнения почвы передние и задние колеса МТЗ-82 были расставлены на разную колею (Т-25А двигался ко колею, отличной от следов переднего трактора). Глубина распространения верхнего деформирующегося слоя почвы $H = 0,9$ м. Перед каждой серией экспериментов дважды выполняли дискование вспаханной почвы на глубину 0,3 м. Провели семь серий опытов. Каждая серия опытов состояла из шести последовательных проходов отдельно переднего и заднего колес трактора.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена квадратичная зависимость (12) плотности ρ верхнего слоя почвы до проходов колес тракторов от глубины z с параметрами: $\rho_0 = 1,1412 \text{ г/см}^3$, $k_1 = 1,8927 \text{ г/(см}^3 \cdot \text{м)}$, $k_2 = -1,1921 \text{ г/(см}^3 \cdot \text{м}^2)$ (при $w = 15\%$). Корреляционное отношение для этой зависимости равно 0,9823.

Нашли ρ и w почвы перед опытами в слоях 0–0,1; ..., 0,8–0,9 м, а также после первого, второго, пятого и шестого проходов переднего и заднего колес в каждой серии опытов. Измерения проводили при работе трактора МТЗ-82 на I, II, IV, VI и VII передачах.

Во всех опытах определяли нормальные напряжения $\sigma_{pj}(t)$ в продольной плоскости симметрии переднего и заднего колес трактора, распределенные вдоль линии контакта колеса и почвы. На осциллограммы записаны: эпюры $\sigma_{pj}(t)$, отметки нижнего положения датчиков давления; $P_{\text{кр}}$ – сила тяги на крюке трактора; отметки времени через каждые 0,01 с. Полученные экспериментальные данные обработаны статистически.

Рассматривали колебания трактора, обусловленные неровностями пути. В связи с тем, что перед опытами почва была дважды продискована, неровности на ее поверхности были небольшими. Как и в работе [12], приняли, что неровности имеют равномерный закон распределения, плотность вероятности которого одинакова на всем том участке поля, на котором проводились испытания.

С использованием полученных в наших опытах экспериментальных данных выполнены с учетом колебаний $x(t)$ и $y(t)$ осей трактора МТЗ-82 расчеты показателей уплотнения почвы при проходах этого трактора. Передняя подвеска МТЗ-82 пред-

ставляет собой упругие листовые рессоры, амортизаторов на этой подвеске нет. Поэтому в расчетах приняли $\eta = 0$.

Расчетные значения плотности почвы $\rho_p(0,05)$ в слое 0–0,1 м сопоставлены с экспериментальными $\rho_{\text{э}}(0,05)$. Среднее относительное отклонение расчетных $\rho_p(0,05)$ и экспериментальных $\rho_{\text{э}}(0,05)$ значений плотности почвы, полученных по результатам проведенных опытов, равно 6,3%; стандарт этих отклонений составляет 3,8%. Относительные отклонения $\rho_p(0,05)$ от $\rho_{\text{э}}(0,05)$ находятся в пределах погрешностей экспериментальных данных. Это показывает, что предложенный метод может быть рекомендован для расчета уплотнения почвы с учетом влияния колебаний трактора.

Результаты компьютерных экспериментов по исследованию колебаний трактора Т-150К при работе на почве. Анализ полученных результатов

С использованием полученных экспериментальных данных о свойствах исследованной дерново-подзолистой супесчаной почвы выполнены компьютерные расчеты вертикальных колебаний $x(t)$ и $y(t)$ осей трактора Т-150К.

Экспериментальное исследование взаимодействие движителей трактора Т-150К с почвой проведено в РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева совместно с научными сотрудниками ОАО «НАТИ» [11]. Нами выполнены расчеты с использованием данных, приведенных в технической характеристике примененного в этих экспериментах трактора. Трактор Т-150К тягового класса 30 кН с эксплуатационной массой 8400 кг имеет четыре ведущих колеса одинакового диаметра, радиус колеса $R = 0,7$ м; колеса снабжены шинами 21,3R24. Внутреннее давление воздуха в шинах передних и задних

колес соответственно равно: 0,12 и 0,1 МПа. Массы, приходящиеся на переднюю и заднюю полуоси, соответственно равны: $m_1 = 2060$, $m_2 = 1600$ кг.

Подвеска трактора полужесткая; задний мост жестко соединен с рамой. Передний мост подвешен на двух продольных полуэллиптических листовых рессорах. Кроме того, подвеска трактора Т-150К снабжена гидравлическими амортизаторами, работающими совместно с рессорами. Жесткость рессоры $c_p = 560$ кН/м [2]. Коэффициент демпфирования амортизатора $\eta = 300$ Н·с/м.

Согласно данным из работы [12] приняли, что неровности на поверхности дважды продискованной почвы имеют равномерный закон распределения. Вынужденные вертикальные колебания трактора вызываются гармоническими колебаниями вертикальных реакций почвы на движущиеся колеса; амплитуды возмущающих сил равны p_j . Круговые частоты ω_j колебаний возмущающих сил зависят от скорости v трактора и приведенных угловых скоростей колес [10, 12]. С увеличением v частоты ω_j увеличиваются. Считая, что на участке поля длиной 1 м в среднем встречается одна неровность, приняли, что частоты ω_j приближенно равны приведенным угловым скоростям колес. С использованием полученных экспериментальных данных выполнили компьютерные расчеты вертикальных колебаний $x(t)$ и $y(t)$ осей трактора и построили графики, характеризующие колебания осей. Полученные зависимости $x(t)$ и $y(t)$ удовлетворяют начальным условиям (3) рассмотренной задачи. На рис. 1 представлены построенные с помощью компьютерной программы Graph графики при $v = 1,1$ м/с (коэффициенты буксования колес $\delta_1 = 0,1$ и $\delta_2 = 0,09$; амплитуды возмущающих сил $p_1 = 0,055$ и $p_2 = 0,05$ кН):

$$\begin{aligned} x &= 9,08e^{-0,0577t} \sin(0,5555t - 0,9604) - 0,99 \sin(1,4960t) - \\ &\quad - 0,1 \sin(1,4795t) - 0,04 \cos(1,4960t); \\ y &= y(t) - 7,22 = 14,75e^{-0,0577t} \sin(0,5555t - 0,9604) - 0,07 \sin(1,4960t) - \\ &\quad - 1,59 \sin(1,4795t) - 0,06 \cos(1,4960t) - 0,01 \cos(1,4795t). \end{aligned} \quad (14)$$

Нулевые линии графиков, характеризующих колебания обеих осей, совмещены. Для этого выполнен параллельный перенос горизонтальной оси графика, описывающего колебания задней оси, на величину D . В результате расчетов получено, что в рассмотренных случаях свободные колебания затухают весьма быстро, время их затухания $t \leq 50$ с.

Помимо расчетов, выполненных по исходным данным полевых испытаний, нами

проведено четыре серии компьютерных экспериментов, в которых исследовали влияние на вертикальные колебания осей трактора Т-150К скорости трактора, частоты возмущающих сил, амплитуд возмущающих сил, коэффициента демпфирования амортизаторов. По результатам компьютерных экспериментов найдены по программе SGWIN 1.1 уравнения регрессии, характеризующие зависимости исследуемых показателей от названных факторов.

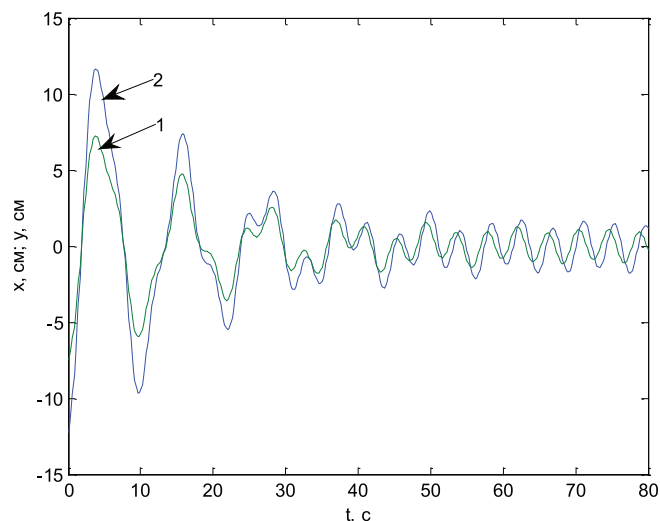


Рис. 1. Вертикальные колебания передней (1) и задней (2) осей трактора T-150K при его движении по почве со скоростью $v = 1,1$ м/с

Для исследования влияния скорости трактора на его вертикальные колебания провели семь опытов, в которых принимали $v = 0,9; 1,1; 1,5; 2; 2,5; 3$ и $3,5$ м/с. Остальные факторы в этих опытах сохра-

няли постоянными (их значения приведены в тексте статьи). На рис. 2 даны графики, характеризующие колебания осей трактора при $v = 3$ м/с ($\delta_1 = 0,1; \delta_2 = 0,09; p_1 = 0,055$ и $p_2 = 0,05$ кН).

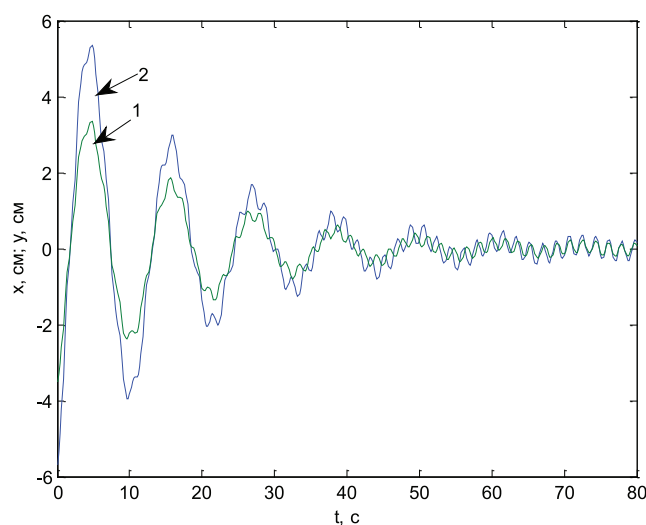


Рис. 2. Вертикальные колебания передней (1) и задней (2) осей трактора T-150K при его движении по почве со скоростью $v = 3$ м/с

Сопоставление графиков, приведенных на рис. 1 и 2, а также других результатов расчетов показывает, что с ростом v в рассмотренном интервале изменения скоростей амплитуды свободных и вынужденных колебаний уменьшаются. Полученные результаты соответствуют опубликованным данным [1, 8].

Суммарные амплитуды вынужденных колебаний A_s и B_s соответственно передней и задней осей трактора представляют собой суммы амплитуд гармоник, представленных

ных алгебраической суммой со второго по последнее из слагаемых в правых частях каждой из двух формул (11). Найдены уравнения регрессии, характеризующие зависимости A_s и B_s от v . При $p_2 = 50$ Н, $\mu = 300$ Нм получили: $B_s = 2,2822/v - 0,5512$, см; корреляционное отношение равно 0,9776.

Для исследования влияния круговой частоты возмущающей силы на B_s провели семь однофакторных опытов, в которых принимали $\omega_2 = 1,34; 1,48; 2,02; 2,48; 3,14; 3,44$ и $3,74$ с⁻¹. Найдены уравнения регрес-

сии, характеризующие зависимости B_s от ω_2 . При $p_2 = 50$ Н, $\mu = 300$ Н·с/м получили: $B_s = 3,7/\omega_2 - 0,87$, см. Корреляционное отношение этой зависимости равно 0,9618. Высокие корреляционные отношения во всех найденных уравнениях регрессии свидетельствуют о большой точности определения результативных факторов по этим уравнениям.

Найдены уравнения регрессии, характеризующие зависимости амплитуд A_s и B_s вынужденных вертикальных колебаний осей трактора от амплитуд возмущающих сил ($p_1 \in [0; 55]$ и $p_2 \in [0; 50]$ Н). Получили, что A_s и B_s возрастают пропорционально возрастанию амплитуд p_j . При $v = 1,1$ м/с, $\mu = 300$ Н·с/м нашли следующие уравне-

ния регрессии: $A_s = 0,02p_1$, см; $B_s = 0,03p_2$, см с коэффициентами корреляции 0,9994 и средними квадратическими отклонениями 0,0069 данных отдельных опытов от результатов расчетов по уравнениям регрессии.

Выполнили компьютерные эксперименты при различных значениях коэффициента демпфирования амортизатора. В расчетах принимали $\eta = 300; 1400; 2800$ Н·с/м и $\eta = 0$ (то есть рассматривали работу трактора без амортизаторов на передней подвеске); остальные параметры в опытах оставались постоянными: $v = 2$ м/с, $p_1 = 55$ Н, $p_2 = 50$ Н, $\delta_1 = 0,1$ и $\delta_2 = 0,09$. На рис. 3, а, б представлены графики, описывающие колебания x и y осей трактора при $\eta = 2800$ Н·с/м (а) и $\eta = 0$ (б).

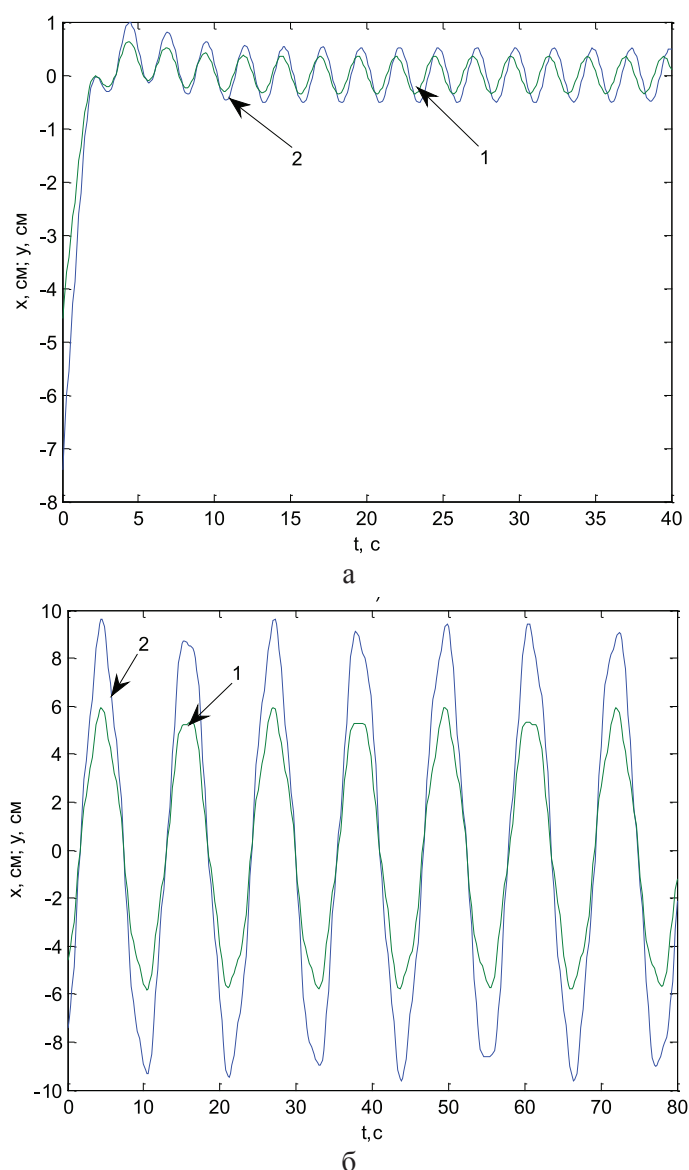


Рис. 3. Влияние коэффициента демпфирования амортизатора на вертикальные колебания передней (1) и задней (2) осей трактора Т-150К при его движении по почве;
а – $\eta 2800$ Н·с/м; б – $\eta = 0$

Как видно из рис. 3, амортизатор оказывает влияние на свободные и на вынужденные колебания трактора. При $\eta = 0$ свободные колебания осей трактора не затухают; в этом случае они представляют собой гармонические колебания. Свободные гармонические колебания описываются синусоидами с круговой частотой n , которая находится по формуле (9). Суммарные амплитуды свободных и вынужденных колебаний осей трактора $A_{\text{полн}}$ и $B_{\text{полн}}$ при $\eta = 0$ с течением времени не изменяются. При $\eta > 0$ после весьма быстрого затухания свободных колебаний остаются только вынужденные колебания, их амплитуды A_s и B_s значительно меньше амплитуд $A_{\text{полн}}$ и $B_{\text{полн}}$ колебаний, возникающих при работе трактора без амортизаторов. Предложенный метод расчета позволяет рассчитать путем выявить влияние амортизаторов и их коэффициентов демпфирования на амплитуды вертикальных колебаний осей трактора.

Сиденье водителя расположено над задним мостом трактора, поэтому колебания места крепления сиденья соответствуют колебаниям остова трактора над задним мостом. Поскольку свободные вертикальные колебания осей трактора с амортизаторами на передней подвеске быстро затухают, то колебания сиденья водителя практически на всем пути работы трактора определяют вынужденные колебания его задней оси. Таким образом, в рассмотренных интервалах изменения влияющих факторов увеличение скорости трактора при постоянной амплитуде возмущающей силы приводит к уменьшению амплитуды колебаний кабины водителя и к возрастанию частоты этих колебаний.

Получены расчетные данные, характеризующие влияние скорости трактора на изменение суммарных амплитуд A_s и B_s вертикальных вынужденных колебаний передней и задней осей трактора Т150-К и на изменение амплитуд их слагаемых гармоник (таблица).

Влияние скорости трактора на суммарные амплитуды вертикальных вынужденных колебаний передней и задней осей трактора Т150-К и на амплитуды их слагаемых гармоник

Амплитуды A_s и B_s и амплитуды слагаемых гармоник, см	v , м/с						
	0,9	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
A_s	1,40	1,10	0,56	0,36	0,21	0,17	0,15
A_1	1,21	0,99	0,52	0,34	0,21	0,17	0,15
A_2	0,15	0,10	0,03	0,01	0	0	0
A_3	0,07	0,04	0,01	0	0	0	0
A_4	0,01	0	0	0	0	0	0
B_s	2,1	1,5	0,81	0,53	0,32	0,27	0,23
B_1	0,11	0,07	0,02	0,01	0	0	0
B_2	1,98	1,59	0,81	0,94	0,32	0,27	0,23
B_3	0,11	0,06	0,01	0	0	0	0
B_4	0,01	0,01	0	0	0	0	0

Из таблицы видно, что при увеличении v амплитуды A_s и B_s , а также A_j и B_j снижаются. На вынужденные колебания передней оси основное влияние оказывает слагаемое с амплитудой A_1 , это слагаемое имеет круговую частоту колебаний ω_1 . На вынужденные колебания задней оси основное влияние оказывает слагаемое с амплитудой B_2 , это слагаемое имеет круговую частоту колебаний ω_2 . При увеличении v число слагаемых гармоник уменьшается. При $v \geq 2,5$ м/с вынужденные колебания каждой осей имеют только по одной гармонике: A_1 — для передней и B_2 — для задней оси. Это означает, что колебания осей становятся взаимно независимыми.

Выводы

1. Предложена математическая модель задачи определения вертикальных колебаний передней и задней осей колесного трактора с вязкоупругой передней подвеской.

2. Предложен метод расчета вертикальных колебаний осей колесного трактора с вязкоупругой передней подвеской, работающего на уплотняющейся связной почве. Разработаны позволяющие реализовать этот метод компьютерные программы.

3. Предложен метод расчета показателей уплотнения вязкоупругой почвы при проходах колесного трактора, в котором учитывается влияние вертикальных колебаний осей трактора на его уплотняющее

воздействие на почву. Результаты расчетов этим методом достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

4. Посредством компьютерных экспериментов показано, что в рассмотренных интервалах изменения влияющих факторов амплитуды вынужденных вертикальных колебаний каждой из осей трактора снижаются, если:

- увеличивается скорость трактора;
- увеличиваются круговые частоты колебаний возмущающих сил, действующих на колеса трактора;
- уменьшаются амплитуды возмущающих сил, действующих на колеса трактора.

5. Посредством компьютерных экспериментов показано, что величина коэффициента демпфирования амортизаторов, расположенных на передней подвеске, оказывает существенное влияние на свободные и на вынужденные колебания трактора. При работе без амортизаторов свободные колебания осей трактора не затухают. Если передняя подвеска трактора снабжена амортизаторами, то после весьма быстрого затухания свободных колебаний остаются только вынужденные колебания. При этом суммарные амплитуды вынужденных колебаний значительно меньше суммарных амплитуд колебаний, возникающих при работе трактора без амортизаторов. Предложенный метод расчета позволяет расчетным путем выявить влияние амортизаторов и их коэффициентов демпфирования на амплитуды вертикальных колебаний осей трактора.

6. В результате компьютерных экспериментов получено, что увеличение скорости трактора в рассмотренном интервале ее изменения приводит к уменьшению амплитуд и числа слагаемых гармоник в каждой из суммарных амплитуд вынужденных колебаний. Расчеты показали, что в рассмотренных интервалах изменения влияющих факторов при $v \in [2,5; 3,5]$ м/с колебания передней и задней осей трактора Т-150К становятся взаимно независимыми.

7. Полученные результаты могут быть использованы для выбора рациональных режимов работы тракторов и машинно-тракторных агрегатов при выполнении технологических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур.

Список литературы

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Дрофа, 2004. – 592 с.
2. Барский И.Б. Конструирование и расчет тракторов. – М.: Машиностроение, 1980. – 337 с.
3. Бахтеев Р.Х. Влияние колебаний колесного трактора на величину давлений шины на почву (на примере трактора Т-150К): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВИМ, 1985. – 20 с.
4. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв: Математическое моделирование. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 144 с.
5. Золотаревская Д.И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВИСХОМ, 1997. – 49 с.
6. Золотаревская Д.И. Особенности качения колес по вязкоупругой почве // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 8. – С. 22–26.
7. Золотаревская Д.И., Иванцова Н.Н., Лядин В.П. Математическое моделирование деформирования почв при качении колес // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 5. – С. 28–33.
8. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Т. 1. – М.: Физматлит, 2007. – 704 с.
9. Ксеневич И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
10. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. – М.: КолосС, 2004. – 504 с.
11. Оценка уплотняющего воздействия на почву и сопротивления движению трактора с резиноармированной гусеницей / Бейненсон В.Д. и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2006. – № 6. – С. 16–18.
12. Скотников В.А., Машенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
13. Тракторы: Теория. / В.В. Гуськов и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 375 с.