

Исследование и расчет уплотнения почвы при работе и после остановки колесного трактора

Study and calculation of soil compaction during operation and after stopping of a wheeled tractor

Д. И. ЗОЛОТАРЕВСКАЯ, д-р техн. наук

Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Россия, dina.zolotarevskaya@mail.ru

D. I. ZOLOTAREVSKAYA, DSc in Engineering

Russian State Agrarian University — Moscow K. A. Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia, 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. Цель исследования — развить предложенный ранее метод расчета показателей напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при работе трактора и при ползучести почвы, возникающей после его остановки. Новизна работы заключается в том, что расчеты выполнены с учетом вязкоупругих свойств почвы, изменения ее плотности во времени и на различной глубине деформируемого слоя. Действие нагрузки на почву с учетом ее вязкоупругих свойств описано дифференциальным уравнением первого порядка, которое связывает сжимающие напряжения, скорости их изменения и относительные деформации сжатия. Рассмотрены вязкоупругие свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, выявленные в процессе полевых испытаний. Плотность почвы переменна по глубине ее верхнего деформируемого слоя. На основании результатов статистической обработки экспериментальных данных зависимость плотности почвы от ее глубины до воздействия внешней нагрузки принята квадратичной. Выполнены компьютерные эксперименты, в ходе которых найдены показатели, позволяющие количественно оценить изменения деформаций, напряжений в почве и ее плотности при работе трактора и при ползучести почвы после его остановки. Получены корреляционные зависимости этих показателей от времени, плотности и влажности почвы, скорости ее начального деформирования. Предложенный метод расчета позволяет находить рассматриваемые показатели для различной глубины деформируемого слоя почвы, а также время стабилизации деформации почвы.

Ключевые слова: реология; деформации; сжимающие напряжения; уплотнение почвы; вязкоупругие свойства почвы; ползучесть; математическое моделирование.

Based on the results of theoretical studies and field tests, the mathematical modeling is performed for the processes of soil deformation and compaction during operation and after stopping of a wheeled tractor. The purpose of the study is to develop the earlier proposed calculating method of stress-strain state and soil compaction indicators during the operation of tractor and under soil creep after its stopping. The novelty of the paper consists in the fact that calculations are performed taking into account the viscoelastic properties of soil and changes of its density depending on time and on depth of deformable layer. The impact of soil load taking into account the viscoelastic properties of soil is described by a differential equation of first order connecting the compressive stresses, the rate of their change and relative deformations of compression. Viscoelastic properties of sward-podzolic light loamy soil revealed in field tests are considered. Soil density is variable by depth of its top deformable layer. Following the results of statistical processing of experimental data, the dependence of soil density on its depth before the impact of external loads is admitted as quadratic one. Computer experiments are performed; they revealed the indicators allowing to estimate quantitatively the changes of soil deformations, stresses and density during the operation of tractor and under soil creep after its stopping. Correlation dependencies of these indicators on the time, soil density and moisture, and on the speed of initial soil deformation are obtained. The proposed calculation method allows to find the above mentioned indicators for different depths of deformable soil layer, and also the stabilization time of soil deformation.

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

Введение

Одна из наиболее актуальных экологических проблем — сохранение и повышение плодородия почвы. Ее решению посвящены исследования широкого круга ученых [1, 2], однако имеется целый ряд нерешенных вопросов.

Для разработки рекомендаций по снижению негативного влияния с.-х. техники на агротехнические свойства почвы необходимо создание и широкое практическое применение методов расчета показателей воздействия движителей на почву. Эти методы должны основываться на данных о закономерностях деформирования различных почв с учетом фактора времени, т.е. 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 влажностях — вязкоупругие [2–6]. В работе рассмотрены процессы деформирования и уплотнения почв, находящихся в таком состоянии.

Также рассмотрено уплотняющее воздействие тракторов на почву с учетом ее реологических свойств. Поскольку реологические свойства почв на данный момент изучены недостаточно, проведенное исследование весьма актуально.

Цель исследования

Цель исследования — развить предложенный ранее метод расчета показателей напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при работе трактора и при ползучести почвы, возникающей после его остановки.

Разработанный метод основан на результатах, полученных в работе [7].

Материалы и методы

Экспериментальные исследования реологических свойств, закономерностей деформирования и уплотнения почв в результате действия динамических нагрузок при работе колесных тракторов МТЗ-82 проведены на полях опытного хозяйства РГАУ—МСХА им. К. А. Тимирязева [5, 6, 8—11]. В расчетах использованы экспериментальные данные, полученные в работе [5]. На опытном поле верхний деформируемый слой, распространенный на глубину $H = 1$ м, расположен на слое полностью уплотненной почвы. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая. Поверхность почвы горизонтальная. Перед опытами проведены вспашка и боронование на глубину 0,35 м.

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 экспериментальных данных выполнены компьютерные эксперименты.

Результаты и их обсуждение

Введем ось Oy , направленную вертикально вниз, точку O расположим на поверхности почвы. Начальная плотность верхнего деформируемого слоя почвы перед проходами машин переменна по глубине y .

В результате статистической обработки экспериментальных данных из ряда работ [6, 9] получена квадратичная зависимость плотности ρ почвы от глубины y :

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

где k_1 и $k_2 \neq 0$ — коэффициенты; ρ_0 — свободный член.

Для почвы ($w = 20$ %) опытного поля $\rho_0 = 1,1412$ г/см³; $k_1 = 1,8733$ г/(см³·м); $k_2 = -1,1333$ г/(см³·м²). Корреляционное отношение в зависимости (1), равное 0,9861, свидетельствует о большой точности нахождения $\rho(y)$ по ней. 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 [2, 5, 6—11] закономерность сжатия почвы в направлении оси Oy при каждом фиксированном y будем моделировать уравнением:

$$\sigma'_t(t) + p\sigma(t) = q\varepsilon'_t, \quad (2)$$

где ε — относительные деформации сжатия; t — время, с; p , q — характеристики вязкоупругих свойств почвы, с⁻¹ и МПа.

Характеристика p , с⁻¹, зависит от круговой частоты ω , с⁻¹, гармонического процесса деформирования, возникающего, в частности, в результате деформирования почвы при качении колеса. В формулах, полученных на основе определяющего уравнения (2), ее целесообразно представить в виде $p = \omega g$, где g — преобразованная безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы.

Путем статистической обработки большого количества экспериментальных значений g и q , полученных на опытном поле при различных ρ , ω , w , найдены уравнения регрессии для определения при каждом фиксиро-

ванном y характеристик g и q исследованной легкосуглинистой почвы:

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

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

В уравнениях (3) и (4) коэффициенты множественной корреляции равны соответственно 0,7931 и 0,7528; 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 [12]. Предложена схема для определения размеров линии контакта упругого эластичного колеса с вязкоупругой почвой [11]. Согласно этой схеме линия контакта с почвой эластичного колеса радиусом R при качении с угловой скоростью ω_k в центральном продольном сечении заменяется дугой окружности условного жесткого колеса радиусом $R_{пр}$. Угловая скорость условного колеса $\omega_{пр} = \omega_k R / R_{пр}$. Длина линии контакта зависит от углов $\psi_b > 0$; $\psi_a < 0$; $|\psi_b| > |\psi_a|$; $\sigma(\psi_b) = \sigma(\psi_a) = 0$. Текущий угол контакта с почвой колеса радиусом $R_{пр}$ равен $\psi = \psi_b - \omega_{пр}t$.

Рассмотрим два случая уплотнения почвы.

1. Уплотнение почвы при проходах трактора

Получены формулы, позволяющие найти глубину H_p распространения деформации сжатия почвы, приращение плотности и плотность почвы на различной глубине [11]. 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 :

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

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 формулу для определения напряжений сжатия почвы в точках линии контакта:

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

а также уравнение $F(\psi_b; \psi_a) = 0$, связывающее углы ψ_b и ψ_a .

Под действием нагрузки происходит осадка почвы, сопровождающаяся ее уплотнением. При $t = t_{ст}$ деформация стабилизируется ($t_{ст}$ — время стабилизации деформации).

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

Получили формулу для определения приращения плотности почвы на различной глубине при $h_0 \leq H$:

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

где μ — коэффициент поперечного расширения почвы; $\Delta\rho(H) = 0$.

После прохода колеса новая глубина деформируемого слоя почвы:

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

За новое начало отсчета y_H глубины деформируемого слоя (т.е. за новую поверхность почвы) приняли координату $y = h_0$. При $y_H = 0$ имеем:

$$(\rho_0)_H = \rho_0 + k_1 h_0 + k_2 h_0^2 + \Delta\rho(h_0). \quad (9)$$

Зная приращения плотности почвы после прохода колеса на различной глубине, находим новые значения плотности. Эти значения характеризуют зависимость плотности 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 t_0 — время, за которое достигается $h_{\text{полн}}$. На этой стадии изменяются 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. Эта формула показывает, что при постоянных значениях ее параметров деформации сжатия почвы с течением времени неограниченно возрастают по линейному закону. Такого вида закономерность изменения деформации при ползучести характерна для идеальной вязкоупругой среды Максвелла. Однако почва не является идеальной вязкоупругой средой. Известно, что при постоянных $\sigma < \sigma_{\text{пр}}$ почва с течением времени уплотняется и упрочняется до постоянных значений плотности и прочности, ее деформации стабилизируются [3]. Эта закономерность учтена в разработанном методе расчета.

На стадии ползучести за новое начало отсчета глубины y_H (т.е. за новую поверхность почвы) принимаем координату $y = h_0$. Плотность почвы при $y_H = 0$ в начале процесса ползучести находим по формуле (9).

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

На основе математического моделирования разработан метод расчета показателей напряженно-деформиро-

ванного состояния почвы и показателей ее уплотнения при работе трактора и после его остановки.

Исходные показатели для выполнения каждого расчета: 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 представляют собой непрерывные функции t . Приближенно считаем, что в малые промежутки времени $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ (где $i = 1, 2, \dots, k, \dots, n$) эти величины постоянны и изменяются дискретно. Приняли $\Delta t_i = 0,2$ с.

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

На стадии ползучести приближенно считаем, что деформации сжатия почвы постоянны в малые промежутки времени $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$. Рассматриваем моменты времени $t_1 = t_0$; $t_2 = t_1 + 0,2$; $t_3 = t_2 + 0,2$; $t_4 = t_3 + 0,2$; ...; $t_n = t_{\text{ст}}$. 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 $\Delta h(\Delta t_i) = h_0 + \Delta h_{0i}$ деформаций сжатия почвы, новую глубину распространения деформируемого слоя, новую зависимость вида (1).

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

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

Проведены две серии однофакторных опытов и один полный трехфакторный эксперимент типа $N = 2^3$, где N — число опытов в серии; 3 — число влияющих факторов; 2 — число уровней варьирования факторов [13].

Однофакторные опыты

Выполнено исследование по приведенным в работе [6] данным опыта, в котором рассмотрены первый проход переднего колеса трактора с шиной 11,2—20 и заднего колеса с шиной 16,9R38 по вспаханной и проборо-

нованной легкосуглинистой почве и ползучесть почвы после остановки трактора. Плотность почвы до прохода трактора характеризуют данные опыта № 1 из табл. 1.

Влажность почвы в этом опыте составляла $w = 18 \%$. За один оборот заднего колеса сжимающие напряжения в почве возрастали в течение времени $t_0 = 0,04$ с. Получили, что при $t_0 = 0,04$ с характеристики вязкоупругих свойств почвы равны: $q = 11\,729,2$ кН; $g = 3,42$. При этом показатели деформации и уплотнения почвы равны: суммарное приращение относительной осадки почвы $\varepsilon_{11} = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 = 0,0881$; $\Delta\rho(0,05) = 0,0764$ г/см³; $\rho_H(0,05) = 1,5386$ г/см³; $H_{2H} = 0,9176$ м.

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; $t_{CT} = 9$ с.

Провели также серию из пяти опытов с трактором МТЗ-82, в которых исследовали влияние начальной плотности почвы на ее ползучесть и уплотнение. 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; $\rho_0 = 1,1412$ г/см³; $\rho(H_1) = 1,602$ г/см³; $\rho(H) = 1,88$ г/см³; $w = 15 \%$;

Таблица 1

Начальная плотность почвы в ряде опытов

№ опыта	Плотность почвы при различных y , г/см ³		
	ρ_0	$\rho(0,3)$	$\rho(1)$
1	1,1412	1,6017	1,88
2	1,2	1,62	1,88
3	1,3	1,65	1,88
4	1,4	1,7	1,88
5	1,5	1,75	1,88

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	15 433,4	18 577,5	19 162,7	19 301,3	19 324,2
g	1,7545	0,345	0,0826	0,0205	0,0102
$\Delta\varepsilon$	0,0112	0,0184	0,0004	0,0001	0
$\Delta\rho(0,05)$, г/см ³	0,0358	0,067	0,016	0,0039	0,0002
$\rho_H(0,05)$, г/см ³	1,7017	1,8452	1,8699	1,8765	1,8776
H_{2H} , м	0,8771	0,8395	0,832	0,8302	0,8299

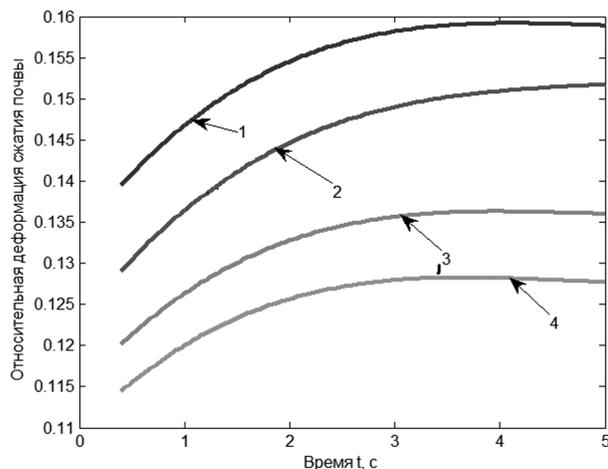


Рис. 1. Зависимости при ползучести после остановки трактора относительной деформации сжатия почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях начальной плотности почвы:

1–4 — при $\rho(y)$ по данным опытов 1–3 и 5, приведенным в табл. 1

$t_0 = 0,2$ с; $\sigma_m = 100$ кПа; $\omega = 2$ с⁻¹. В других опытах изменяли ρ_0 , а остальные влияющие факторы оставались такими же, как в опыте № 1.

Получили уравнения регрессии, описывающие 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):

$$\rho = 1,1412 + 1,8733y - 1,1333y^2, \text{ где } y \in [0; 1];$$

2) для $t = 1$ с:

$$\rho = 1,6603 + 0,8255y - 0,6588y^2, \text{ где } y \in [0,1225; 0,8775];$$

3) для $t = 3$ с:

$$\rho = 1,8337 + 0,1706y - 0,1376y^2, \text{ где } y \in [0,1605; 0,8395];$$

4) для $t = 5$ с:

$$\rho = 1,8681 + 0,0435y - 0,0352y^2, \text{ где } y \in [0,1681; 0,8319];$$

5) для $t = 9,2$ с:

$$\rho = 1,8786 + 0,0051y - 0,0042y^2, \text{ где } y \in [0,1704; 0,8296]. \quad (10)$$

Корреляционные отношения для каждого из уравнений (10) не менее 0,98. Из уравнений (10) следует, что на глубине $y = 0,1$ м при $t = 0; 1; 3; 5; 9,2$ с соответственно $\rho(0,1) = 1,3172; 1,7363; 1,8474; 1,872; 1,8791$ г/см³. Пятое из уравнений (10) показывает, что $t_{CT} = 9,2$ с.

Опыты выявили значительное влияние начальной плотности почвы на изменение ее относительных деформаций $\varepsilon(t)$ и их приращения $\Delta\varepsilon(t)$ в различных слоях почвы на стадии начального возрастания сжимающих напряжений и при ползучести почвы на время t_{CT} стабилизации деформаций.

На рис. 1 представлены зависимости суммарной относительной деформации сжатия почвы от времени t при ползучести почвы 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 данные показывают, что с возрастанием начальной плотности почвы снижаются величины $\varepsilon(t)$, соответствующие одному и тому же значению t .

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие зависимости плотности $\rho_H(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м от времени t при ее ползучести после остановки трактора при различных значениях начальной плотности. Как видно из рис. 2, чем меньше начальная плотность почвы, тем больше она уплотняется после остановки трактора.

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 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: для $\rho_0 = 1,14$ и $1,5$ г/см³; для $\omega = 0,9$ и 5 с⁻¹; для $w = 15$ и 20 %. Ввели обозначения: $x_1 = \rho_0$; $x_2 = \omega$; $x_3 = w$.

Уравнения регрессии отыскивали в следующем виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (11)$$

где y — значение результирующего фактора; b_0, \dots, b_7 — постоянные коэффициенты; x_1, x_2, x_3 — влияющие факторы [13].

Получили выраженные в натуральных значениях переменных уравнения регрессии, характеризующие показатели $\rho_H(0,05)$, $\Delta\rho_H(0,05)$, $t_{ст}$. Нашли:

$$\begin{aligned} \rho_H(0,05) = & 0,7413 + 0,6037x_1 + 0,1874x_2 + \\ & + 0,0018x_3 - 0,1152x_1x_2 - 0,0012x_1x_3 - \\ & - 0,002x_2x_3 + 0,0014x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 3 представлена построенная с использованием уравнения регрессии (12) поверхность, отражающая зависимости $\rho_H(0,05)$ от ρ_0 и ω при $w = 17,5$ %. Из рис. 3 видно, что увеличение ρ_0 и ω сопровождается увеличением $\rho_H(0,05)$.

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

Отмеченный характер влияния начальной плотности почвы на ее ползучесть и уплотнение обусловлен тем, что при увеличении плотности 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.

Увеличение скорости деформирования почвы при $t \in [0; t_0]$ приводит к возрастанию характеристики q и

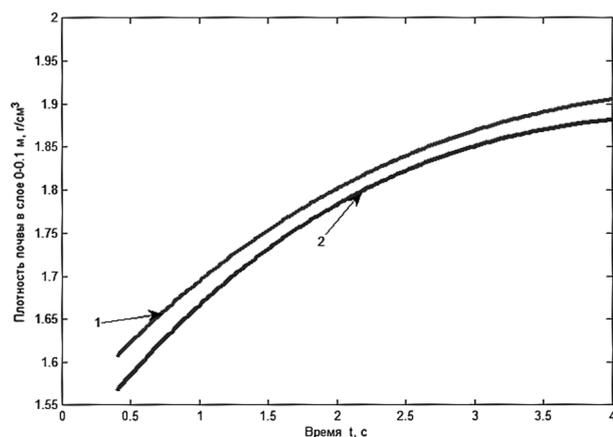


Рис. 2. Зависимости при ползучести после остановки трактора плотности почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях начальной плотности почвы:

1, 2 — при $\rho(y)$ по данным опытов 1 и 5, приведенным в табл. 1

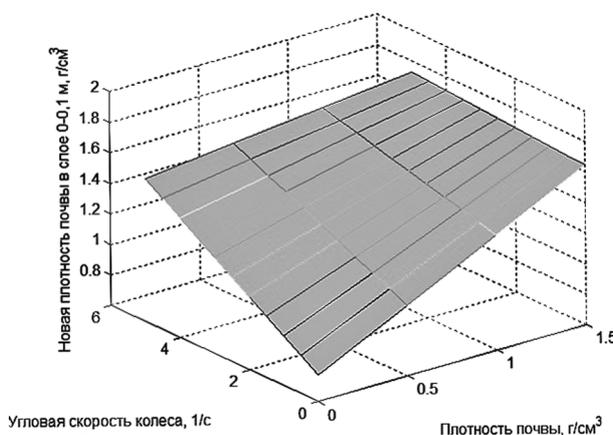


Рис. 3. Зависимости плотности почвы в слое 0–0,1 м при ползучести после остановки трактора от ρ_0 и ω

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 влажности 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, а также при возникающей после его остановки ползучести почвы. Расчеты выполнены с использованием полученных в полевых испытаниях экспериментальных данных о вязкоупругих свойствах дерново-подзолистой легкоуглинистой почвы известного гранулометрического со-

става 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 [1, 8], а также о ползучести в других деформируемых средах [14]. Прогнозирование результатов изменения напряженно-деформированного состояния и уплотнения исследованной почвы при ползучести после остановки трактора, выполненное на основе математического моделирования вязкоупругих свойств почвы уравнением (2), адекватно.

Достоинства предложенного метода расчета заключаются, в частности, в том, что он позволяет найти показатели напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы при проходах трактора и при ползучести после его остановки изменяющимися во времени и на различной глубине верхнего деформируемого слоя. Это позволяет получить весьма важные данные о физическом состоянии почвы дополнительно к выявляемым другими методами.

Плотность подпахотного слоя почвы значительно влияет на урожайность с.-х. культур. Разработанный метод расчета позволяет выявить вызванное воздействием трактора уплотнение подпахотного слоя почвы, увеличение со временем плотности пахотного и подпахотного слоев.

Необходимы исследования реологических свойств различных почв, а также процессов их уплотнения мобильными машинами с учетом реологических свойств. Полученные результаты будут полезны при разработке комплекса мер, направленных на сохранение и повышение плодородия почв.

Литература и источники

1. Белов Г. Д., Подолько А. П. Уплотнение почвы и урожайность зерновых. Минск: Ураджай, 1985. 64 с.
2. Золотаревская Д. И. Закономерности деформирования почв: Математическое моделирование. М.: Librokom, 2013. 144 с.
3. Денисов Н. Я. О природе деформаций глинистых пород. М.: Изд-во Министерства речного флота СССР, 1951. 200 с.
4. Пархоменко Г. Г., Щириков В. Н. Расчет взаимодействия катка с почвой с использованием теории вязкоупругости // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007, № 5. С. 28–33.
5. Золотаревская Д. И., Бурдыкин В. И., Матвеев В. В. и др. Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора // Известия ТСХА. 1989, № 1. С. 175–183.
6. Золотаревская Д. И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1997. 452 с.
7. Золотаревская Д. И. Математическое моделирование релаксационных процессов в почвах // Почвоведение. 2003, № 4. С. 429–440.
8. Золотаревская Д. И. Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой супесчаной почвы при воздействии колесного трактора // Почвоведение. 2013, № 7. С. 829–839. DOI: 10.7868/S0032180X13070150.
9. 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.

10. 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.

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

12. Золотаревская Д. И. Характеристики вязкоупругих и упругих свойств эластичных колес // Известия ТСХА. 1989, № 2. С. 142–161.

13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

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

References

1. Belov G. D., Podol'ko A. P. *Uplotnenie pochvy i urozhaynost' zernovykh* [Soil compaction and the yield of grain crops]. Minsk, Uradzhay Publ., 1985, 64 p.
2. Zolotarevskaya D. I. *Zakonomernosti deformirovaniya pochv: Matematicheskoe modelirovanie* [Regularities of soil deformation: Mathematical modeling]. Moscow, Librokom Publ., 2013, 144 p.
3. Denisov N. Ya. *O prirode deformatsiy glinistykh porod* [On the nature of clay rock deformations]. Moscow, Ministry of River Fleet of the USSR Publ., 1951, 200 p.
4. Parkhomenko G. G., Shchirov V. N. Calculation of interaction of roller with the soil using the theory of viscoelasticity. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2007, no. 5, pp. 28–33 (in Russ.).
5. Zolotarevskaya D. I., Burdykin V. I., Matveev V. V., Trushin V. G., Lyadin V. P. Change of viscoelastic properties of soil under the influence of a wheeled tractor. *Izvestiya TSKhA*, 1989, no. 1, pp. 175–183 (in Russ.).
6. Zolotarevskaya D. I. *Osnovy teorii i metody rascheta uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu kolesnykh dvizhiteley mobil'noy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Fundamentals of the theory and methods for calculating the compacting effect on soil of wheels of mobile agricultural machinery]. DSc in Engineering thesis. Moscow, 1997, 452 p.
7. Zolotarevskaya D. I. Mathematical modeling of relaxation processes in soils. *Pochvovedenie*, 2003, no. 4, pp. 429–440 (in Russ.).
8. Zolotarevskaya D. I. Change of rheological properties and density of sod-podzolic sandy loam soil under the influence of a wheeled tractor. *Pochvovedenie*, 2013, no. 7, pp. 829–839 (in Russ.). DOI: 10.7868/S0032180X13070150.
9. Zolotarevskaya D. I., Ivantsova N. N., Lyadin V. P. Mathematical modeling of soil deformation by rolling wheels. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2008, no. 5, pp. 28–33 (in Russ.).
10. Zolotarevskaya D. I., Ivantsova N. N. Mathematical modeling and calculation of the compacting effect on soil of wheeled tractors. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2008, no. 7, pp. 36–40 (in Russ.).
11. Zolotarevskaya D. I. Calculation of soil compaction by wheeled tractors. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 1990, no. 6, pp. 10–14 (in Russ.).
12. Zolotarevskaya D. I. Characteristics of viscoelastic and elastic properties of elastic wheels. *Izvestiya TSKhA*, 1989, no. 2, pp. 142–161 (in Russ.).
13. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 280 p.
14. Koltunov M. A., Kravchuk A. S., Mayboroda V. P. *Prikladnaya mekhanika deformiruемого tverdogo tela* [Applied mechanics of deformable solids]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983, 352 p.