

УДК 631.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЧВЫ ПОСЛЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ВОЗРАСТАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Золотаревская Д.И.

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

Исследованы процессы ползучести в уплотняющихся связных почвах, происходящие после кратковременного начального воздействия на эти почвы возрастающей нагрузки по синусоидальному, а также по линейному законам. Вязкоупругие свойства уплотняющихся почв описаны дифференциальным уравнением первого порядка, связывающим сжимающие напряжения, скорости изменения сжимающих напряжений и относительной деформации сжатия. Рассмотрены вязкоупругие свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, выявленные в полевых испытаниях. В исследовании учтено, что плотность почвы переменна по глубине деформируемого слоя. На основании статистической обработки экспериментальных данных зависимость начальной плотности почвы от глубины принята квадратичной. Выполнены компьютерные эксперименты, в которых найдены показатели, позволяющие оценить количественно изменения деформаций, напряжений в почве и плотности почвы при ее ползучести после кратковременного возрастания динамической нагрузки. Выявлено влияние на эти показатели начальной плотности почвы, ее влажности, скорости возрастания нагрузки и других факторов.

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

STUDY ON PROCESS OF CREEP OF SOIL AFTER SHORT-TERM INCREASE OF DYNAMIC LOAD

Zolotarevskaya D.I.

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

Creep processes in cohesive soils occurring after the initial impact on these soils loads for sinusoidal as well as linear laws. Viscoelastic properties of the soil describes first-order differential equation that relates the compressive stress, the rate of change of compressive stresses and relative deformation of the compression. Considered viscoelastic properties of soddy-podzolic light loamy soil identified in field tests. The study took into account that the density of soil is a function of the depth of deformable layer. Based on statistical processing experimental data, dependence of initial soil density as a function of depth adopted quadratic. Performed computer experiments, in which found indicators that can estimate quantify the change of the deformation, stress, soil density when its creep after short-term increase for dynamic loads. Identified impact on these figures the initial soil density, humidity, increasing load speed and other factors.

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

Одной из важнейших экологических проблем является в настоящее время проблема сохранения и повышения плодородия почв. Решению этой проблемы посвящены исследования многих ученых. Однако сохранению плодородия почв препятствует целый ряд негативных антропогенных воздействий. Работа на полях мобильной сельскохозяйственной техники приводит к переуплотнению почв, что вызывает ухудшение их агротехнических свойств и снижение урожайности сельскохозяйственных культур [13].

Для получения высоких и устойчивых урожаев необходимы благоприятные физические свойства почв. Основными параметрами, определяющими эти свойства, являются гранулометрический состав почв и содержание в них органических веществ, а также плотность и влажность почвы [1]. Большое влияние на свойства почв, от которых зависит урожайность полевых культур,

оказывают сжимающие напряжения σ , возникающие в почвах в результате воздействия ходовых систем тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных машин.

Для получения высоких и устойчивых урожаев необходимы благоприятные физические свойства почв. Основными параметрами, определяющими эти свойства, являются гранулометрический состав почв и содержание в них органических веществ, а также плотность и влажность почвы [1]. Большое влияние на свойства почв, от которых зависит урожайность сельскохозяйственных культур, оказывают сжимающие напряжения σ , возникающие в почвах в результате воздействия ходовых систем мобильных машин.

Для решения практических задач важно находить зависимости между внешними нагрузками и соответствующими им деформациями почв с учетом фактора времени, то есть с учетом реологических свойств почв.

Математическое моделирование процессов деформирования почв, основанное на результатах исследований их реологических свойств, позволит разработать эффективные меры защиты почв от вредных воздействий сельхозтехники.

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 [3, 9]. Настоящая работа посвящена исследованию и математическому моделированию ползучести и уплотнения почв, находящихся в таком состоянии.

Время t взаимодействия с почвой движителей мобильных машин и рабочих органов сельскохозяйственных машин и орудий при выполнении полевых работ весьма мало. Поэтому важно исследовать изменение вязкоупругих свойств и плотности почв при таких малых t .

Ранее нами в работе [11] был предложен метод расчета, позволяющий находить показатели напряженно-деформированного состояния почвы в различных условиях нагружения и приращение плотности почвы на различной глубине, возникающее в результате действия внешней нагрузки; исследован процесс ползучести почвы.

Цели данной работы состояли в следующем: развить полученные в работе [11] результаты исследования и математического моделирования деформирования и уплотнения почвы с учетом ее вязкоупругих свойств; уточнить и применить предложенный метод расчета показателей напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы, изменяющихся при кратковременном динамическом возрастании нагрузки, а также расчета показателей последующего процесса ползучести почвы.

Материалы и методы исследования

Нами проведены: теоретическое исследование изменения характеристик вязкоупругих свойств уплотняющейся связной почвы, показателей ее напряженно-деформированного состояния и уплотнения при кратковременном возрастании динамических нагрузок по синусоидальному, а также по линейному законам, теоретическое исследование последующей ползучести почвы. На основе использования полученных нами экспериментальных данных выполнены компьютерные эксперименты по разработанным программам.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментального исследования вязкоупругих свойств почвы

На полях опытного хозяйства РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева были прове-

дены экспериментальные исследования реологических свойств, закономерностей деформирования и уплотнения почв в результате действия динамических нагрузок при работе колесных тракторов МТЗ-82 [4–9]. В данной работе в расчетах использованы экспериментальные данные, полученные в работе [4]. Содержание этих опытов отражено также в работе [10]. Исследуемая почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая. На экспериментальном поле верхний деформируемый слой почвы, распространенный на глубину $H = 1,0$ м, расположен на практически недеформируемом основании. Поверхность почвы горизонтальна. Проведен ряд серий опытов, каждая из которых состояла из шести последовательных проходов по почве трактора.

В работе [11] выполнено исследование для почвы, верхний деформируемый слой которой до воздействия на нее штамповой нагрузки распространен на глубину $H = 0,51$ м.

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 .

В опытах, описанных в работах [4, 5], на ряде участков поля, отобранных случайным образом, находили плотность ρ и влажность w почвы перед каждой серией опытов в слоях $0 - 0,1, \dots, 0,9 - 1,0$ м. Для получения аналитической зависимости $\rho(y)$ в качестве представителя каждого слоя почвы принимали его середину. В результате статистической обработки экспериментальных данных из работ [4, 5] нами получены квадратичные зависимости плотности ρ почвы от глубины y

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

где k_1 и $k_2 \neq 0$ – коэффициенты, ρ_0 – свободный член. Для почвы опытного поля (при $w = 15,5\%$, $\rho_0 = 1,1412$ г/см³, $k_1 = 1,8762$ г/(см³ м), $k_2 = 1,1374$ г/(см³ м²); корреляционное отношение в зависимости (1) равно 0,9861. Высокое корреляционное отношение свидетельствует о весьма большой точности нахождения плотности почвы по формуле (1). 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 $\sigma < \sigma_{пр}$. В данной работе зависимость начальной плотности почвы от глубины y описана уравнением (1). Зависимость (1) применена также в работах [6–8].

На основании результатов исследований [4 – 9] закономерность сжатия почвы в направлении оси Oy при каждом фиксированном y будем моделировать дифференциальным уравнением

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

где ε – относительная деформация сжатия; t – время, с; $p(y)$ и $q(y)$, c^{-1} и МПа – характеристики реологических (вязкоупругих) свойств почвы. Границы применимости этого уравнения для конкретных почв выявляют по экспериментальным данным. Адекватность уравнения (2) при моделировании закономерности сжатия легкосуглинистой почвы известного гранулометрического состава при $w = 15\text{--}26\%$ и при определенных значениях t , σ , ε , а также супесчаной почвы подтверждена экспериментально [4–9].

Характеристика p , c^{-1} зависит от круговой частоты ω , c^{-1} гармонического процесса деформирования, возникающего, в частности, в результате деформирования почвы при качении цилиндрического штампа или колеса. В расчетных 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 числа экспериментальных значений g и q , полученных на опытном поле при различных p , ω и w , найдены уравнения регрессии для определения при каждом фиксированном y характеристик g и q исследованной почвы:

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

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

с коэффициентами множественной корреляции, равными соответственно 0,7931 и 0,7528. Теснота связей в этих уравнениях достаточно большая, поэтому они могут быть применены в расчетах для исследованной почвы и для других почв, имеющих близкие к ней физические свойства. Уравнения (3) и (4) соответствуют следующим интервалам значений влияющих факторов: $p = 1,14\text{--}1,88 \text{ г/см}^3$, $w = 15\text{--}26\%$, $\omega = 0,93\text{--}5,01 \text{ с}^{-1}$. В уравнениях (3) и (4) при $y = 0$ плотность почвы $\rho = \rho_0$.

Результаты теоретического исследования ползучести почвы после кратковременного возрастания динамической нагрузки

Пусть на поверхность почвы посредством штампа передается внешняя нагрузка. Ширина штампа принята достаточно большой, в этом случае деформацию почвы можно считать плоской. На основе

математического моделирования процесса распространения в почве при ее нагружении вязкоупругих затухающих волн деформации сжатия почвы дифференциальным уравнением с частными производными четвертого порядка и с переменными коэффициентами нами были получены формулы, позволяющие найти глубину H_p распространения деформации сжатия почвы, приращение плотности и плотность почвы на различной глубине. Выполненные нами исследования показали, что при $H \leq 1$ м глубина $H_p = H$, поэтому в данной работе 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 $h(t)$ – переменная абсолютная деформация сжатия (осадка) почвы.

В теории вязкоупругости чаще рассматривают ползучесть в деформируемых средах при постоянных уровнях напряжений, создаваемых в результате ступенчатого статического изменения нагрузок, то есть принимают, что каждый определенный уровень напряжений достигается мгновенно [12]. Нами учтено, что внешняя нагрузка прикладывается к почве не мгновенно, а возрастает в течение некоторого времени.

В механике грунтов выявляют в основном их строительные свойства, характеризующие деформирование грунтов как оснований фундаментов сооружений, поэтому ползучесть грунтов исследуют в длительные промежутки времени, измеряемые часами и днями [2, 14]. Нами исследована ползучесть почв в малые промежутки времени, возникающая после возрастания сжимающих напряжений σ в почве в секунды и их доли.

Ползучесть представляет собой процесс изменения во времени деформаций в материале или в деформируемой среде при постоянном напряжении. С целью исследования процесса ползучести нами рассмотрены две стадии изменения напряженно-деформированного состояния почвы. Первая стадия соответствует времени $t \in [0; t_0]$. На этой начальной стадии изменяются напряжения в почве и ее деформации: $\sigma = \sigma(t)$, $\varepsilon = \varepsilon(t)$. При $t \in [0; t_0]$ σ и ε возрастают: $\sigma \in [0; \sigma_0]$, $\varepsilon \in [0; \varepsilon_0]$.

Вторая стадия изменения напряженно-деформированного состояния почвы (стадия ползучести) соответствует $t \in (t_0; \infty)$. На этой стадии $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$, а деформации с течением времени изменяются: $\varepsilon = \varepsilon(t)$.

Нами выполнено исследование процессов ползучести почвы после кратковременного возрастания действующих на нее сжи-

мающих напряжений по синусоидальному, а также по линейному (равномерное увеличение сжимающих напряжений) законам.

1. *Начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону и последующая ползучесть почвы.*

а) Пусть начальные сжимающие напряжения возрастают по синусоидальному закону:

$$\sigma(t) = \sigma_m \sin \omega t, \quad t \in [0; t_0], \quad (6)$$

где σ_m – амплитуда напряжения. Подставив σ'_t в уравнение (2) и учитывая начальное условие: при $t = 0$ относительная деформация сжатия почвы $\varepsilon = 0$, найдем

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_m}{q} (\sin \omega t - g \cos \omega t + g), \quad t \in [0; t_0]. \quad (7)$$

Получили формулу для определения приращения плотности почвы на различной глубине. При $H_p = H$ и квадратичной зависимости (1) начальной плотности почвы от глубины приращение плотности почвы на глубине $h_0 \leq H$ приближенно равно

$$\Delta\rho(h_0) \approx (6\rho_0 + 3k_1h_0 + 2k_2h_0^2)(H - h_0)h_0 / (3(H + \mu h_0)^2), \quad (8)$$

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

В результате действия внешней нагрузки с течением времени t изменяются деформации почвы, глубина распространения деформации сжатия почвы, характеристики g и q ее вязкоупругих свойств. Осадка почвы и новая глубина распространения ее деформируемого слоя перед началом стадии ползучести соответственно равны: $h_0 = h(t_0)$ и $H_n = H - h_0$. Характеристики вязкоупругих свойств почвы перед началом ее ползучести вследствие изменения плотности почвы равны g_1 и q_1 .

б) Стадия ползучести почвы соответствует $t \in (t_0; \infty)$. На этой стадии $\sigma = \sigma_0 = \sigma_m \sin \omega t_0 = \text{const}$; $\sigma'_t = 0$. Подставив $\sigma'_t = 0$ в уравнение (2) и учитывая начальное условие: при $t = t_0$ относительная деформация $\varepsilon = \varepsilon_0$, получим формулу, характеризующую процесс ползучести почвы:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{g_1 \omega}{q_1} \sigma_0 t, \quad t \in (t_0; \infty). \quad (9)$$

Величину ε_0 , входящую в формулу (9), находим по формуле (7) при значениях $t = t_0$.

Уравнение (9) при постоянных значениях его параметров описывает линей-

ную ползучесть. Оно показывает, что при $\sigma_0 = \text{const}$ 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. Из опытов 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 уплотнения почвы при ползучести учтена в разработанном нами методе расчета.

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 равна

$$(\rho_0)_n = \rho_0 + k_1 h_0 + k_2 h_0^2 + \Delta\rho(h_0). \quad (10)$$

Зная приращения плотности почвы на различной глубине, найдем новые значения ее плотности $\rho_n(y_n)$ для всех $y_n \in [0, H_n]$. В соответствии с полученными ранее результатами [8, 9] зависимость плотности почвы от глубины y_n аппроксимирована квадратичной функцией вида (1), но с измененными входящими в нее параметрами.

При изменении плотности почвы изменяются ее вязкоупругие свойства. Эти свойства определяются новыми значениями характеристик g и q ее вязкоупругих свойств. Характеристики g и q вязкоупругих свойств исследовавшейся почвы находим по формулам (3) и (4) при $(\rho_0)_n = (\rho_0)_{t_0}$, то есть при $t = t_0$. С течением времени в связи с уплотнением почвы характеристики ее вязкоупругих свойств изменяются.

2. *Начальное возрастание сжимающих напряжений по линейному закону и последующая ползучесть почвы.*

а) Пусть сжимающие напряжения, передаваемые на поверхность почвы посредством плоского штампа и действующие в направлении оси Oy , со временем ($t \geq 0$) возрастают по линейному закону

$$\sigma(t) = Mvt, \quad t \in [0; t_0], \quad (11)$$

где v – линейная скорость изменения сжимающих напряжений, м/с; M – коэффициент пропорциональности, кПа/м. В расчетах получено, что численно $M = 1$. Если $t = 0$, то $v = 0$; если $t > 0$, то $v = \text{const} > 0$; $\sigma(t) < \sigma_{\text{пр}}$. Рассмотрим деформирование почвы вдоль оси Oy .

Подставив выражение скорости изменения напряжений $\sigma'_t = Mv$ в уравнение (2) и учитывая начальное условие: при $t = 0$ относительная деформация $\varepsilon = 0$, найдем,

$$\varepsilon(t) = Mvt(1 + g\omega t / 2) / q, \quad t \in [0; t_0]. \quad (12)$$

б) Стадия ползучести почвы соответствует $t \in (0; \infty)$. На этой стадии $\sigma = \sigma_0 = Mvt_0 = \text{const}$; $\sigma'_t = 0$. Процесс ползучести почвы характеризуется формулой (9) с переменными значениями характеристик вязкоупругих свойств почвы. Величину ε_0 , входящую в эту формулу, находим в данном случае по формуле (12) при значении $t = t_0$.

Характеристики g и q , а также g_1 и q_1 вязкоупругих свойств почвы и показатели ее уплотнения при $\sigma = \sigma_0 = Mvt_0$ находим аналогично тому, как это сделано для случая начального возрастания сжимающих напряжений по закону (6).

Метод расчета изменения показателей напряженно-деформированного состояния почвы в результате кратковременного начального возрастания динамической нагрузки и последующей ползучести

На основе выполненного математического моделирования нами разработан метод расчета показателей изменения напряженно-деформированного состояния почвы и показателей ее уплотнения в случае кратковременного возрастания при $t \in [0; t_0]$ начальных сжимающих напряжений $\sigma(t)$ по законам (6) и (11) и последующей ползучести почвы при зависимости (1) начальной плотности почвы от глубины. В расчетах учитывается, что деформация стабилизируется в течение времени $t_{\text{ст}}$ стабилизации деформации в результате того, что принимается во внимание изменение с течением $t < t_{\text{ст}}$ плотности $\rho(y)$ почвы и, следовательно, характеристик $g(y)$ и $q(y)$ ее вязкоупругих свойств.

Исходными для выполнения каждого расчета являются следующие данные: H , глубина $0 < H_1 < H$, ρ_0 , $\rho(H_1)$, $\rho(H)$, w , σ_m , t_0 , коэффициенты уравнений регрессии $q = q(\rho, \omega, w)$, $g = g(\rho, \omega, w)$ (для исследовавшейся легкосуглинистой почвы это коэффициенты уравнений (3) и (4)), ω (в случае возрастания $\sigma(t)$ при $t \in [0; t_0]$ по синусоидальному закону (6)) или v (в случае возрастания $\sigma(t)$ при $t \in [0; t_0]$ по линейному закону (11)).

Характерные особенности предложенного метода расчета состоят в следующем. Величины деформации сжатия почвы, характеристик g и q ее вязкоупругих свойств, показатели напряженно-деформированного состояния и уплотнения почвы 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 их изменение происходит дискретно. В расчетах 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 в случае возрастания сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6): напряжение $\sigma_0 = \sigma(t_0) = \sigma_m \sin(\omega t_0)$, ε_0 (по формуле (7) при $t = t_0$), $h_0 = (\varepsilon_0 H) / (1 + \varepsilon_0)$, $\Delta \rho(h_0)$ по формуле (8), $\rho(h_0)$, $(\rho_0)_н$ по формуле (10), $\rho(0,05)$ и $\rho_н(0,05)$ – старое и новое значения плотности почвы в слое $0 - 0,1$ м, характеристики g_1 и q_1 вязкоупругих свойств почвы при $(\rho_0)_н$ – новом значении ρ_0 . Для $H_{1н}$ – нового значения глубины, соответствующей глубине H_1 , новая плотность почвы равна $\rho_н(H_{1н})$.

На второй стадии изменения напряженно-деформированного состояния почвы (стадии ползучести) приближенно считаем, что сжимающие напряжения 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 , соответствующем ползучести почвы, вычисляем, воспользовавшись формулой (9), приращение $\Delta \varepsilon_i$ относительной деформации сжатия почвы, Δh_i – приращение абсолютной деформации сжатия почвы, приращение суммарной 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, новую глубину распространения деформируемого слоя почвы, находим новую зависимость вида (1) плотности почвы от глубины. При $t = t_0 + \sum_{i=1}^k \Delta t_i$ и $y_{нk} = 0$ имеем

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^k \Delta \varepsilon(\Delta t_i), \quad (13)$$

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

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

Аналогично выполняются расчеты в случае линейного закона (11) возрастания

сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ и последующей ползучести почвы.

Результаты компьютерных экспериментов.

Анализ полученных результатов

Нами разработаны компьютерные программы, позволяющие найти по полученным формулам и алгоритмам показатели, характеризующие напряженно-деформированное состояние и уплотнение почвы в различные фиксированные моменты времени при кратковременном начальном динамическом возрастании сжимающих напряжений в течении времени $t \in [0; t_0]$ и последующей ползучести почвы. По этим программам выполнены компьютерные эксперименты, в которых найдены указанные показатели для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, вязкоупругие свойства которой исследованы в опытах, описанных в работах [4, 5]. Эти свойства, которые отражены также в данной работе, описывает уравнение (2). Характеристики вязкоупругих свойств почвы перед началом ее деформирования находим по уравнениям регрессии (3) и (4). Опыты по исследованию ползучести почвы выполнили для двух режимов начального деформирования почвы при $t \in [0; t_0]$: 1) по синусоидальному закону (6) (опыты группы А); 2) по линейному закону (11) (опыты группы Б).

В случае начального возрастания сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6) исследовали влияние на ползучесть и уплотнение почвы: 1) ее начальной плотности, 2) круговой частоты ω изменения сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$, 3) влажности w почвы, 4) времени t_0 начального возрастания сжимающих напряжений, 5) амплитуды напряжений σ_m . Для выявления характера и количественной оценки влияния этих факторов выполнили базовый расчет и пять серий однофакторных компьютерных экспериментов (серии 1, А – 5, А).

Базовый расчет 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 каждой из пяти серий компьютерных экспериментов варьировали по одному из основных влияющих факторов, а остальные факторы принимали такими же, как в базовом расчете.

В случае начального возрастания сжимающих напряжений по линейному закону (11) исследовали влияние на ползучесть и уплотнение почвы: 1) ее начальной плотности, 2) скорости v возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$, 3) влажности w почвы, 4) времени t_0 . Для выявления

характера и количественной оценки влияния этих факторов выполнили базовый расчет и четыре серии однофакторных компьютерных экспериментов (серии 1, Б – 4, Б). Базовый расчет 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; $w = 15\%$; $t_0 = 7$ с; $v = 3$ м/с. В каждой из четырех серий компьютерных экспериментов варьировали по одному из основных влияющих факторов, а остальные факторы принимали такими же, как в базовом расчете.

В опытах серий 1, А и 1, Б выявили влияние начальной плотности почвы на исследуемые показатели. Каждая из этих серий состояла из пяти опытов. Начальную плотность почвы в каждом из опытов этих серий принимали по данным табл. 1.

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

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

Таблица 1

Начальная плотность почвы в ряде опытов

№ Опыта	Плотность почвы при различных y , г/см ³		
	ρ_0	$\rho(0,5)$	$\rho(1,0)$
1	1,14	1,602	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

Соответствующие кривые получены нами также для случая изменения $\sigma(t)$ при $t \in [0; t_0]$ по линейному закону (11). Представленные на рис. 1 зависимости $\varepsilon(t)$, а также другие, полученные в результате расчетов данные, показывают, что при одном и том же значении σ_0 большим значениям начальной плотности почвы соответствуют меньшие значения ε_0 . С возрастанием начальной плотности почвы снижаются величины $\varepsilon(t)$, соответствующие одному и тому же значению t , снижаются величины предельного значения относительной деформации сжатия $\varepsilon_{пред}$ почвы.

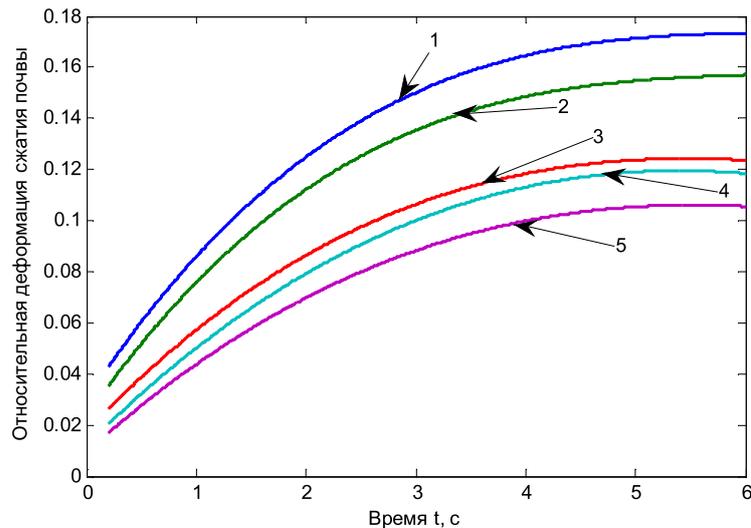


Рис. 1. Зависимости при ползучести относительной деформации сжатия почвы от времени при различных значениях начальной плотности почвы ($w = 15\%$, начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6), $\sigma_m = 100$ кПа, $\omega = 2$ с⁻¹, $t_0 = 0,2$ с). 1, 2, 3, 4 и 5 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1–5, приведенным в табл. 1

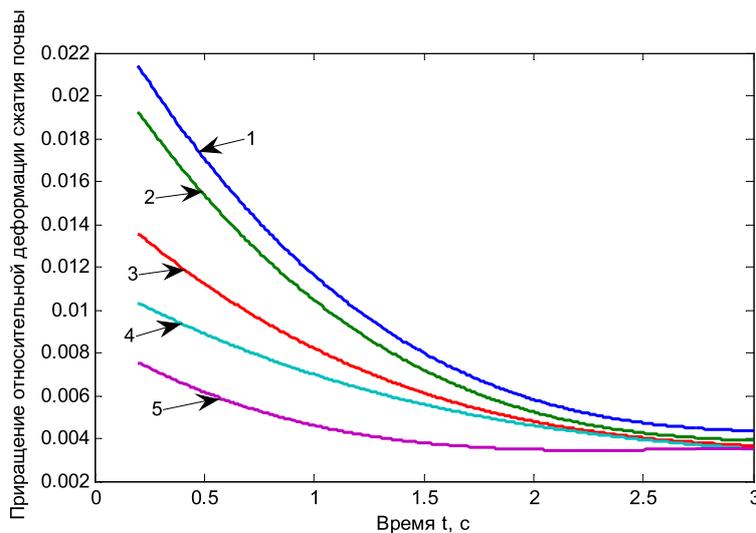


Рис. 2. Зависимости при ползучести приращения относительной деформации сжатия почвы от времени при различных значениях начальной плотности почвы ($w = 15\%$, начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6), $\sigma_m = 100$ кПа, $\omega = 2$ с⁻¹, $t_0 = 0,2$ с), 1, 2, 3, 4 и 5 – при $\rho(y)$ по данным опытов 1–5, приведенным в табл. 1

В табл. 2 приведены данные, отражающие результаты опытов серии 1, Б. Опыты характеризуют деформации и уплотнение почвы при различных значениях ее начальной плотности в случае начального возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ по линейному закону (11) и последующей ползучести до условной стабилизации деформации. В этой таблице даны начальные значения плотности почвы $\rho(0,05)$ в слое 0–0,1 м, численные значения

показателей, полученных при возрастании напряжений по линейному закону: относительных деформаций сжатия почвы ϵ_0 , плотности $\rho_H(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м при $t_0 = 7$ с. Приведены также значения показателей, характеризующих последующую ползучесть почвы: новое значение плотности почвы $\rho_H(0,05)$ в слое 0–0,1 м при $t = 20$ с, время условной стабилизации деформаций $t_{ст}$, $\rho_{ст}(0,05)$, а также приращения $\Delta\rho(0,05)$ при $t_{ст}$, $\Delta\epsilon(t_{ст})$.

Таблица 2

Показатели деформации и уплотнения почвы при различных значениях ее начальной плотности в случае начального возрастания сжимающих напряжений по линейному закону и последующей ползучести почвы до условной стабилизации деформации

Показатели	При ρ_0 , г/см ³				
	1,14	1,2	1,3	1,4	1,5
В результате возрастания сжимающих напряжений в течение времени $t_0 = 7$ с					
σ_0 , кПа	21	21	21	21	21
ε_0	0,2679	0,2256	0,1849	0,1476	0,1258
$\rho(0,05)$, г/см ³	1,2534	1,2856	1,4439	1,4533	1,5458
h_0 , см	0,2113	0,1841	0,1514	0,1286	0,1117
$\rho_n(0,05)$, г/см ³ при $t_0 = 7$ с	1,2636	1,2897	1,3731	1,4620	1,5313
В результате последующей ползучести					
$\rho_n(0,05)$, г/см ³ при $t = 20$ с	1,4715	1,4805	1,4923	1,5434	1,6009
t_{cr} , с	108	107	105	91	69
$\rho_{cr}(0,05)$, г/см ³	1,6762	1,6730	1,6699	1,6698	1,6698
$\Delta \rho(0,05)$, г/см ³ При t_{cr}	$4,04 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$
$\Delta \varepsilon(t_{cr})$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3

Показатели деформации и уплотнения почвы в случае начального возрастания сжимающих напряжений по линейному закону с различными линейными скоростями и последующей ползучести почвы до условной стабилизации деформации

Показатели	При скорости v , м/с		
	1	2	4
В результате возрастания напряжений в течение времени $t_0 = 7$ с			
σ_0 , кПа	7	14	28
ε_0	0,6045	0,6147	0,9675
$\rho(0,05)$, г/см ³	1,2648	1,2648	1,2648
h_0 , см	3,767	3,793	4,917
$\rho_n(0,05)$, г/см ³ при $t_0 = 7$ с	1,4039	1,4577	1,4682
В результате последующей ползучести			
$\rho_n(0,05)$, г/см ³ при $t = 20$ с	1,4921	1,5745	1,5834
t_{cr} , с	274	144	35,5
$\rho_{cr}(0,05)$, г/см ³	1,78	1,75	1,72
$\Delta \rho(0,05)$, г/см ³ при t_{cr}	$4,61 \cdot 10^{-4}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$	$7,73 \cdot 10^{-4}$
$\Delta \varepsilon(t_{cr})$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-4}$

Пр и м е ч а н и е . Начальная плотность почвы – по данным опыта 1 из табл. 1.

В опытах серии 2, А выявили влияние на исследуемые показатели круговой частоты ω в случае начального возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ по синусоидальному закону (6). В опытах серии 2, Б выявили влияние на исследуемые показатели линейной скорости v в случае начального возрастания сжимающих напря-

жений при $t \in [0; t_0]$ по линейному закону (11). Каждая из этих серий состояла из пяти опытов.

В табл. 3 приведены данные, отражающие результаты опытов серии 2, Б. Опыты характеризуют деформации и уплотнение почвы при одинаковых значениях ее начальной плотности в случае начального

возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ по линейному закону (11) и последующей ползучести до условной стабилизации деформации. В этой таблице даны начальные значения плотности почвы $\rho(0,05)$ в слое 0–0,1 м, численные значения показателей, полученных в случае возрастания сжимающих напряжений по закону (11): относительных деформаций сжатия почвы ε_0 , плотности $\rho(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м при $t_0 = 7$ с. Приведены также значения показателей, характеризующих последующую ползучесть почвы: новое значение плотности почвы $\rho_n(0,05)$ в слое 0–0,1 м при $t = 20$ с, время условной стабилизации деформаций t_{ct} , $\rho_{ct}(0,05)$, а также приращения

$\Delta\rho(0,05)$ при t_{ct} , $\Delta\varepsilon(t_{ct})$. Аналогичные данные получены в опытах серии 2, А.

Результаты расчетов показывают, что с ростом ν , а также с ростом ω относительные деформации почвы возрастают до своего предельного значения $\varepsilon_{пред}$, а величины $\varepsilon_{пред}$ и время t_{ct} снижаются. На рис. 3 и рис. 4 приведены кривые, характеризующие соответственно зависимость приращения $\Delta\rho(0,05)$ плотности почвы и плотности $\rho(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м от времени t при различных значениях круговой частоты ω в случае начального возрастания сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6). Из рисунков видно, что увеличение ω приводит к возрастанию $\Delta\rho(0,05)$ и $\rho(0,05)$.

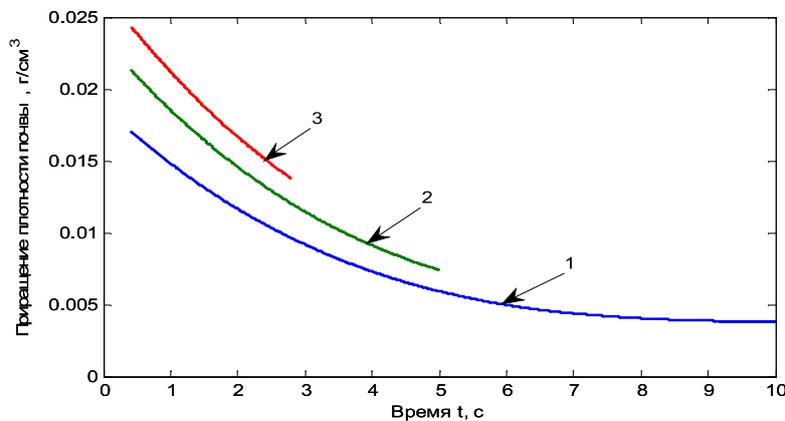


Рис. 3. Зависимости при ползучести приращения плотности почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях круговой частоты ω ($w = 15\%$, начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6), $\sigma_m = 100$ кПа, $\rho(y)$ – по данным опыта 1 из табл. 1, $t_0 = 0,2$ с), 1, 2 и 3 – при $\omega = 1$; 2 и 4 c^{-1}

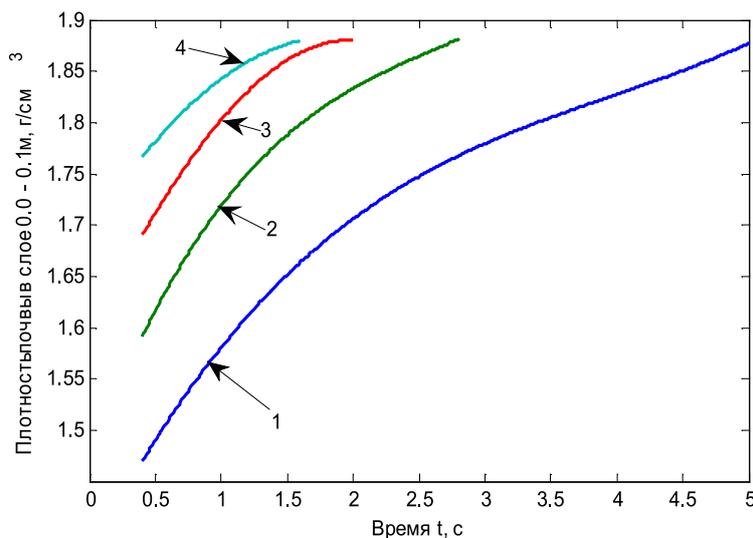


Рис. 4. Зависимости при ползучести плотности почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях круговой частоты ω ($w = 15\%$, начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6), $\sigma_m = 100$ кПа, $\rho(y)$ – по данным опыта 1 из табл. 1, $t_0 = 0,2$ с), 1, 2, 3 и 4 – при $\omega = 1$; 3, 4 и 5 c^{-1}

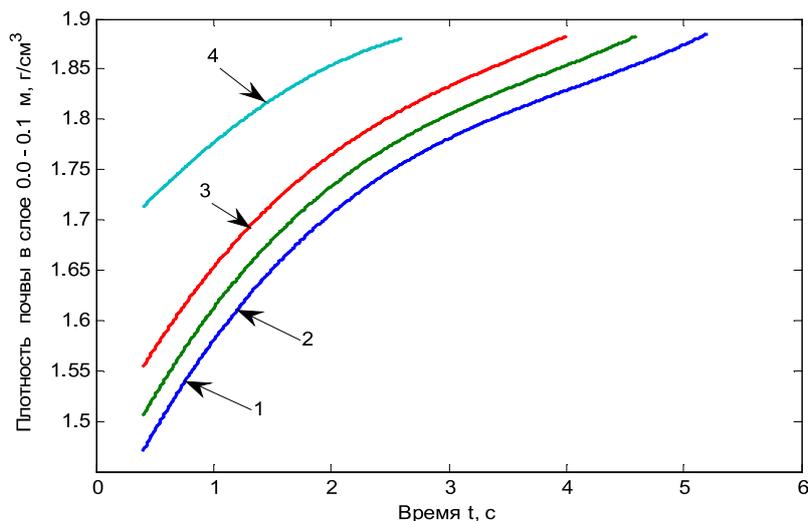


Рис. 5. Зависимости при ползучести плотности почвы в слое 0–0,1 м от времени при различных значениях влажности w почвы (начальное возрастание сжимающих напряжений по синусоидальному закону (6), $\sigma_m = 100$ кПа, $\omega = 2$ с⁻¹, $t_0 = 0,2$ с, $\rho(y)$ – по данным опыта 1 из табл. 1), 1, 2, 3 и 4 – при $w = 15, 17, 19$ и 22%

В опытах серий 3, А и 3, Б нами получены данные, характеризующие изменение исследуемых показателей во времени при различных значениях влажности w почвы. Результаты расчетов показывают, что с ростом w деформации почвы возрастают до $\varepsilon_{пред}^{ст}$, а $t_{ст}$ снижается.

На рис. 5 представлены кривые, характеризующие зависимости плотности $\rho(0,05)$ почвы в слое 0–0,1 м от времени t при различных значениях влажности w почвы. Как видно из этого рисунка, при одних и тех же значениях t большим значениям w соответствуют большие значения плотности почвы; увеличение w приводит к возрастанию $\rho(0,05)$ и снижению $t_{ст}$.

Анализ полученных результатов показал, что основное влияние на все рассмотренные показатели оказывает начальная плотность почвы. Существенное влияние оказывают также скорость возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ и влажность почвы.

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, а характеристика g убывает, причем $g \rightarrow 0$. Свойства почвы приближаются к упругим.

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) получены аналитические зависимости и алгоритмы, позволяющие расчетным путем находить показатели напряженно-деформированного состояния почвы при различных законах возрастания с течением времени $t \in [0; t_0]$ сжимающих напряжений, а также рассчитывать приращение плотности почвы на различной глубине, возникающее в результате возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$ и при ползучести почвы. Исследован процесс ползучести почвы после кратковременного начального возрастания сжимающих напряжений. 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 возрастания сжимающих напряжений при $t \in [0; t_0]$.

Результаты исследования процесса ползучести этой почвы, полученные в данной работе, согласуются с экспериментальными и расчетными данными о ползучести почв из других опубликованных работ [3] и в других деформируемых средах [2, 12]. Прогнозирование результатов изменения напряженно-

деформированного состояния и уплотнения при ползучести исследованной почвы, выполненное на основе математического моделирования ее вязкоупругих свойств уравнением (2), является адекватным.

Проведенное исследование показало, что на уплотнение почвы влияет целый ряд факторов: гранулометрический состав почвы, содержание в почве органических веществ, ее влажность, глубина распространения деформируемого слоя почвы, характер, скорость, амплитуда, продолжительность времени возрастания сжимающих напряжений, и другие. Для обоснованной оценки изменения физического состояния почвы под действием внешней нагрузки нужно учитывать взаимосвязанное влияние всех этих факторов.

Необходимы исследования вязкоупругих свойств и процессов ползучести различных почв. Полученные результаты будут полезны при разработке комплекса мер, направленных на сохранение и повышение плодородия почв.

Список литературы

1. Бондарев А.Г., Медведев В.В., Русанов В.А. Уплотнение почв техникой // Проблемы почвоведения. Советские почвоведы к XIV Международному конгрессу почвоведов. Сб. научных трудов. – М.: Наука. – 1990. – С. 20–25.
2. Вялов В.В. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа. – 1978. – 447 с.
3. Денисов Н.Я. О природе деформаций глинистых пород. – М.: Изд-во министерства речного флота. – 1951. – 200 с.
4. Золотаревская Д.И., Бурдыкин В.И., Матвеев В.В. и др. Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора // Известия ТСХА – 1987. – Вып. 3. – С. 173–180.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Золотаревская Д.И. Особенности качения колес по вязкоупругой почве // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 8. – С. 22–27.
9. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв: Математическое моделирование. – М.: «Книжный дом Либроком». – 2013. – 144 с.
10. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование процесса релаксации напряжений в почве после ее кратковременного динамического деформирования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 8. – Ч. 3. – С. 448–457.
11. Золотаревская Д.И. Математическое моделирование релаксационных процессов в почвах // Почвоведение. – 2003. – № 4. – С. 429–440.
12. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. – М.: Высшая школа. – 1983. – 352 с.
13. Ксеневиц И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
14. Цытович Н.А. Механика грунтов. Краткий курс. Изд. 7. – М.: URSS. – 2013. – 272 с.