

МЕХАНИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 1, 1989 год

УДК 631.372:631.431.2

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Д. И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ, В. И. БУРДЫКИН, В. В. МАТВЕЕВ,
В. Г. ТРУШИН, В. П. ЛЯДИН

(Кафедра высшей математики, кафедра тракторов, автомобилей и ЭМТП)

Приводятся результаты исследований процесса уплотнения вспаханной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и изменения ее вязкоупругих (реологических) свойств при последовательных проходах по одному и тому же следу колесного трактора. Экспериментально подтверждена пригодность для описания вязкоупругих свойств данной почвы дифференциального уравнения первого порядка, связывающего сжимающие напряжения и скорости изменения сжимающих напряжений и относительной осадки почвы. Показаны достоинства практического применения этого определяющего уравнения. По предлагаемой методике найдены характеристики вязкоупругих свойств почвы. Выявлено влияние вертикальной нагрузки на оси колес, давления воздуха в шинах, скорости трактора и степени предварительного уплотнения почвы на показатели уплотняющего воздействия на почву трактора и закономерности деформирования почвы во времени.

Для разработки рекомендаций по снижению уплотняющего воздействия на почву колесных сельскохозяйственных тракторов и повышению их тягово-сцепных свойств необходимо располагать данными о закономерностях деформирования почв во времени в различных условиях нагружения. Зависимости между изменяющимися во времени напряжениями и деформациями уплотняющихся почв отражают вязкоупругие свойства этих почв. Последние выявлены в ряде работ при обработке данных лабораторных опытов, а также полевых испытаний, в которых проводилось уплотнение почв колесами тракторов [3—5]. На основе вязкоупругих математических моделей деформирования уплотняющихся почв могут быть получены более обоснованные теоретически и более точные формулы для определения показателей взаимодействия движителей машин и почвы, чем при применении моделей, не включающих в себя время.

Нами проведено исследование, цель которого — выявить влияние проходов трактора и параметров его ходовой системы на уплотнение почвы, ее вязкоупругие свойства и определить характеристики вязкоупругих свойств почвы.

Эксперименты проведены на опытном поле Тимирязевской академии в Москве. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая (по классификации Н. А. Качинского), в слое 0—0,1 м содержание частиц размером 1—0,25, 0,25—0,05, 0,05—0,01, 0,01—0,005, 0,005—0,001 и <0,001 мм составляет соответственно 22,2; 13,6; 35,1; 9,5; 7,7 и 11,9 %. Глубина залегания горизонтов $A_{\text{пах}}$, A_2 , A_2B и B равняется соответственно 0—0,35, 0,35—0,45, 0,45—0,60, 0,60—1 м, BC — от 1 м. Перед опытами почва была вспахана и проборонована на глубину 0,35 м.

Проведено 12 серий опытов. В каждой из них выполнялось по 6 последовательных проездов по одному и тому же следу трактора МТЗ-82 на постоянном пути $S=30$ м. На передних и задних колесах трактора были установлены соответственно шины 11,2—20 мод. Ф-305 и перспективные шины 16,9R38 мод. Ф-52. Исследовалось уплотнение почвы раздельно передними и задними колесами, поэтому они были расставлены на различную колею.

Уплотнение почвы задними колесами трактора МТЗ-82 с шинами 16,9R38
(при $G=11,65$ кН, $p_w=0,11$ МПа)

Передача	Средняя за серию опытов скорость трактора v , км/ч	Слой почвы, м	Влажность почвы ω , %	Плотность почвы, г/см ³		
				до проходов трактора (контроль)	после 1-го прохода	после 6-го прохода
II	4,80	0—0,1	18,37	1,22	1,55	1,58
		0,1—0,2	19,03	1,40	1,56	1,62
		0,2—0,3	18,61	1,56	1,58	1,67
IV	9,50	0—0,1	18,37	1,22	1,43	1,57
		0,1—0,2	19,03	1,40	1,45	1,58
		0,2—0,3	18,61	1,56	1,58	1,64
VII	14,80	0—0,1	18,37	1,22	1,40	1,43
		0,1—0,2	19,03	1,40	1,45	1,47
		0,2—0,3	18,61	1,56	1,60	1,60

В каждой серии опытов сохранялись постоянными вертикальные нагрузки на переднюю и заднюю полуоси трактора, давление воздуха p_{w_1} и p_{w_2} в шинах передних и задних колес, передача, на которой двигался трактор. В каждом опыте трактор двигался с максимально возможной для данной передачи постоянной скоростью. Продольная база трактора $L=2,45$ м, расстояние центра масс от задней оси $x_{ц}=0,84$ м. Эксплуатационная масса трактора равна 3970 кг.

Давление воздуха в шинах: $p_{w_1}=0,11, 0,17$ и $0,26$ МПа; $p_{w_2}=0,09, 0,11$ и $0,25$ МПа; вертикальные нагрузки на оси передних и задних колес трактора: $G_1=5,46$ и $6,08$ кПа, $G_2=11,65$ и $17,49$ кПа. Изменение вертикальных нагрузок на оси достигалось путем балластирования трактора — передней и задней навески дополнительных грузов. Измерения проводили при движении трактора на II, IV, VI и VII передачах. В каждой серии опытов определяли влажность и плотность почвы перед 1-м, а также после 1-го, 5-го и 6-го проходов отдельно переднего и заднего колес, а для переднего колеса — дополнительно плотность и влажность почвы после 2-го прохода. Влажность почвы в слое 0—0,1 м изменялась в интервале $\omega=16,3 \div 25,5$ %. В табл. 1 приведены данные об уплотнении почвы задними колесами трактора в 3 сериях опытов при $G_2=11,65$ кН, $p_w=0,11$ МПа.

При обработке экспериментальных данных о плотности почвы ρ до и после проходов трактора было принято, что зависимость ρ (г/см³) от глубины x (м) описывается уравнением

$$\rho(x) = \rho_0 + ax, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность почвы на ее поверхности при $x=0$; a — коэффициент. В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов определены параметры ρ_0 и a уравнения (1). По данным табл. 1, начальная плотность почвы до проходов колес $\rho_0=1,1383$, $a=1,7$; после 1-го прохода заднего колеса $\rho_0=1,5409$, $a=0,15$. Значения ρ_0 и a зависимости (1) перед проходом колеса для некоторых опытов даны в табл. 2. Отклонения рассчитанных по уравнению (1) значений плотности почвы на различной глубине при x 0,05, 0,15 и 0,25 м от соответствующих экспериментальных значений для большинства данных не превышают 2 %. Выборочный коэффициент корреляции для всех полученных в эксперименте зависимостей ρ от x $R_{\text{корр}} > 0,92$. Это указывает на существование тесной линейной корреляционной зависимости $\rho(x)$, следовательно, линейный закон (1) можно использовать для описания изменения плотности почвы по глубине пахотного слоя.

Вязкоупругие свойства почв обычно исследуют при их статическом или динамическом деформировании. В первом случае их изучают путем обработки кривых ползучести или кривых релаксации напряжений, во

втором — при помощи математической обработки петель гистерезиса или других кривых, отражающих связи между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении и разгрузении почвы с заданными скоростями деформирования. В качестве деформирующего почву штампа можно использовать катящееся с заданной скоростью колесо, а в качестве необходимых для исследования свойств почвы кривых — эпюры напряжений на поверхности контакта колеса и почвы.

Во всех опытах определяли нормальные напряжения в продольных плоскостях симметрии колес трактора, распределенные вдоль линий контакта колес и почвы. Нормальные контактные напряжения измеряли тензометрическими датчиками давления мембранного типа. Датчики (по одному на каждое колесо) были смонтированы в почвозащепе переднего и заднего колес правой стороны трактора. На осциллограммы были записаны эпюры нормальных контактных напряжений на колесах, отметки нижнего положения соответствующих датчиков, отметки времени через каждые 0,1 с.

Опыты проведены на холостом ходу трактора с выключенным передним мостом. Дополнительно сделан ряд аналогичных опытов с включенным передним мостом. Сопоставление полученных результатов показало, что в условиях опытов моменты на колесах практически не влияют на значения нормальных контактных напряжений.

Ранее нами было показано [6], что эластичные колеса с шинами 11,2-20 и 16,9R38 при качении деформируются как практически упругие. На рис. 1 дана схема для определения размеров поверхности контакта упругого колеса и вязкоупругой почвы при условии, что эластичное колесо радиуса R катится по горизонтально расположенному слою почвы. Схема соответствует продольному вертикальному сечению колеса, проходящему через середину ширины профиля шины.

Таблица 2
Показатели взаимодействия с дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой колес трактора МТЗ-82 и характеристики свойств почвы

№ колеса*	Показатели взаимодействия										Характеристики свойств почвы							
	G, кН	$P_{ш}$, МПа	v , м/с	ω , с ⁻¹	δ , %	№ прохода	$\Phi_{в}$, град	$\Phi_{а}$, град	$R_{пр}$, м	$\sigma_{т}$, МПа	$E_{ш}$, МН/м ²	h_0 , см	$h_{обр}$, см	ρ_0 , г/см ³	a	ω^{**} , %	g	q, МПа
2	11,65	0,11	2,34	3,47	2,92	1	31,81	-12,14	0,9432	0,27	38,83	10,77	1,34	1,1383	1,70	18,37	5,298	6,397
2	17,49	0,11	2,12	3,23	2,20	1	34,38	-14,14	1,0194	0,36	26,08	12,16	1,47	1,3025	1,45	16,26	5,300	7,700
2	11,65	0,09	1,14	1,66	1,85	1	30,11	-12,13	0,9842	0,26	30,13	9,49	1,20	1,2850	1,30	17,96	5,710	6,426
1	6,08	0,11	1,14	3,23	-3,64	1	28,71	-10,71	0,5500	0,13	40,75	5,20	0,62	1,2850	1,30	17,96	6,039	6,731
1	6,08	0,11	1,43	2,85	-2,14	6	16,64	-13,02	0,6900	0,19	40,75	0,81	0,79	1,5792	0,26	17,96	2,870	15,695
2	11,65	0,09	1,43	1,71	0,74	6	16,75	-13,92	1,3374	0,34	30,13	1,10	1,36	1,5792	0,25	17,96	2,700	15,240

* 1 — переднее колесо, 2 — заднее колесо.

** Влажность почвы в слое 0—0,1 м.

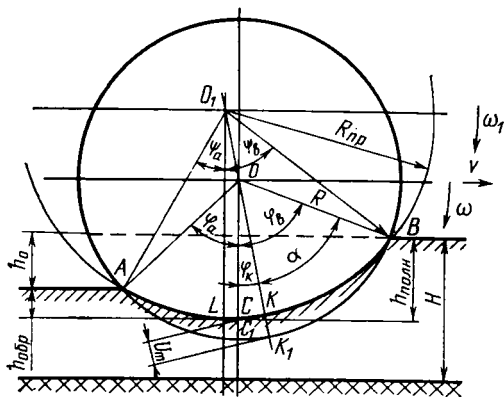


Рис. 1. Схема для определения размеров поверхности контакта эластичного колеса и почвы.

Поверхность контакта колеса и почвы на схеме представлена линией контакта — дугой, проходящей через точки B , K и A . В точках B и A входа колеса в контакт с почвой и выхода из этого контакта деформации шины и почвы равны нулю. Размеры контактной поверхности эластичного колеса характеризуются углами $\varphi_b = \angle BOC$ (угол набегания колеса) и $\varphi_a = \angle AOC$ (угол сбегания колеса); $\varphi_b > 0$, $\varphi_a < 0$. Радиальная деформация шины достигает максимального значения $u_m = KK_1$ в точке K ; $\angle BOK = \angle AOK = (\varphi_b + |\varphi_a|)/2 = \alpha$. Расположение точки K по отношению к вертикальной оси OC характеризуется углом $\varphi_k = (\varphi_b - |\varphi_a|)/2$. Линия контакта колеса и почвы приближенно принята дугой окружности, проходящей через точки A , K и B . Назовем радиус R_{np} этой окружности приведенным радиусом эластичного колеса. Жесткое колесо радиуса R_{np} (условное колесо) оказывает на почву такое же результирующее деформирующее воздействие, как эластичное колесо с наружным диаметром шины $D = 2R$. Размеры поверхности контакта условного жесткого колеса и почвы характеризуются углами $\psi_b = \angle BO_1L$ и $\psi_a = \angle AO_1L$ ($\psi_b > 0$, $\psi_a < 0$).

В каждом опыте на осциллограммах было записано по 9—11 эпюр нормальных (радиальных) контактных напряжений σ_p на переднем и по 5—7 эпюр на заднем колесе трактора. На рис. 2 представлены наложенные друг на друга некоторые из экспериментальных эпюр $\sigma_p(\varphi)$, где φ — текущее значение угла контакта колеса и почвы. Эпюры, соответствующие одному проходу колеса на почве, представляют собой результаты параллельных опытов, в которых определялись характеристики взаимодействия колес и почвы и характеристики вязкоупругих свойств почвы. Результаты этих опытов обработаны статистически.

При обработке осциллограмм для каждого опыта определены время опыта t_{on} и скорость v равномерного движения трактора на пути $S = 30$ м. Для переднего и заднего колес по статистическим данным в каждом опыте найдены угловая ω и окружная $v_b = \omega R$ скорости, буксование колеса δ , средние время набегания на почву t_b и сбегания t_a колеса, значения углов $\varphi_b = \omega t_b$ и $\varphi_a = \omega t_a$, значения нормальных контактных напряжений $\sigma_p(\varphi)$. Были построены эмпирические линии регрессии вертикальных составляющих нормальных контактных напряжений $\sigma(\psi) = \sigma_p(\psi) \cos \psi$ для условного жесткого колеса, равные напряжениям сжатия почвы при его качении. В табл. 2 приведены данные, полученные при статистической обработке результатов некоторых опытов, которые характеризуют взаимодействие с почвой колес трактора и уплотнение почвы.

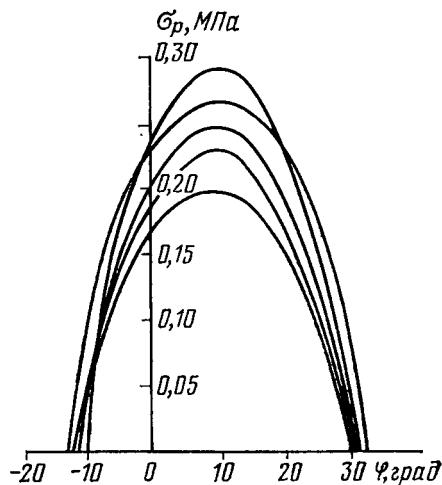


Рис. 2. Экспериментальные эпюры нормальных контактных напряжений на заднем колесе трактора с шиной 16,9R38.

$G = 11,65$ кН; $p_w = 0,09$ МПа; $v = 1,14$ м/с, 1-й проход по почве, $\rho_0 = 1,285$ г/см³.

Полученные в опытах эпюры нормальных контактных напряжений $\sigma_p(\varphi)$ представляют собой кривые с одним максимумом, симметричные относительно вертикальной оси, соответствующей на рис. 1 радиусу ОК. Это подтверждает данные, что деформации колес с шинами 11,2-20 и 16,9R38 в заданных интервалах изменения вертикальных нагрузок на оси колес и давлений воздуха в шинах являются практически упругими [6]. Во всех опытах $|\varphi_a| > 0$, что свидетельствует о возникновении в почве при качении колес обратимых деформаций. Угол $\varphi_b > |\varphi_a|$, причем разность $\varphi_b - |\varphi_a|$ при качении по рыхлой почве больше, чем при качении по более плотной почве. Это говорит о протекании в почве вязкоупругих деформаций. Если колесо катится по сильно уплотненной почве, то $|\varphi_a| \approx |\varphi_b|$, т. е. свойства почвы близки к упругим.

Эпюры нормальных контактных напряжений были использованы для определения характеристик вязкоупругих свойств почвы. Методика определения этих характеристик основывается на следующем.

В заданных интервалах изменения напряжений закономерность деформирования использованных в опытах эластичных колес описывается уравнением

$$\sigma(\varphi) = E_{ш} h_{ш}(\varphi), \quad (2)$$

где $E_{ш}$ — коэффициент упругости шины; $h_{ш}(\varphi)$ — деформация вертикального сжатия шины в произвольной точке линии контакта, определяется без учета вертикального смещения под действием вертикальной нагрузки оси колеса; $h_{ш}(\varphi_a) = h_{ш}(\varphi_b) = 0$ [6].

Коэффициент упругости шины данной конструкции может быть определен расчетным путем в зависимости от ее параметров, вертикальной нагрузки на ось колеса и давления воздуха в шине.

Вязкоупругие свойства уплотняющихся почв могут быть приближенно описаны уравнением

$$d\sigma/dt + p\sigma = q(d\varepsilon/dt). \quad (3)$$

В уравнении (3) σ , ε — напряжения сжатия и относительная деформация сжатия почвы; t — время; p , q — характеристики вязкоупругих свойств почвы [2].

Зная значение σ_{mp} максимального нормального напряжения σ_p в зоне контакта колеса и почвы и коэффициент упругости шины $E_{ш}$, из уравнения (2) определим максимальное значение радиальной деформации шины

$$u_m = \sigma_{mp}/E_{ш} \quad (4)$$

при $u_m = h_{ш}(\varphi_k)/\cos\varphi_k$.

По известным значениям u_m , φ_b , φ_a определим приведенный радиус R_{np} эластичного колеса. Значения R_{np} находим из уравнения

$$R_{np} = R - u_m + \sqrt{R_{np}^2 - R^2 \sin^2 \alpha} - R \cos \alpha. \quad (5)$$

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

$$\psi = \arcsin \left[\frac{R}{R_{np}} \sin \varphi + \frac{1}{R_{np}} \left(\sqrt{R_{np}^2 - R^2 \sin^2 \alpha} - R \cos \alpha \right) \sin \varphi_k \right]. \quad (6)$$

При $\varphi = \varphi_b$ и $\varphi = \varphi_a$ по формуле (6) находим углы ψ_b и ψ_a , характеризующие размеры линии контакта с почвой условного жесткого колеса. Угол $\psi = \psi_b - \omega_1 t$, где $\omega_1 = \omega R/R_{np}$ — угловая скорость жесткого колеса радиуса R_{np} .

По известным значениям углов φ , соответствующих им углов ψ и напряжений $\sigma(\varphi) = \sigma_p(\varphi) \cos \varphi$ построим эпюры напряжений $\sigma(\psi)$. Эпюры контактных напряжений $\sigma(\psi)$ характеризуют вязкоупругие свойства почвы.

Относительная деформация сжатия почвы на ее поверхности

$$\varepsilon = h(\psi)/H = R_{np}(\cos \psi - \cos \psi_a)/H, \quad (7)$$

где $h(\psi)$ — абсолютное значение деформации сжатия почвы; H — глубина ее распространения.

Учитывая, что $\psi = \psi_b - \omega_1 t$, исходя из (7), найдем общее решение уравнения (3)

$$\sigma(\psi) = \frac{qR_{np}}{H(g^2 + 1)} (Ce^{-g(\psi_b - \psi)} + \cos \psi + g \sin \psi), \quad (8)$$

где C — произвольная постоянная; $g = p/\omega_1$ — безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы.

Используя условия $\sigma(\psi_b) = 0$ и $\sigma(\psi_a) = 0$, после исключения произвольной постоянной C получим

$$e^{-g\psi_b} (\cos \psi_b + g \sin \psi_b) - e^{-g\psi_a} (\cos \psi_a + g \sin \psi_a) = 0. \quad (9)$$

При известных значениях углов ψ_b и ψ_a из выражения (9) можно определить параметр g .

Характеристика вязкоупругих свойств почвы q находится после определения значения g путем обработки экспериментальных значений $\sigma(\psi)$ методом наименьших квадратов. Теоретическая линия регрессии напряжений сжатия почвы задается уравнением (8). Незвестный параметр теоретической линии регрессии напряжений $\sigma(\psi)$ определяется по формуле

$$q = \left[H(g^2 + 1) \sum_{i=1}^n \sigma_s(\psi_i) \right] / \left[R_{np} \sum_{i=1}^n (Ce^{-g(\psi_b - \psi_i)} + \cos \psi_i + g \sin \psi_i) \right], \quad (10)$$

где $\sigma_s(\psi_i)$ — значение напряжения сжатия почвы в i -й точке эмпирической линии регрессии эпюр вертикальных контактных напряжений на условном жестком колесе; n — число измерений $\sigma_s(\psi_i)$.

По описанной методике были выполнены расчеты с использованием данных проведенных опытов. В результате определены параметры $p = \omega_1 g$ и q уравнения (3). В процессе выполнения расчетов методом хорд получены численные решения уравнений (5) и (9). Погрешности определения R_{np} и g соответственно $\varepsilon_1 < 10^{-5}$ и $\varepsilon_2 < 10^{-4}$.

На рис. 3 даны эмпирические и теоретические линии регрессии напряжений $\sigma(\psi)$ для некоторых опытов. Проведена проверка адекватности описания напряжений $\sigma(\psi)$ уравнением (8) по критерию Фишера при 5% уровне значимости. Значения критерия Фишера, рассчитанные по экспериментальным данным, для всех опытов меньше соответствующих табличных значений, поэтому с соответствующей доверительной вероятностью уравнение (8) можно считать адекватным. Это подтверждает пригодность уравнения (3) для моделирования закономерности деформирования исследовавшейся почвы.

В табл. 2 приведены некоторые из значений g и q , полученных при обработке экспериментальных эпюр $\sigma_p(\psi)$ на переднем и заднем колесах трактора при различных значениях вертикальных нагрузок на оси колес, давления воздуха в шинах, плотности почвы перед проходом колеса. Расчеты показали, что параметры g и q не зависят от геометрических размеров шины (наружный диаметр, ширина профиля) и других параметров колес и вертикальных нагрузок на их оси (расхождения расчетных данных не превосходят погрешностей экспериментальных данных), а определяются плотностью почвы. Таким образом, найденные по использованной в работе методике величины g и q являются характеристиками вязкоупругих свойств почвы и могут применяться в расчетах при определении уплотняющего воздействия на почву сопротивления качению и тяговых свойств тракторов и других мобильных машин.

Одним из показателей уплотняющего воздействия колес на почву является остаточная после их прохода осадка почвы h_o . Как видно из рис. 1,

$$h_o = R (\cos \varphi_a - \cos \varphi_b) = R_{np} (\cos \psi_a - \cos \psi_b). \quad (11)$$

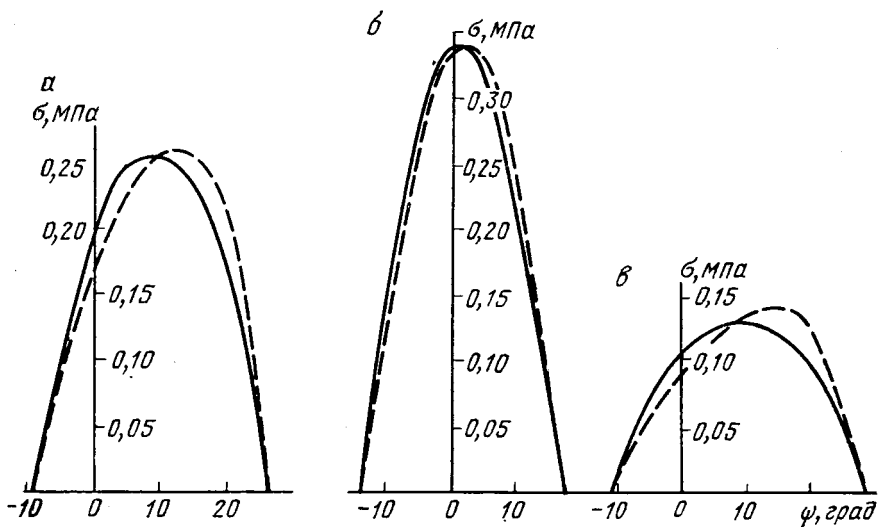


Рис. 3. Эмпирические и теоретические линии регрессии напряжений сжатия почвы.

а и *в* — заднее колесо с шиной 16,9R38; для *а*: $G=11,65$ кН; $p_w=0,09$ МПа; $v=1,14$ м/с; 1-й проход по почве; $\rho_0=1,285$ г/см³; для *б*: $G=11,65$ кН; $p_w=0,09$ МПа; $v=1,43$ м/с; 6-й проход по колее; $\rho_0=1,58$ г/см³; *в* — переднее колесо с шиной 11,2-20; $G=6,08$ кН, $p_w=0,11$ МПа; $v=1,14$ м/с; 1-й проход по почве; $\rho_0=1,285$ г/см³; прямая линия и пунктир соответственно эмпирические и теоретические линии регрессии.

В наших исследованиях определялись также зависимости h_0 (см) при качении колес с шинами 11,2-20 и 16,9R38 от вертикальной нагрузки на ось колеса G (кН), давления воздуха в шине p_w (МПа) и степени предварительного уплотнения почвы n с использованием методики обработки данных полного факторного эксперимента 2^3 [1]. Факторы варьировались на следующих двух уровнях. Для переднего колеса нижний и верхний уровни G соответственно 5,45 и 6,08 кН, p_w — 0,11 и 0,17 МПа, для заднего колеса G равно 11,65 и 17,49 кН; p_w — 0,09 и 0,11 МПа. Для обоих колес нижний уровень n — первое уплотнение вспаханной почвы, а верхний уровень — 6-й проход по колее. В кодированных значениях переменных их нижний уровень равен -1 , а верхний $+1$. Обработаны данные опытов, проведенных при движении трактора на II передаче.

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено, что зависимость h_0 от G , p_w и n для колеса с шиной 11,2-20 описывается следующим линейным уравнением регрессии с кодированными значениями независимых переменных:

$$h_0 = 3,5103 + 0,2847 G + 0,5047 p_w - 3,1560 n. \quad (12)$$

Для колеса с шиной 16,9R38 соответствующее уравнение регрессии имеет вид

$$h_0 = 6,0162 + 0,4988 G + 0,0938 p_w - 5,1988 n. \quad (13)$$

Проверка адекватности линейных моделей (12) и (13) по критерию Фишера при 5 % уровне значимости свидетельствует об их адекватности, поэтому они могут быть использованы для характеристики изменения остаточной осадки почвы в зависимости от G , p_w , n .

Коэффициенты при независимых переменных в уравнениях регрессии с кодированными значениями переменных указывают на силу влияния факторов. Из уравнений (12) и (13) видно, что с увеличением вертикальной нагрузки на ось колеса и давления воздуха в шине значение остаточной осадки почвы возрастает; для рыхлой почвы она значительно больше, чем для уплотненной.

Выявлено влияние проходов трактора на значения полной $h_{полн}$ и обратимой $h_{обр}$ осадки почвы. Эти величины с высокой степенью точности определяются по формулам:

$$h_{обр} = R_{np} (1 - \cos \psi_a); \quad (14)$$

$$h_{полн} = h_{обр} + h_o = R_{np} (\cos \psi_b - \cos \psi_a). \quad (15)$$

Расчеты показали, что с увеличением числа проходов колеса по одному и тому же следу обратимые деформации почвы возрастают и интенсивно повышается их доля в полной осадке почвы. Так, для переднего колеса в опытах, проведенных при $G=6,08$ кН, $p_w=0,11$ МПа, движении трактора на II передаче при 1-м проходе по рыхлой почве $h_{обр}=0,61$ см и составляет 10,6% $h_{полн}$, а при 6-м проходе по колее $h_{обр}=0,79$ см (49,3%). Для заднего колеса при $G=11,65$ кН, $p_w=0,09$ МПа, движении трактора на II передаче при 1-м проходе по рыхлой почве $h_{обр}=1,2$ см (11,3%), а при 6-м проходе $h_{обр}=1,36$ см и составляет 55,3% $h_{полн}$. Увеличение доли обратимой деформации почвы в ее полной деформации свидетельствует об изменении характеристик ее вязкоупругих свойств: показатель g уменьшается и стремится к нулю, свойства почвы приближаются к упругим.

Рост вертикальной нагрузки на ось колеса значительно ускоряет процесс уплотнения почвы и приближения ее свойств к упругим. Так, для заднего колеса при $G=17,49$ кН, $p_w=0,11$ МПа, движении трактора на II передаче при 1-м проходе по рыхлой почве $h_{обр}=0,9$ см и составляла 6,6% $h_{полн}$, а при 6-м проходе по колее $h_{обр}=3,93$ см (98,1%), т. е. деформации почвы стали близкими к упругим.

Опыты показали, что степень уплотнения почвы зависит от скорости движения трактора. Увеличение средней за серию опытов скорости трактора МТЗ-82 без тяговой нагрузки с 4,8 до 14,8 км/ч привело к уменьшению приращения плотности почвы $\Delta\rho$ во всех исследованных слоях пахотного горизонта. В слое 0—0,1 м при увеличении скорости от 4,8 до 14,8 км/ч после 1-го прохода $\Delta\rho$ уменьшилось с 0,33 до 0,01 г/см³ для переднего колеса и с 0,33 до 0,18 г/см³ для заднего.

Полученные данные подтверждают необходимость учитывать вязкоупругие свойства почв в расчетах и при разработке рекомендаций по улучшению тяговых свойств тракторов и предотвращению переуплотнения почв движителями машин. Описание вязкоупругих свойств почвы уравнением (1) позволяет обоснованно и с достаточной для практических целей точностью учитывать влияние на характеристики взаимодействия движителей машин и почвы обратимых деформаций почвы, выполнять расчеты с учетом скорости движения машин и времени воздействия движителей на почву, зависящего от скорости движения и параметров ходовой системы машины.

Таким образом, получены данные, подтверждающие пригодность и достоинства моделирования закономерности деформирования исследованной легкосуглинистой почвы уравнением (3), по предлагаемой методике определены характеристики ее вязкоупругих свойств. Выявлено влияние вертикальной нагрузки на оси трактора, давления воздуха в шинах и числа проходов трактора по почве на значения нормальных контактных напряжений на колесах, остаточной и обратимой осадки почвы, характеризующие ее вязкоупругие свойства и уплотняющее воздействие на почву проходов трактора. Выявлено влияние скорости трактора на уплотнение почвы.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке методов расчета и оптимизации параметров ходовых систем колесных сельскохозяйственных тракторов с учетом агротехнических требований к плотности почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 2. Золотарева Д. И. О трении качения при движении колес по уплотняющемуся грун-

ту. — Докл. ТСХА, 1968, вып. 136, с. 153—160. — 3. Золотаревская Д. И. Взаимосвязь различных математических моделей деформирования почв. — Механизация и электрификация сельск. хоз-ва, 1983, № 5, с. 10—16. — 4. Кушнарев А. С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву. — Автореф. докт. дис. Мелитополь, 1980. — 5. Маслов В. А. Снижение уплотняюще-

го воздействия на почву при работе трактора типа «Кировец» на возделывании зерновых культур. — Автореф. канд. дис. Рязань, 1987. — 6. Хабатов Р. Ш., Золотаревская Д. И., Матвеев В. В. и др. Закономерности деформирования тракторных колес с пневматическими шинами. — Изв. ТСХА, 1987, вып. 3, с. 173—180.

Статья поступила 8 апреля 1988 г.

SUMMARY

The process of compaction of plowed soddy-podzolic light loam and changes in its viscosity and elasticity after successive passages of wheel-type tractor over the same track was studied. It has been confirmed experimentally that differential equation of the first order which connects compressing tenses and rates of change in compressing tenses with relative soil sedimentation may be used for description of soil viscosity and elasticity. The merits of practical application of this equation are shown. By means of the proposed technique the characteristics of soil viscosity and elasticity are found. The effect of vertical load on wheel axes, as well as that of air pressure in tyres, of tractor speed and degree of preliminary soil compaction on compressive effect of tractor's passages on the soil and regulatory of soil deformation with time have been established.