

УДК 631.3

МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ ПРИ РАБОТЕ И ПОСЛЕ ОСТАНОВКИ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Золотареvская Д.И.

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

На основе результатов теоретического исследования и полевых испытаний выполнено математическое моделирование процессов деформирования и уплотнения почвы при проходах и после остановки колесного трактора. Действие нагрузки на почву с учетом вязкоупругих свойств почвы описано дифференциальным уравнением первого порядка, связывающим сжимающие напряжения, скорости изменения сжимающих напряжений и относительные деформации сжатия. Рассмотрены вязкоупругие свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, выявленные в полевых испытаниях. На основании результатов статистической обработки экспериментальных данных зависимость от глубины плотности почвы до воздействия на почву внешней нагрузки принята квадратичной. Выполнены компьютерные эксперименты, в которых найдены показатели, позволяющие оценить количественно изменения деформаций, напряжений в почве и плотности почвы при работе трактора и ползучести почвы после остановки трактора. Получены корреляционные зависимости этих показателей от времени, плотности и влажности почвы, скорости ее начального деформирования. Предложенный метод расчета позволяет находить рассматриваемые показатели на различной глубине деформируемого слоя почвы, а также время стабилизации деформации почвы.

Ключевые слова: реология, деформации, сжимающие напряжения, уплотнение почвы, вязкоупругие свойства почв, ползучесть, математическое моделирование

METHOD OF CALCULATING STRESS-STRAIN STATE AND SOIL COMPACTION DURING OPERATION AND AFTER STOPPING THE WHEEL TRACTOR

Zolotarevskaya D.I.

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

Based on the results of theoretical studies and field tests it was solved the mathematical modeling of the processes of deformation and soil compaction during the work and after stopping wheel tractor. The effect of soil load taking into account the viscoelastic properties of the soil are described by differential equation of the first order connecting the compressive stresses, the rate of change of compressive stress and relative deformation of compression. Considered viscoelastic properties of sward-podzolic light loamy soil identified in field tests. Based on the results of the statistical processing experimental data the dependence on depth the density of the soil before the impacts on soil external loads adopted quadratic. Performed computer experiments in which the indicators, allowing to estimate quantitatively the changes in strains, stresses in the soil and density of soil during the work of tractor and creep of the soil after stopping the tractor. Obtained correlation dependencies of these indicators from time, density, and soil moisture, the speed of its initial deformation. The proposed calculation method allows to find the indicators at different depths of a deformable soil layer, and a stabilization time of soil deformation.

Keywords: rheology, deformation, compressive stress, soil compaction, viscoelastic properties of soil, creep, mathematical modeling

Среди современных экологических проблем важное место занимает проблема сохранения и повышения плодородия почв. Исследования многих ученых внесли большой вклад в ее решение [14, 15], однако многие вопросы еще не решены.

Для разработки рекомендаций по снижению негативного влияния сельскохозяйственной техники на агротехнические свойства почв необходимо создание и широкое практическое применение методов расчета показателей воздействия движителей мобильных машин на почвы. Эти методы должны основываться на данных о закономерностях деформирования различных почв с учетом фактора времени, то есть с учетом реологических свойств почв.

При влажностях w почвы, меньших ее полной влагоемкости, и при сжимающих

напряжениях σ , меньших предела ее прочности $\sigma_{пр}$, почва под действием нагрузки уплотняется и упрочняется. Неуплотненные почвы при таких w являются вязкоупругими [2 – 9, 13]. В данной работе рассматриваются процессы деформирования и уплотнения почв, находящихся в таком состоянии.

В настоящее время реологические свойства почв исследованы и исследуются мало. В представленной работе рассмотрено уплотняющее воздействие на почву тракторов с учетом влияния реологических свойств почв. В связи с этим проведенное нами исследование весьма актуально.

Некоторые полученные нами ранее результаты о ползучести и уплотнении почвы после кратковременного возрастания дина-

мической нагрузки приведены в работе [11]. Новизна данной работы состоит в том, что исследовано уплотнение почвы при ее ползучести, возникающей после остановки двигавшегося по почве трактора.

Цель исследования

Цель исследования – развить предложенный нами ранее метод расчета показателей напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при работе трактора и при ползучести почвы, возникающей после остановки трактора. Метод основывается на результатах, описанных в работе [11].

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования закономерностей деформирования и уплотнения вязкоупругих почв в результате действия динамических нагрузок при работе колесных тракторов МТЗ-82 проведены на полях опытного хозяйства РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева [3 – 9]. В данной работе в расчетах использованы экспериментальные данные, полученные в работе [4]. Почва на опытном поле дерново-подзолистая легкосуглинистая.

Нами проведены теоретическое и экспериментальное исследования изменения характеристик вязкоупругих свойств почвы, показателей ее напряженно-деформированного состояния и уплотнения при проходах трактора и при ползучести почвы, возникающей после его остановки. С использованием наших экспериментальных данных выполнены компьютерные эксперименты.

Результаты исследования и их обсуждение

Введем ось Oy , направленную вертикально вниз, начало которой O расположим на поверхности почвы. Плотность верхнего деформируемого слоя почвы перед проходами по ней машин (начальная) переменна по глубине y .

Как и в работе [11] будем описывать зависимость начальной плотности ρ почвы от глубины y , полученной в результате статистической обработки экспериментальных данных [4–6, 8, 9] квадратичной зависимостью

$$\rho(y) = \rho_0 + k_1 y + k_2 y^2, \quad y \in [0; H], \quad (1)$$

где k_1 и $k_2 \neq 0$ – коэффициенты, ρ_0 – свободный член. Корреляционное отношение в зависимости (1), равно 0,9861. При $y \in [0; H]$ почву можно уплотнить, так как $\rho(y) < \rho_{пр}$, $\rho(H) = \rho_{пр}$, где $\rho_{пр}$ – плотность предельно уплотненной почвы при $\sigma < \sigma_{пр}$.

На основании результатов исследований [3–9] закономерность сжатия почвы в направлении оси Oy при каждом фиксированном y при гармоническом процессе деформирования, возникающем, в частности, в результате деформирования почвы при

качении колеса, будем моделировать уравнением

$$\sigma'_i(t) + \omega g \sigma(t) = q \varepsilon'_i, \quad (2)$$

где ε – относительные деформации сжатия; t – время, с; ω , c^{-1} – круговая частота гармонического процесса деформирования, g и q , МПа – характеристики вязкоупругих свойств почвы. Путем статистической обработки большого числа экспериментальных значений g и q , полученных на опытном поле при различных ρ , ω и w , найдены уравнения регрессии для определения при каждом фиксированном y характеристик g и q исследованной легкосуглинистой почвы:

$$g = 14,655 - 6,716\rho - 0,581\omega + 0,085w, \quad (3)$$

$$q = -9,654 + 14,981\rho + 0,245\omega - 0,315w \quad (4)$$

с коэффициентами множественной корреляции, равными соответственно 0,7931 и 0,7528. В уравнениях (3) и (4) при $y = 0$ плотность почвы $\rho = \rho_0$.

Тракторные колеса с шинами, соответствующими ГОСТ 7463-2003 при качении по почве деформируются как практически линейно упругие при всех допустимых значениях вертикальных нагрузок на их оси и давления воздуха в шинах [10]. Предложена схема для определения размеров линии контакта упругого эластичного колеса с вязкоупругой почвой [7]. Согласно этой схеме линия контакта с почвой эластичного колеса радиуса R при качении с угловой скоростью ω_k в центральном продольном сечении заменяется дугой окружности условного жесткого колеса радиуса $R_{пр}$. Угловая скорость условного колеса $\omega_{пр} = \omega_k R / R_{пр}$. Длина линии контакта зависит от углов $\psi_b > 0$ и $\psi_a < 0$; $|\psi_b| > |\psi_a|$; $\sigma(\psi_b) = \sigma(\psi_a) = 0$. Текущий угол контакта с почвой колеса радиуса $R_{пр}$ равен $\psi = \psi_b - \omega_{пр} t$.

Рассмотрели два случая уплотнения почвы.

1) Уплотнение почвы при проходах трактора. При проходе трактора в течение одного оборота колеса $t \in [0; t_0]$.

Нами получены формулы, позволяющие найти глубину H_p распространения деформации сжатия почвы, приращение плотности и плотность почвы на различной глубине. Выполненные нами расчеты показали, что при $H \leq 1$ м глубина $H_p = H$, поэтому приняли $H_p = H = 1$ м. Относительная деформация сжатия почвы в каждый момент времени t равна

$$\varepsilon(t) = h(t) / (H - h(t)), \quad (5)$$

где $h(t) = R_{пр} [\sin(\alpha_0 + \omega_{пр} t) - \sin \alpha_0]$ – абсолютная деформация сжатия почвы в направлении оси Oy , $\alpha_0 = \pi/2 - \psi_b$.

Получили формулы для определения напряжений сжатия почвы в точках линии контакта

$$\sigma(t) = \sigma(\psi) = qR_{\text{пр}}[\cos \psi + g \sin \psi - (\cos \psi_b + g \sin \psi_b)e^{-g(\psi_b - \psi)}] / (H(g^2 + 1)) \quad (6)$$

и уравнение $F(\psi_b; \psi_a) = 0$, связывающее углы ψ_b и ψ_a . [4] Под действием нагрузки происходит осадка почвы, сопровождающаяся ее уплотнением. При $t = t_{\text{ст}}$ деформация стабилизируется, где $t_{\text{ст}}$ – время стабилизации деформации.

Показатели уплотняющего воздействия колеса – остаточная после его прохода осадка почвы h_0 , обратимая деформация почвы $h_{\text{обр}}$, доля $k_{\text{обр}}$ обратимой деформации почвы в ее полной деформации $h_{\text{полн}}$, приращение плотности и плотность почвы на различной глубине после прохода колеса зависят при $H_p = H$ от $R_{\text{пр}}$, ψ_b и ψ_a . Величины $R_{\text{пр}}$, ψ_b и ψ_a найдены как решение системы трех нелинейных уравнений.

При $H_p = H$ и квадратичной зависимости (1) начальной плотности почвы от глубины приращение плотности почвы на глубине $h_0 \leq H$ приближенно равно

$$\Delta\rho(h_0) \approx (6\rho_0 + 3k_1h_0 + 2k_2h_0^2)(H - h_0)h_0 / (3(H + \mu h_0)^2), \quad (7)$$

где μ – коэффициент поперечного расширения почвы. Приняли, что на глубине H почва до действия на нее внешней нагрузки имела максимально возможную плотность, поэтому $\Delta\rho(H) = 0$.

После прохода колеса новая глубина деформируемого слоя почвы равна

$$H_n = H - h_0. \quad (8)$$

За новое начало отсчета глубины деформируемого слоя – величины y_n (то есть за новую поверхность почвы) принимали координату $y = h_0$. При $y_n = 0$ имеем

$$(\rho_0)_n = \rho_0 + k_1h_0 + k_2h_0^2 + \Delta\rho(h_0). \quad (9)$$

Зная приращения плотности почвы после прохода колеса на различной глубине, находим новые значения плотности почвы. Эти значения характеризуют зависимость от глубины уплотненной колесом почвы.

2) Уплотнение почвы после остановки трактора

Пусть трактор выполнил один проход по почве со скоростью v_0 , а затем остановился. При этом под колесами возникает ползучесть почвы.

С целью исследования процесса ползучести рассмотрим две стадии изменения напряженно-деформированного состояния почвы. Первая стадия соответствует $t \in [0; t_0]$, где h_0 – время, за которое достигается $h_{\text{полн}}$. На этой стадии изменя-

ются деформации почвы и напряжения в ней: $\varepsilon = \varepsilon(t)$, $\sigma = \sigma(t)$. При $t \in [0; t_0]$ имеем: $\sigma \in [0; \sigma_0]$, $\varepsilon \in [0; \varepsilon_0]$.

Вторая стадия (стадия ползучести) соответствует $t \in (t_0; \infty)$. На этой стадии $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$, а деформация сжатия почвы изменяется: $\varepsilon = \varepsilon(t)$. Из уравнения (2) получили формулу, характеризующую процесс ползучести почвы (см. работу [11]). Эта формула показывает, что при постоянных значениях ее параметров деформации сжатия почвы с течением времени неограниченно возрастают по линейному закону. Однако известно, что при постоянных $\sigma < \sigma_{\text{пр}}$ почва с течением времени уплотняется и упрочняется до постоянных значений плотности и прочности, ее деформации стабилизируются [2]. Эта закономерность учтена в разработанном нами методе расчета – принято во внимание изменение при изменении плотности почвы характеристик g и q ее вязкоупругих свойств.

На стадии ползучести за новое начало отсчета глубины – величины y_n (то есть за новую поверхность почвы) принимаем координату $y = h_0$. Плотность почвы при $y_n = 0$ в начале процесса ползучести находим по формуле (9).

Зная приращения плотности почвы на различной глубине, находим новые значения ее плотности $\rho_n(y_n)$ для всех $y_n \in [0; H_n]$. Зависимость плотности почвы от y_n аппроксимируем квадратичной функцией вида (1), но с измененными входящими в нее параметрами. Плотность почвы на различной глубине различна, поэтому различны вязкоупругие свойства почвы. Характеристики вязкоупругих свойств почвы в начале процесса ползучести находим по формулам (3) и (4) при $(\rho_0)_n = (\rho_0)_{t_0}$, то есть при $t = t_0$. С течением времени почва продолжает уплотняться до стабилизации деформации, поэтому происходит дальнейшее изменение характеристик g и q до достижения ими постоянных значений.

На основе выполненного математического моделирования нами разработан метод расчета показателей напряженно-деформированного состояния почвы и показателей ее уплотнения при работе трактора и после его остановки.

Исходными для выполнения каждого расчета являются: глубина H , глубина $0 < H_1 < H$, ρ_0 , $\rho(H_1)$, $\rho(H)$, w , t_0 , ω , коэффициенты уравнений регрессии $q = q(\rho, \omega, w)$, $g = g(\rho, \omega, w)$, σ_m – амплитуда изменения напряжений σ .

Характерные особенности предложенного метода расчета состоят в следующем. Величины характеристик g и q вязкоупругих свойств почвы, показатели ее напряженно-деформированного состояния и уплотнения при действии сжимающих напряжений в почве являются непрерывными функциями t . Приближенно считаем, что в малые промежутки времени $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, k, \dots, n$) эти величины постоянны и изменяются они дискретно.

Порядок выполнения расчетов предложенным методом в применении к нахождению показателей, характеризующих ползучесть и уплотнение почвы при работе и после остановки трактора, соответствует описанию, приведенному в работе [11].

Рассмотрим малые значения времени t_i . На первой стадии изменения напряженно-деформированного состояния почвы при $t \in [0; t_0]$ находим $\sigma_0 = \sigma(t_0)$, ε_0 (по формуле (5) при $t = t_0$), $\Delta p(h_0)$ (по формуле (7)), $\rho(h_0)$, $(\rho_0)_n$ (по формуле (9)), $\rho(0,05)$ и $\rho_n(0,05)$ – старое и новое значения плотности почвы в слое 0–0,1 м, характеристики g и q вязкоупругих свойств почвы при $(\rho_0)_n$. Для H_{1n} – нового значения глубины, соответствующего глубине H_1 , новая плотность почвы равна $\rho_n(H_{1n})$. Исходная глубина H преобразуется в новое значение глубины деформируемого слоя почвы, равное H_{2n} .

На стадии ползучести приближенно считаем, что деформации сжатия почвы постоянны в малые промежутки времени $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$. При каждом Δt_i находим $\Delta \varepsilon_i$ и Δh_i – приращения за Δt_i относительной и абсолютной деформаций сжатия почвы, суммарные приращения относительной $\Delta \varepsilon(\Delta t_i) = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon_i$ и абсолютной $\Delta h(\Delta t_i) = h_0 + \Delta h_{0i}$ деформации сжатия почвы, скорость $v_d = \varepsilon'_i$ относительной деформации сжатия почвы, новую глубину распространения деформируемого слоя почвы, новую зависимость вида (1).

При $t = t_0 + \sum_{i=1}^k \Delta t_i$ и $y_{nk} = 0$ имеем

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^k \Delta \varepsilon(\Delta t_i), \quad (10)$$

где $\varepsilon(t)$ – относительная деформация сжатия почвы (суммарная).

С течением t характеристика q возрастает, а характеристика g убывает. При этом $\Delta \varepsilon_i \rightarrow 0$, $\varepsilon(t) \rightarrow (\varepsilon)_{ст}$, $\rho_i \rightarrow \rho_{пр}$. Деформацию почвы считаем стабилизированной, если при $t = t_0 + t_m$ получим $\rho_m(0,05) \geq \rho_{пр}$. Если в m -ом расчете получим $\Delta p(t_m) < 10^{-3}$, то это означает, что далее с течением времени $\rho(y)$ практически не увеличивается, наступает условная стабилизация свойств почвы.

Нами разработаны компьютерные программы, позволяющие найти показатели, характеризующие напряженно-деформированное состояние и уплотнение почвы в различные фиксированные моменты времени при работе трактора и при последующей ползучести после его остановки. По этим программам выполнены компьютерные эксперименты для исследовавшейся почвы.

Провели две серии однофакторных опытов и один полный трехфакторный эксперимент типа $N = 2^3$. (Здесь N – число опытов в серии, 3 – число влияющих факторов, 2 – число уровней варьирования факторов [1].

Однофакторные опыты

Выполнили исследование по приведенным в работе [4] данным опыта, в котором рассмотрены первый проход переднего колеса трактора с шиной 11,2-20 и заднего колеса этого трактора с шиной 16,9R38 по вспаханной и проборонованной легкосуглинистой почве и ползучесть почвы после остановки трактора. Плотность почвы до прохода трактора характеризуют данные опыта № 1 из табл. 1. Влажность почвы была $w = 18\%$. Трактор до остановки работал со скоростью $v_0 = 2,45$ м/с. Угловая скорость заднего колеса равнялась $\omega_2 = 3,51$ с⁻¹, при вертикальной динамической нагрузке на заднюю полуось $G_{02} = 11,65$ кН его приведенный радиус $R_{пр2} = 0,943$ м. При одном обороте колеса сжимающие напряжения в почве возрастали в течение времени $t_0 = 0,04$ с. Расчеты показали, что при $t_0 = 0,04$ с характеристики вязкоупругих свойств почвы равны: $q = 11729,2$ кН, $g = 3,42$. При этом показатели деформации и уплотнения почвы равны: суммарное приращение относительной осадки почвы $\varepsilon_{11} = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon_1 = 0,0881$, $\Delta p(0,05) = 0,0764$ г/см³, $\rho_n(0,05) = 1,5386$ г/см³, $H_{2n} = 0,9176$ м.

Таблица 1

Начальная плотность почвы в ряде опытов

№ Опыта	Плотность почвы при Различных y , г/см ³		
	ρ_0	$\rho(0,3)$	$\rho(1,0)$
1	1,1412	1,6017	1,88
2	1,2	1,62	1,88
3	1,3	1,65	1,88
4	1,4	1,70	1,88
5	1,5	1,75	1,88

В табл. 2 приведены соответствующие различным моментам времени при ползучести почвы после остановки трактора характеристики вязкоупругих свойств почвы, ее напряженно-деформированного состояния и уплотнения под задним колесом трактора с шиной 16,9R38; $t_{ст} = 9,2$ с.

Провели также серию из пяти опытов, в которых исследовали влияние для трактора МТЗ-82 на ползучесть и уплотнение почвы ее начальной плотности. В каждом из опытов принимали начальную плотность почвы по данным табл. 1. Расчеты в опыте № 1 провели по следующим исходным данным: $H_1 = 0,3$ м; $H = 1$ м; $\rho_0 = 1,14$ г/см³; $\rho(H_1) = 1,602$ г/см³; $\rho(H) = 1,88$ г/см³; $w = 15\%$; $t_0 = 0,2$ с; $\sigma_m = 100$ кПа; $\omega = 2$ с⁻¹.

В остальных опытах изменяли ρ_0 , а другие влияющие факторы были такими же, как в опыте № 1.

Получили уравнения регрессии, характеризующие зависимости плотности почвы ρ , г/см³ от глубины y , м, на которой находится рассматриваемый участок почвы, соответствующий различным моментам времени t , с. В расчетах по исходным данным опыта № 1 некоторые из этих зависимостей имеют вид:

- 1) для $t = 0$ (начальная плотность почвы): $\rho = 1,1412 + 1,8733y - 1,1333y^2$, где $y \in [0; 1]$;
- 2) для $t = 1$ с: $\rho = 1,6603 + 0,8255y - 0,6588y^2$, где $y \in [0,1225; 0,8775]$;
- 3) для $t = 3$ с: $\rho = 1,8337 + 0,1706y - 0,1376y^2$, где $y \in [0,1605; 0,8395]$;
- 4) для $t = 5$ с: $\rho = 1,8681 + 0,0435y - 0,0352y^2$, где $y \in [0,1681; 0,8319]$;
- 5) для $t = 9,2$ с: $\rho = 1,8786 + 0,0051y - 0,0042y^2$, где $y \in [0,1704; 0,8296]$.

(11)

Таблица 2

Изменение во времени характеристик вязкоупругих свойств, показателей напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы в результате ее ползучести после остановки трактора МТЗ-82 (под задним колесом с шиной 16,9R38)

Показатели	В результате ползучести почвы при различных t , с				
	1	3	5	7	9
q , кПа	15433,4	18577,5	19162,7	19301,3	19324,2
g	1,7545	0,3450	0,0826	0,0205	0,0102
$\Delta\epsilon$	0,0112	0,0184	0,0004	0,0001	0
$\Delta\rho(0,05)$, г/см ³	0,0358	0,0670	0,0160	0,0039	0,0002
$\rho_n(0,05)$, г/см ³	1,7017	1,8452	1,8699	1,8765	1,8776
H_{2H} , м	0,8771	0,8395	0,8320	0,8302	0,8299

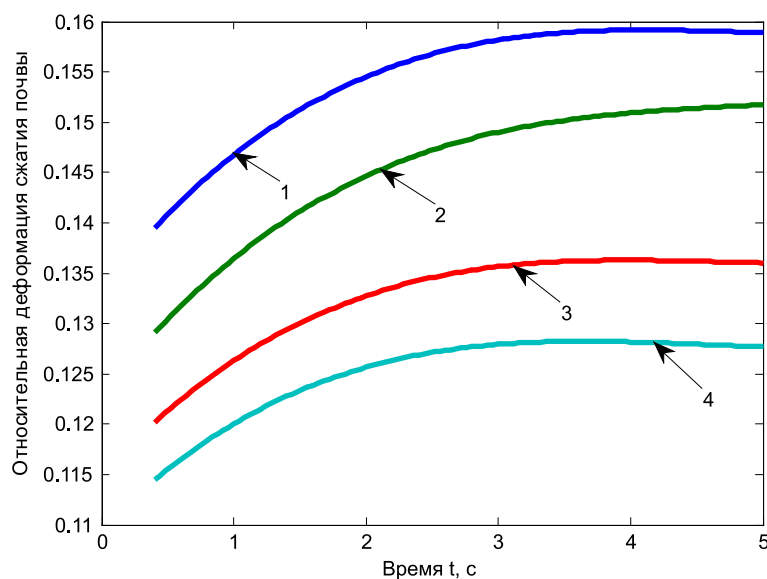


Рис. 1. Зависимости при ползучести после остановки трактора относительной деформации сжатия почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях начальной плотности почвы. 1, 2, 3, 4 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1–3 и 5, приведенным в табл. 1

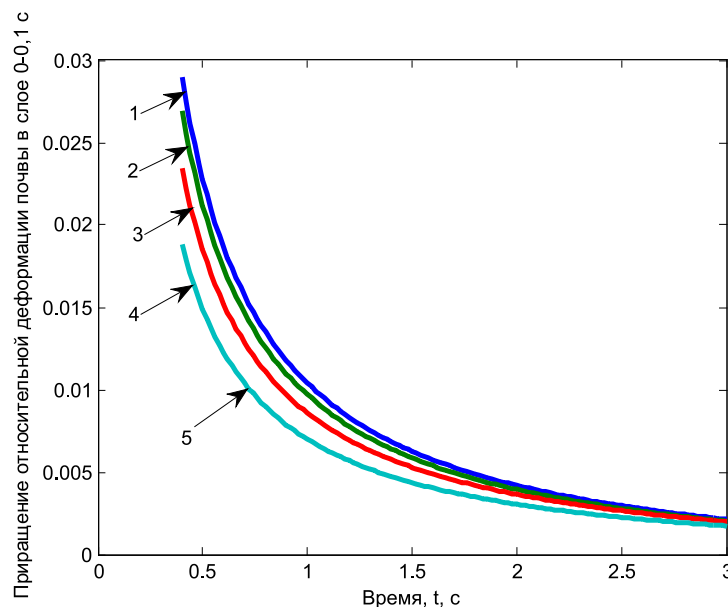


Рис. 2. Зависимости при ползучести после остановки трактора приращение относительной деформации сжатия почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях начальной плотности почвы. 1, 2, 3, 4, 5 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1–5, приведенным в табл. 1

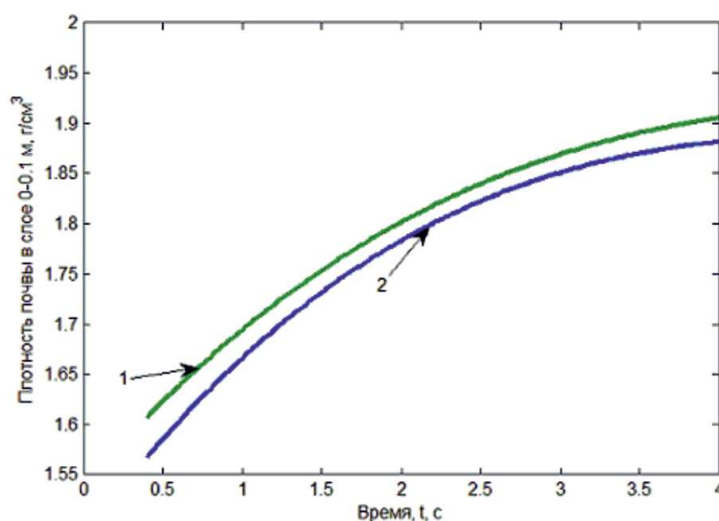


Рис. 3. Зависимости при ползучести после остановки трактора плотности почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях начальной плотности почвы. 1 и 2 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1 и 5, приведенным в табл. 1

Корреляционные отношения для каждого из уравнений (11) не менее 0,98. Из уравнений (11) следует, что на глубине $y = 0,1$ м при $t = 0; 1; 3; 5; 9,2$ с имеем $\rho(0,1) = 1,3172; 1,7363; 1,8474; 1,872; 1,8791$ г/см³. Пятое из уравнений (11) показывает, что $t_{ст} = 9,2$ с.

Опыты выявили значительное влияние начальной плотности почвы на изменение относительных деформаций сжатия $\epsilon(t)$ почвы и их приращения $\Delta\epsilon(t)$, в различных ее слоях на стадии начального возрастания сжимаю-

щих напряжений и при ползучести почвы, на время $t_{ст}$ стабилизации деформаций.

На рис. 1 и рис. 2 представлены соответственно зависимости относительной деформации сжатия почвы и приращения относительной деформации сжатия почвы от времени t при ее ползучести в случае начального возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ по закону (6) при различных значениях начальной плотности почвы.

Представленные на рис. 1 зависимости $\varepsilon(t)$, а также другие, полученные в результате расчетов данные показывают, что с возрастанием начальной плотности почвы снижаются величины $\varepsilon(t)$, соответствующие одному и тому же значению t , снижаются величины предельного значения относительной деформации сжатия $\varepsilon_{\text{пред}}$ почвы.

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие зависимости плотности $\rho_n(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м от времени t при ее ползучести после остановки трактора при различных значениях начальной плотности почвы. Как видно из рис. 3, чем меньше начальная плотность почвы, тем больше уплотняется почва после остановки трактора.

На рис. 4 даны кривые, характеризующие зависимости от времени скорости относительной деформации сжатия почвы $v_d = \dot{\varepsilon}_t$ в слое 0–0,1 м при ползучести почвы после остановки трактора при трех различных значениях начальной плотности почвы. Плотность почвы соответствует данным опытов № 1, 3 и 5 из табл. 1.

Приведенные на рис. 4 кривые описывают уравнения регрессии, имеющие вид:

$$\dot{\varepsilon}_t = a_0 + a_1 / (t + a_2). \quad (12)$$

В уравнениях вида (12) коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 равны:

для опыта № 1: $a_0 = -0,0096$; $a_1 = 0,065$; $a_2 = 0,0223$;

для опыта № 3: $a_0 = -0,009$; $a_1 = 0,0611$; $a_2 = 0,0947$;

для опыта № 5: $a_0 = -0,0077$; $a_1 = 0,0578$; $a_2 = 0,2765$.

Корреляционные отношения для полученных уравнений регрессии не менее 0,99. Рис. 4 и другие полученные результаты показывают, что большим значениям ρ соответствуют меньшие значения скорости относительной деформации сжатия почвы. С течением времени скорость $\dot{\varepsilon}_t$ относительной деформации сжатия почвы снижается, приближаясь к нулю, то есть ползучесть исследуемой почвы в рассматриваемом ее физическом состоянии является ограниченной.

Полный факторный эксперимент

Для исследования характера и количественной оценки влияния на ползучесть и уплотнение почвы после остановки трактора начальной плотности почвы $\rho(y)$, угловой скорости ω колеса трактора при начальном нагружении почвы, а также влажности w почвы при совместном изменении этих факторов по разработанной нами компьютерной программе выполнили расчеты, которые представляют собой опыты в полном трехфакторном эксперименте. Для каждого фактора выбрали основной уровень и по два равноотстоящих от основного – нижний и верхний, которые равны: для $\rho_0 = 1,14$ и $1,5 \text{ г/см}^3$, для $\omega = 0,9$ и 5 с^{-1} , для $w = 15$ и 20% . Ввели обозначения: $x_1 = \rho_0$, $x_2 = \omega$, $x_3 = w$.

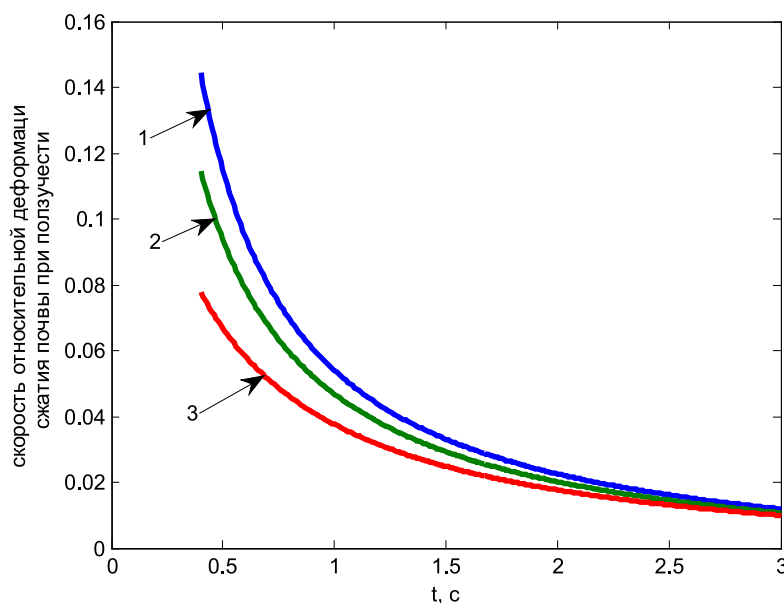


Рис. 4. Зависимости при ползучести после остановки трактора скорости относительной деформации сжатия почвы от времени при различных значениях начальной плотности почвы. 1, 2 и 3 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1, 3 и 5, приведенным в табл. 1

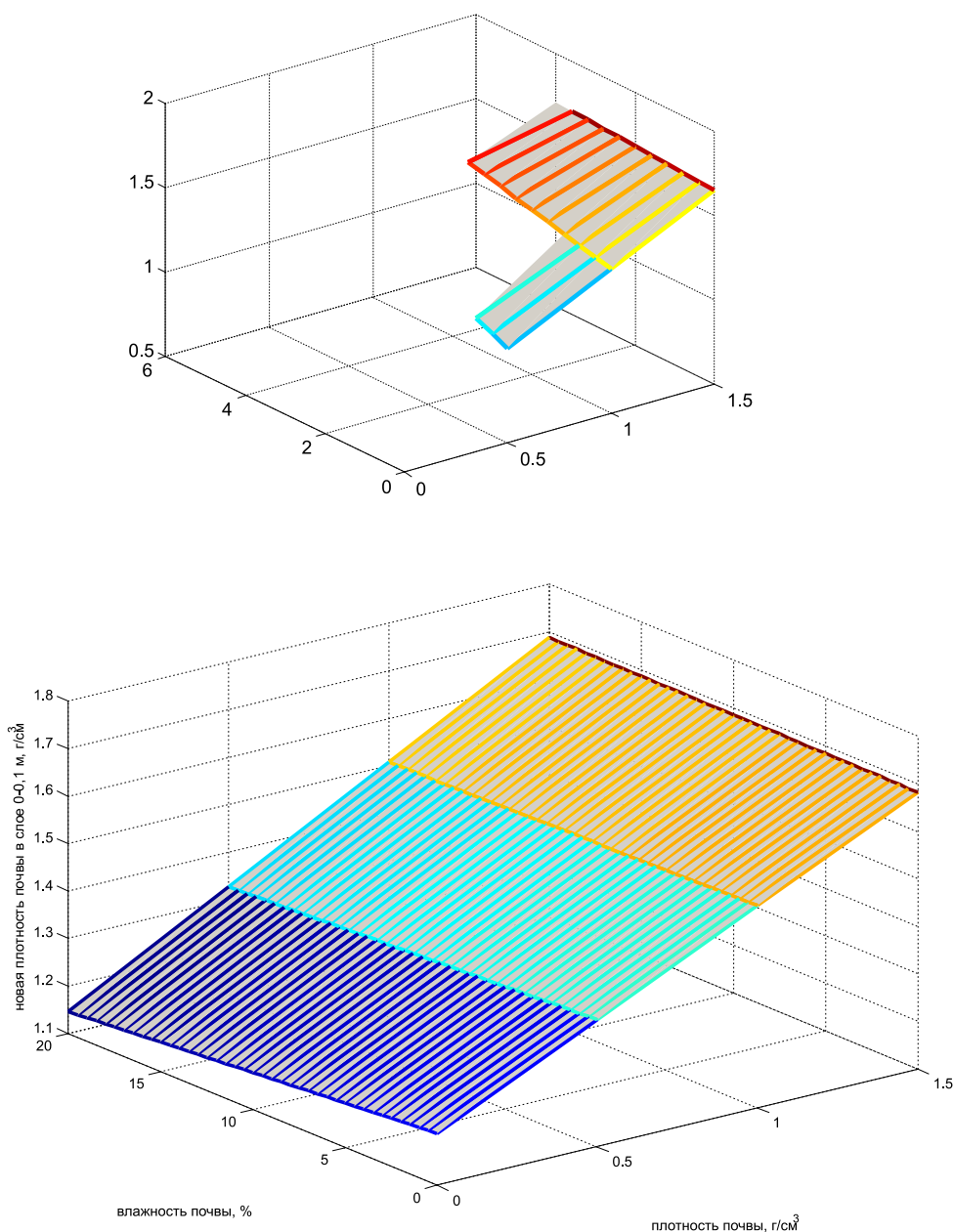


Рис. 5. Зависимости плотности почвы в слое 0–0,1 м при ползучести почвы после остановки трактора от а) ρ_0 и ω ; б) ρ_0 и w

Уравнения регрессии отыскивали в следующем виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (13)$$

где y – значение результирующего фактора, $b_0, \dots, b_7$ – постоянные коэффициенты, x_1, x_2, x_3 – влияющие факторы [1].

Получили выраженные в натуральных значениях переменных уравнения регрессии, характеризующие исследуемые пока-

затели: $\rho_n(0,05)$, $\Delta\rho_n(0,05)$, $t_{ст}$. Для нового значения плотности почвы в слое 0–0,1 м в момент времени $t = 1$ с это уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_n(0,05) = & 0,7413 + 0,6037x_1 + 0,1874x_2 + \\ & + 0,0018x_3 - 0,1152x_1x_2 - 0,0012x_1x_3 - \\ & - 0,0020x_2x_3 + 0,0014x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 5, а представлена построенная с использованием уравнения регрессии (14) поверхность, отражающая зависи-

мость плотности почвы $\rho_n(0,05)$ от ρ_0 и ω (при $w = 17,5\%$) Поверхность, отражающая зависимость $\rho_n(0,05)$ от ρ_0 и w (при $\omega = 2,5 \text{ с}^{-1}$) представлена на рис. 5, б. Из рис. 5, а видно, что при увеличении ρ_0 и при увеличении ω плотность $\rho_n(0,05)$ возрастает. Из рис. 5, б видно, что увеличение ρ_0 приводит к возрастанию $\rho_n(0,05)$, а увеличение w сопровождается уменьшением $\rho_n(0,05)$.

Анализ полученных результатов показал, что основное влияние на рассмотренные показатели оказывает начальная плотность почвы. Существенное влияние оказывают также угловая скорость колеса при $t \in [0; t_0]$, влажность почвы; взаимосвязанное изменение ρ_0 , ω и w также влияют на изменение $\rho_n(0,05)$.

Отмеченный характер влияния начальной плотности почвы на ее ползучесть и уплотнение обусловлен тем, что при увеличении плотности почвы характеристика вязкоупругих свойств почвы q возрастает, причем $q \rightarrow E$, где E – модуль упругости почвы; свойства почвы приближаются к упругим. Характеристика g при увеличении плотности почвы убывает.

Увеличении скорости деформирования почвы при $t \in [0; t_0]$ приводит к возрастанию характеристики q и убыванию характеристики g . С ростом начальной плотности и скорости деформирования почвы $g \rightarrow 0$.

Отмеченный характер влияния влажности почвы на ее ползучесть и уплотнение обусловлен тем, что при увеличении w характеристика вязкоупругих свойств почвы g возрастает, а характеристика q убывает, причем $q \rightarrow 0$. Свойства почвы приближаются к текучим.

Заключение

На основе математического моделирования вязкоупругих свойств почвы дифференциальным уравнением (2) с переменными коэффициентами получены аналитические зависимости и алгоритмы, позволяющие находить показатели напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при проходах трактора по почве, а также возникающей после остановки трактора ползучести почвы. Расчеты выполнены с использованием полученных нами в полевых испытаниях экспериментальных данных о вязкоупругих свойствах дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы известного гранулометрического состава в определенном интервале изменения ее влажности и скорости изменения сжимающих напряжений.

Результаты исследования уплотняющего воздействия тракторов на почву, полученные в данной работе, согласуются с экспериментальными и расчетными данными об уплотнении тракторами почв из других опубликованных работ [3, 8], а также ползучести в других деформируемых средах [12]. Прогнозирование результатов изменения напряженно-деформированного состояния и уплотнения при ползучести исследованной почвы, возникающей после остановки трактора, выполненное предложенным методом расчета, является адекватным.

Достоинства предложенного метода расчета состоят, в частности, в том, что разработанный метод расчета позволяет найти показатели напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при проходах трактора и при ее ползучести после остановки трактора изменяющимися во времени и на различной глубине верхнего деформируемого слоя почвы. Исследование, выполненное этим методом, позволяет получить дополнительно к выявляемым другими методами весьма важные данные о физическом состоянии почвы.

Плотность подпахотного слоя почвы значительно влияет на урожайность сельскохозяйственных культур. Разработанный метод расчета позволяет выявить уплотнение подпахотного слоя почвы, увеличение со временем при работе и после остановки трактора плотности пахотного и подпахотного слоев почвы.

Проведение дальнейших исследований реологических свойств различных почв и взаимодействия с почвами тракторов и других мобильных машин позволит применять полученные данные для расчетного определения показателей уплотняющего воздействия мобильных машин на почвы. Полученные результаты будут способствовать разработке комплекса мер, направленных на сохранение плодородия почв.

Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Денисов Н.Я. О природе деформаций глинистых пород. – М.: Изд-во министерства речного флота, 1951. – 200 с.
3. Золотаревская Д.И., Бурдыкин В.И., Матвеев В.В. и др. Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора // Изв. ТСХА. – 1989. – Вып. 1. – С. 175–183.
4. Золотаревская Д.И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей

мобильной сельскохозяйственной техники: дис.... докт. техн. наук. – М., 1997. – 452 с.

5. 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.

6. Золотаревская Д.И., Иванцова Н.Н. Математическое моделирование и расчет уплотняющего воздействия на почву колесных тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 7. – С. 36–40.

7. Золотаревская Д.И. Расчет уплотнения почвы колесными тракторами // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1990. – № 6. – С. 10–14.

8. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв: Математическое моделирование. – М.: Либроком. – 2013. – 144 с.

9. Золотаревская Д.И. Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой супесчаной почвы при воздействии колесного трактора // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 829–839.

10. Золотаревская Д.И. Характеристики вязкоупругих и упругих свойств эластичных колес // Изв. ТСХА. – 1989. – Вып. 2. – С. 142–161.

11. Золотаревская Д.И. Исследование процесса ползучести почвы после кратковременного возрастания динамической нагрузки // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12. Часть 7. – С. 1163 – 1173.

12. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. – М.: Высшая школа. – 1983. – 352 с.

13. Пархоменко Г.Г., Щириков В.Н. Расчет взаимодействия катка с почвой с использованием теории вязкоупругости // Тракторы и сельхозмашины. – 2007. – № 5. – С. 28–33.

14. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М.: РАСХН, ВИМ. – 1998. – 367 с.

15. Сапожников П.М. Физические параметры плодородия почв при антропогенных воздействиях: Автореф. дис. канд. с.-х. наук. – М., 1994. – 50 с.