

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ В ДРЕСВЯНО-ЩЕБЕНИСТЫХ ГРУНТАХ С ГЛИНИСТЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-20-31

УДК 69.035.2

**МАНЯХИН И.В.***Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, ivan.manyakhin@mail.ru*

Аннотация

Оценка изменения влажности основания (склона, откоса) за счет неустановившейся фильтрации (инфильтрации) атмосферных осадков является актуальной задачей в рамках проектирования конструкций инженерной защиты (анкерные крепления склонов), поскольку физические, деформационные и прочностные характеристики грунта зависят от количества содержащейся в нем влаги. С целью исследования инфильтрации воды в крупнообломочных грунтах с глинистым заполнителем (делювиально-пролювиальные отложения) выполнена серия лабораторных экспериментов. Ввиду сложности реализации опытов с натурными грунтами, обусловленными наличием крупных частиц, приготавливались модельные грунты-аналоги по водопроницаемости, подбирались коэффициенты фильтрации в лабораторных условиях, соответствующие коэффициентам фильтрации по полевым опытам. Получена зависимость изменения коэффициента фильтрации от количества глинистого заполнителя (пылевато-глинистой фракции). При помощи почвенно-гидрологических констант аппроксимирована кривая водоудерживающей способности функцией Ван Генухтена для модельных грунтов по ветви высушивания. Также для определения кривой водоудерживающей способности по ветви увлажнения для полученных модельных грунтов выполнены опыты по слабонапорной инфильтрации. При помощи численного моделирования с учетом выполненных лабораторных экспериментов по слабонапорной инфильтрации в программном комплексе Plaxis 2D определены параметры модели Ван Генухтена по ветви увлажнения. Рассмотренный в статье подход к оценке водоудерживающей способности и моделированию влагопереноса воды в крупнообломочных грунтах с глинистым заполнителем позволяет прогнозировать изменение влажностного режима основания (склона, откоса) в зависимости от инфильтрации атмосферных осадков, что в свою очередь, позволяет оценить устойчивость конструкций инженерной защиты в зависимости от степени водонасыщения грунта.

Ключевые слова:

устойчивость конструкций; инженерная защита; коэффициент фильтрации; инфильтрация; степень водонасыщения; модельный грунт; кривая водоудерживающей способности

Ссылка для цитирования:

Маняхин, И.В., 2018. Анализ результатов лабораторных исследований неустановившейся фильтрации воды в дресвяно-щебенистых грунтах с глинистым заполнителем. Инженерная геология, Том XIII, № 3, с. 20–31. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-20-31.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF LABORATORY STUDIES OF UNSTEADY FILTRATION IN GRAVEL SOILS WITH CLAY FILLER

MANYAKHIN I.V.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia, ivan.manyakhin@mail.ru

Abstract

Assessment of changing humidity of base due to unsteady filtration (infiltration) of atmospheric precipitation is an actual task for design of engineering protection structures (anchorage slopes), because the deformation and strength characteristics depend on the amount of moisture contained in the soil. A series of laboratory experiments was performed to investigate the infiltration of water in gravel-soils with clay filler (deluvial-proluvial sediments). Due to the difficulties in realizing experiments with natural soils, that are explained by the presence of large particles, model soils were prepared according to the water permeability. Besides, the filtration factor was determined in laboratory conditions corresponding to the filtration factor from the field experiment. The dependence was obtained for the filtration factor on amount of clay filler for model soils. Water retention curve was modeled according to Van Genuchten model for model soils by soil-hydrological constants. Also, to obtain water retention curve the infiltration experiments were performed for selected model soils. Using the numerical simulation and laboratory infiltration experiments in Plaxis 2D helped to identify Van Genuchten model parameters for the draining. The approach considered in the article for assessing the water retention and modeling the moisture transfer of water in gravel soils with clay filler allows predicting a change in the moisture regime of base (slope) during infiltration of atmospheric precipitation, which in turn, allows us to estimate the stability of engineering protection of structures depending on the degree of soil saturation.

Key words:

stability of structures; engineering protection; filtration factor; infiltration; degree of saturation; model soil; water retention curve

For citation:

Manyakhin, I.V., 2018. Analysis of the results of laboratory studies of unsteady filtration in gravel soils with clay filler. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 3, pp. 20–31. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-20-31.

Введение

Процесс неустановившейся фильтрации (инфильтрации) воды в грунтах, обусловленный выпадением атмосферных осадков, и их водоудерживающая способность (удержание воды капиллярными и сорбционными силами) являются важными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве конструкций инженерной защиты в условиях горной местности и субтропического климата. Поскольку от содержания влаги в грунте зависят физические и механические характеристики, следовательно, и от этих же параметров зависят и внутренние усилия в конструкциях, их общая устойчивость.

Как правило, увеличение инфильтрации атмосферных осадков в толщу грунтов возникает в результате срезки поверхностных слоев пылеватого-глинистого грунта, почвенно-растительного слоя, а также за счет корчевания деревьев (изменение режима эвапотранспирации¹).

Увлажнение грунта необходимо рассматривать как отдельное воздействие, влияющее на активацию оползневых процессов и устойчивость основания (склона, откоса), поскольку расчетный коэффициент k_{st} устойчивости естественного откоса при увеличении степени водонасыщения, вызванного инфильтрацией атмосферных осадков в крупнообломочных грунтах с глинистым заполнителем, существенно снижается, что следует из результатов ранее проведенных исследований [7]. Под воздействием от увлажнения следует понимать увеличение удельного веса грунта, снижение угла внутреннего трения и удельного сцепления. Также воздействие увлажнения является одним из основных для анкерных закреплений склонов, поскольку вызы-

вает приращение продольных сил в грунтовых анкерах, сопоставимое с воздействием поверхностной нагрузки [6].

При этом отсутствует достаточное количество работ по исследованию водоудерживающей способности грунтов и влагопереноса в них. Особенно актуально изучение галечниковых, гравийных, щебенистых и дресвяных грунтов с глинистым заполнителем, характеризующихся существенной фильтрационной способностью ввиду наличия основной фракции порядка 2–200 мм и значительной водоудерживающей способностью за счет глинистой фракции, расположенной между контактами крупных частиц. Данные грунты имеют аллювиальный, делювиальный, пролювиальный, коллювиальный и элювиальный генезис и распространены в пределах Большого Сочи.

Описание процесса инфильтрации воды в грунтовых средах и их водоудерживающей способности достаточно подробно описано в работах: Н.А. Качинского [4], А.Д. Воронина [5], а также в статьях [1, 3, 9–16], при этом подход, применяемый в почвоведении для описания водоудерживающей способности и влагопереноса, основан на потенциале почвенной влаги, применим для грунта, ввиду схожего строения их в целом.

Для описания динамики изменения влажностного режима в грунтах в результате инфильтрации воды рассмотрим уравнение неразрывности потока влаги, предложенное Лоренсом А. Ричардсом [19] для пористых сред:

$$\mu \partial \psi / \partial t = \partial (k_s (\partial \psi / \partial x - 1)) / \partial x, \quad (1)$$

где, t — время (сут); x — координата, направленная вертикально вниз от поверхности грунта (м); ψ — капилляр-

¹ Шенн, Е.В., Гончаров, В.М., 2006. Агрофизика. Изд-во Феникс, Ростов-на-Дону.

но-сорбционное давление грунтовой влаги (m); μ — коэффициент дифференциальной влагоемкости грунта (m^{-1}); k_s — коэффициент влагопроводности ($m/сут$).

Решение дифференциального уравнения в частных производных (1) заключается в отыскании входящих в него коэффициентов в явном виде, которые являются функциями $\mu = \mu(\psi)$ и $k_s = k_s(\psi)$. Как правило, в качестве коэффициентов уравнения обычно используют эмпирические зависимости, которые интерполируют по результатам экспериментальных данных.

Принято измерять изотерму десорбционного равновесия воды (первообразная от $\mu(\psi)$), которая представлена в виде зависимости капиллярно-сорбционного давления влаги ψ от влажности грунта Θ cm^3/cm^3 . Данная зависимость является основным водоудерживающим показателем грунта и называется кривой водоудерживающей способности. Расчет дифференциальной влагоемкости грунта обычно сводится к интерполяции измеренной кривой водоудерживающей способности и подбору аппроксимирующей функции, которая используется в вычислениях по формуле [13]:

$$\mu = d\Theta/d\psi. \quad (2)$$

Также кривая водоудерживающей способности напрямую зависит от структуры порового пространства, гранулометрического и минерального состава глинистых, пылеватых и песчаных частиц.

Функция влагопроводности $k_s(\psi)$ выражается как зависимость коэффициента ненасыщенной гидравлической проводимости от капиллярно-сорбционного давления грунтовой влаги или от влажности грунта.

Аппроксимирующую функцию для кривой водоудерживающей способности при помощи трехпараметрического уравнения, связывающего водонасыщение с напором, предложил Ван Генухтен [20] (данное уравнение приведено к степени водонасыщения) в следующем виде:

$$S_r(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \left[1 + (g_a |\psi|)^{g_n} \right]^{g_c}, \quad (3)$$

где, $\psi = -p_w/\gamma_w$; p_w — поровое давление всасывания; γ_w — удельный вес поровой воды; $S_{sat} = 1$ — степень полного насыщения грунтовой толщи водой; $S_{res} = \Theta_r/\Theta_s$ — минимальная степень насыщения грунтовой толщи водой; Θ_s — влажность грунта, соответствующая полному насыщению пор водой; Θ_r — влажность грунта, соответствующая минимальному насыщению пор водой; g_a — эмпирический параметр, связанный с величиной обратной давлению входа воздуха в грунт (давление барботирования); g_n — эмпирический параметр, связанный с выделением воды из грунта при давлении входа воздуха (давление барботирования); $g_c = (1 - g_n)/g_n$ — степенной параметр.

Муалемом [18] была предложена зависимость относительной водопроницаемости от степени водонасыщения грунта на основе параметров модели Ван Генухтена (3):

$$\frac{k_s}{k_\phi} (S_r) = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e \left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right)^{\frac{g_n - 1}{g_n}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где, $S_e = (S - S_{res})/(S_{sat} - S_{res})$ — эффективное насыщение; S_r — фактическая степень насыщения грунтовой толщи водой; k_ϕ — коэффициент фильтрации ($m/сут$).

Уравнение Лоренсо А. Ричардса с учетом метода Муалема-Ван Генухтена является наиболее распространен-

ным и широко применяемым в описании влагопереноса в грунтовых средах ввиду своей простоты и общих параметров, входящих в уравнение.

Целью данного исследования является оценка влагопроводности крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и их способность к удержанию влаги. В качестве решаемых задач рассматривается восстановление кривой водоудерживающей способности и определение параметров модели Ван Генухтена для данных грунтов.

Методика лабораторных испытаний

В настоящей работе рассмотрены грунты с площадки строительства в горном кластере пос. Красная Поляна $dp_{Q_{IV}}$ ИГЭ 3 и ИГЭ 4, которые классифицируются как дресвяно-щебенистый грунт с суглинистым заполнителем в соответствии с ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация». Коэффициенты фильтрации определены в полевых условиях методом экспресс-наливов в соответствии с ГОСТ 23278-78 «Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости». В связи с отсутствием свободного уровня воды в скважине выбрана схема мгновенного налива, заключающаяся в одновременном заполнении ствола скважины водой начальным объемом и отслеживании уровня воды от заданного H_0 . Наливы проводились в скважинах, оборудованных обсадной трубой (фильтрация возможна только по нижнему торцу), диаметр скважины составил $d_{скв} = 115,5$ мм. Коэффициент фильтрации определяется по формуле:

$$k_\phi = 2,3 \frac{\omega_T}{l^0 t} l g \frac{H_0}{H}, \quad (5)$$

где, ω_T — площадь поперечного сечения скважины, m^2 ; $l^0 = 5d_{скв}$ — расчетный размер рабочей части скважины, m ; $d_{скв}$ — диаметр скважины, m ; H_0 — высота начального столба при наливе; H — высота столба воды на момент t .

Преобладающая фракция в приведенных грунтах — щебень (10–200 мм). Однако в соответствии с п. 4.5 ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения» минимальный размер испытуемых образцов должен быть не менее пятикратного размера максимальной фракции грунта (включений, агрегатов), то есть не менее 1 000 мм, что является затруднительным при отборе образца и проведении лабораторных экспериментов. Поэтому приготавливались модельные грунты-аналоги по водопроницаемости (по коэффициенту фильтрации) с учетом следующих постоянных физических характеристик: плотность скелета грунта, весовая влажность (соответствуют природному сложению и определены по результатам инженерно-геологических изысканий).

Дресвяно-щебенистая фракция 2–200 мм заменена на фракцию размером 2–5 мм (мраморная крошка $\rho_s = 2,73$ г/см³), песчаная фракция (морские пески $\rho_s = 2,66$ г/см³) 2–0,1 мм принята по исходному гранулометрическому составу грунтов ИГЭ 3 и ИГЭ 4. В качестве пылевато-глинистого заполнителя использована кембрийская глина ($\rho_s = 2,74$ г/см³). Заполнитель по гранулометрическому составу классифицируется как тяжелый суглинок в соответствии с ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация». Гранулометрический состав и физические характеристики инженерно-геологических элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав и физические характеристики грунтов																							
n/n	Грунт	Фракции, мм											Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Плотность грунта ρ , г/см ³	Плотность скелета грунта ρ_{sp} , г/см ³	Весовая влажность грунта W , д.е.	Влажность на границе раскатывания W_{ps} , д.е.	Влажность на границе текучести W_L , д.е.	Число пластичности I_p , д.е.	Коэффициент фильтрации k_f , м/сут			
		> 200,0	200,0-10,0	10,0-2,0	5,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	< 0,1	0,1-0,05	0,05-0,01									0,01-0,002	> 0,002	
1	ИГЭ 3 — Щебенистый грунт с суглинистым тяжелым заполнителем 34,0%, с включениями глыб до 2,0 % (дпQIV)	1,8	55,0	9,2	—	5,2	3,3	2,4	2,7	20,4	—	—	—	—	—	2,80	1,98	1,87	0,058	—	—	13,7	0,180
2	ИГЭ 4 — Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 21,0%, с включениями глыб 2,8% (дпQIV)	2,8	63,4	13,4	—	0,8	0,8	1,6	1,0	16,2	—	—	—	—	—	2,80	2,01	1,88	0,073	—	—	14,3	0,350
3	Заполнитель — кембрийские глины (C ₁)	—	—	—	—	—	0,1	0,6	1,2	—	15,0	31,5	24,6	27,1	2,74	—	—	—	—	0,228	0,388	16,0	—
4	ИГЭ 3 (модельный грунт)	—	—	—	62,1	5,2	3,3	2,5	3,0	—	3,7	7,7	6,0	6,6	2,72	1,98	1,87	0,058	0,154	0,261	10,7	0,183	
5	ИГЭ 4 (модельный грунт)	—	—	—	70,2	0,8	0,8	1,7	1,3	—	3,8	8,1	6,3	6,9	2,73	2,01	1,88	0,073	0,191	0,331	14,0	0,354	



Рис. 1. Приборы СоюзДорНИИ для определения коэффициента фильтрации и характерный образец модельного грунта

Гранулометрический состав модельных грунтов подбирался по коэффициенту фильтрации в лабораторных условиях на фильтрационном приборе СоюзДорНИИ в соответствии с коэффициентом фильтрации согласно полевым опытам, корректировалось процентное содержание фракции 2–5 мм и фракции < 0,1 мм.

Навеска сухого модельного грунта тщательно растиралась и перемешивалась при затворении водой, герметично упаковывалась и выдерживалась сутки для равномерного распределения влажности. Подготовленная проба грунта природной влажности делилась на три порции и последовательно укладывалась в трубку прибора с уплотнением каждой из них при помощи трамбовки (при падении груза вдоль направляющей на наковальню), при этом производился замер расстояния от верхнего края трубки до поверхности уплотненного грунта для обеспечения плотности, соответствующей природной.

Фильтрационный прибор с грунтом помещался в емкость, которая постепенно заполнялась водой до верха, и после появления воды в трубке над слоем грунта образец выдерживался сутки. Диаметр испытуемого образца 50 мм, высота — 100 мм. Характерный образец представлен на рис. 1.

В трубку прибора наливалась вода, соответствующая начальному градиенту два, при этом начальный уровень воды на шкале пьезометра превышал нулевое значение более чем на 5 мм. С момента падения воды по шкале пьезометра до нулевого значения (за счет вытекания воды

из перфорированного кольца — дна) засекалось время и фиксировалось падение воды в пьезометре от 0 до 50 мм (каждые 5 мм). Коэффициент фильтрации рассчитывался как среднее арифметическое отдельных определений, которые в свою очередь рассчитываются по формуле:

$$k_{\phi}^{10} = \frac{h}{t} \varphi \left(\frac{S}{H_0} \right) \frac{864}{T}, \quad (6)$$

где, h — высота образца в трубке, см; t — время падения уровня воды, с; S — наблюдаемое падение уровня воды в пьезометре, отсчитанное от первоначального уровня, см; H_0 — начальный напор, см; $\varphi(S/H_0)$ — безразмерный коэффициент, определяемый по Приложению 4 ГОСТ 25584-90 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»; $T = 0,7 + 0,3T_{\phi}$ — поправка для приведения значения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при температуре 10°C, где T_{ϕ} — фактическая температура, °C; 864 — переводной коэффициент (из см/с в м/сут).

По результатам фильтрационных испытаний получена зависимость изменения коэффициента фильтрации от количества пылевато-глинистого заполнителя (рис. 2), построены линии тренда. Смещение кривой модельного грунта ИГЭ 3 к началу координат относительно модельного грунта ИГЭ 4 обусловлено наличием большего процентного содержания песчаных частиц. При процентном содержании пылевато-глинистого заполнителя более 27% влияние от содержания песчаных фракций нивелируется.

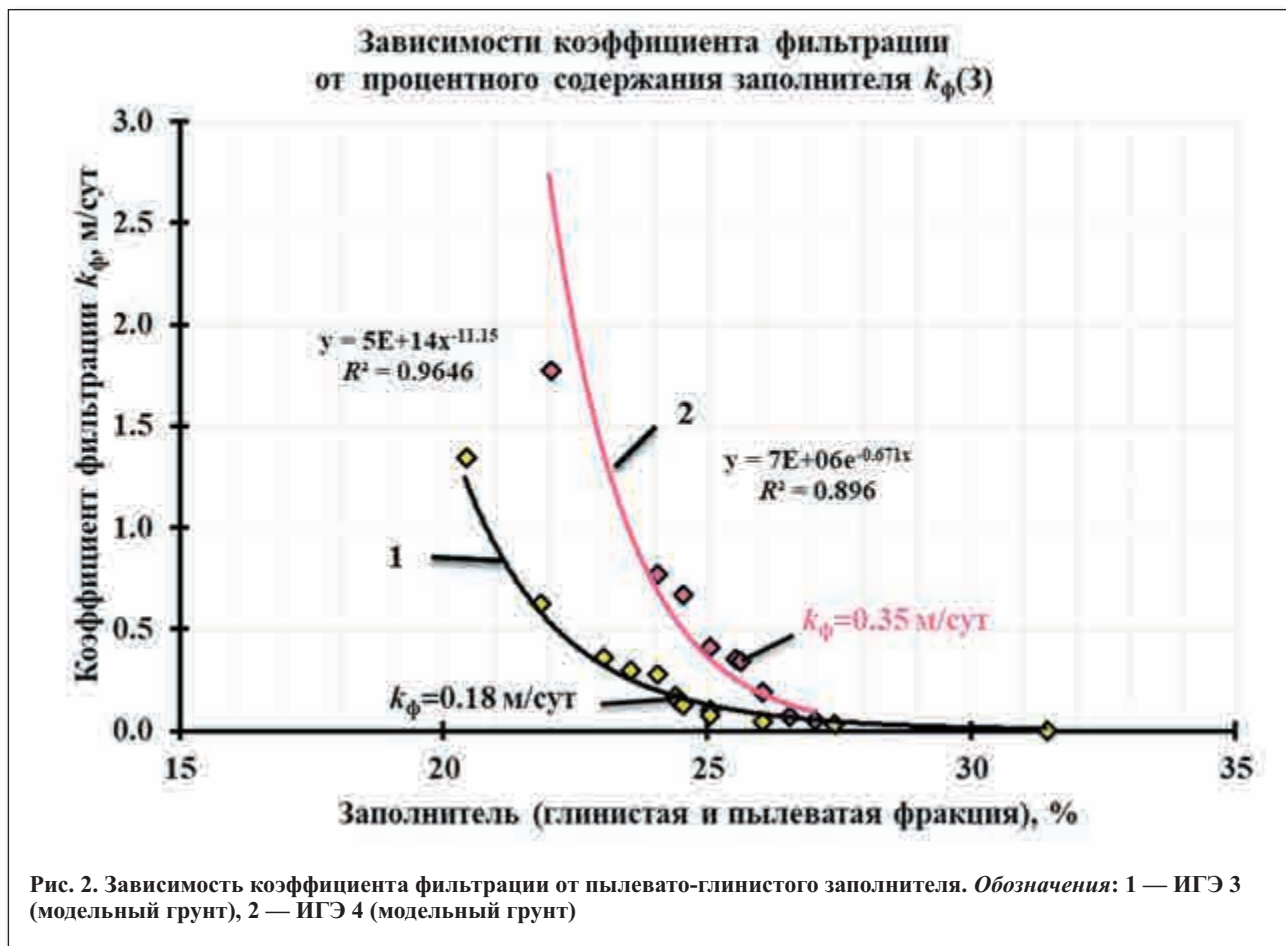


Таблица 2

Влажности для почвенно-гидрологических констант					
n/n	Грунт	Θ_{M}^* , см ³ /см ³	Θ_p^{**} , см ³ /см ³	Θ_L^{***} , см ³ /см ³	n^{****} , см ³ /см ³
1	ИГЭ 3 (модельный грунт)	0,039	0,109	0,185	0,313
2	ИГЭ 4 (модельный грунт)	0,042	0,107	0,185	0,311

* Θ_M , см³/см³ — объемная влажность грунта при максимальной гигроскопичности;
 ** Θ_p , см³/см³ — объемная влажность грунта, приведенная от заполнителя на границе раскатывания ко всему грунту;
 *** Θ_L , см³/см³ — объемная влажность грунта, приведенная от заполнителя на границе текучести ко всему грунту;
 **** n , см³/см³ — объемная влажность грунта, соответствующая полному заполнению пор водой.

Определены гранулометрические составы модельных грунтов ИГЭ 3 и ИГЭ 4 соответствующие коэффициенту фильтрации, полученному в полевых условиях (см. табл. 1).

Для восстановления кривой водоудерживающей способности по ветви высушивания определены почвенно-гидрологические константы, связывающие капиллярно-сорбционное (матричное) давление влаги с влажностью грунта по энергетической концепции А.Д. Воронина:

- $pF = 0$, соответствуют пористости грунта n ;
- $pF = 2,17$, соответствует влажность на границе текучести W_L ;
- $pF = 2,17 + 3W_p$, соответствует влажность на границе раскатывания W_p ;

— $pF = 4,445$, соответствует влажности при максимальной гигроскопичности W_M

Для давления влаги используется логарифмическая шкала, берется десятичный логарифм от абсолютной величины, выраженной в сантиметрах водного столба — pF .

Для заполнителя (фракции < 2 мм) определено число пластичности в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик», для модельного грунта ИГЭ 3 $I_p = 10,7$, для модельного грунта ИГЭ 4 $I_p = 14,0$, по результатам инженерно-геологических изысканий $I_p = 13,7$ и $I_p = 14,3$ соответственно, результаты имеют достаточную сходимость. Влажность грунта при максимальной гигроскопичности W_M определена в соответствии с ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности, максималь-



Рис. 3. Годовое распределение атмосферных осадков по данным метеостанций «Ачишхо» и «Красная Поляна»

ной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений». Навеска модельного грунта помещалась в эксикатор для насыщения парами воды над раствором K_2SO_4 .

Весовая влажность заполнителя модельного грунта на пределе текучести и границе раскатывания приведена ко всему грунту в соответствии с процентным содержанием частиц по гранулометрическому составу (пересчитан вес воды, который содержит заполнитель на вес всего грунта, то есть с учетом фракции 2–5 мм), так как заполнитель непосредственно влияет на способность адсорбировать влагу. Расчет объемной влажности грунта выполнен через весовую влажность по формуле:

$$\Theta = W \times \rho_d \quad (7)$$

Численные значения объемных влажностей для почвенно-гидрологических констант приведены в табл. 2.

В программе RETC 6.02 по значениям почвенно-гидрологических констант аппроксимирована кривая водоудерживающей способности для модельных грунтов ИГЭ 3, ИГЭ 4 функцией Ван Генухтена, параметры модели по ветви высушивания представлены в табл. 3. Также в работах [1, 3, 11, 20] рассмотрено применение RETC 6.02 для восстановления кривой водоудерживающей способности при помощи почвенно-гидрологических констант по ветви высушивания.

Для полученных модельных грунтов выполнены эксперименты по слабонапорной инфильтрации с целью определения кривой водоудерживающей способности по ветви увлажнения при неравновесном состоянии влаги с начальным градиентом $h = 9,43$ мм (результаты наблюдений метеостанций «Красная Поляна» и «Ачишхо»), равным среднему значению атмосферных осадков, выпадающих за день в максимально пасмурный месяц (октябрь) при положительной температуре поверхности грунта. Рас-

пределение температуры на поверхности грунта и атмосферных осадков в зависимости от месяца и высотной отметки по Балтийской системе высот представлены на рис. 3, 4.

Лабораторные опыты по инфильтрации также выполнялись на фильтрационном приборе СоюзДорНИИ. После заполнения водой (градиент $h = 9,43$ мм) образец выдерживался в течение часа, затем извлекался из прибора и разрезался на 5 частей, расфасовывался по бюксам для определения влажности термостатно-весовым методом (ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик») и последующих расчетов степени водонасыщения S_r .

Для подбора параметров модели Ван Генухтена по ветви увлажнения при неравновесном состоянии влаги выполнено численное моделирование инфильтрации в программном комплексе Plaxis 2D в осесимметричной постановке. В модели в качестве начальных условий было задано численное значение природной степени водонасыщения, которое было принято равномерно распределенным по образцу для модельного грунта ИГЭ 3 $S_r = 35\%$, для модельного грунта ИГЭ 4 $S_r = 44\%$. Корректировались значения параметров g_a и g_n до совпадения результатов моделирования с экспериментом. Распределения степени водонасыщения S_r по высоте образцов представлены на рис. 5, 6, параметры модели Ван Генухтена по ветви увлажнения — в табл. 3.

По результатам выполненных лабораторных экспериментов, а также численного моделирования получена зависимость давления влаги от объемной влажности (кривая водоудерживающей способности) модельных грунтов ИГЭ 3 и ИГЭ 4 (рис. 7).

Все лабораторные эксперименты выполнены в шести повторностях и обработаны в соответствии с ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний».



Рис. 4. Годовое распределение температуры грунта по данным метеостанций «Ачишхо» и «Красная Поляна»

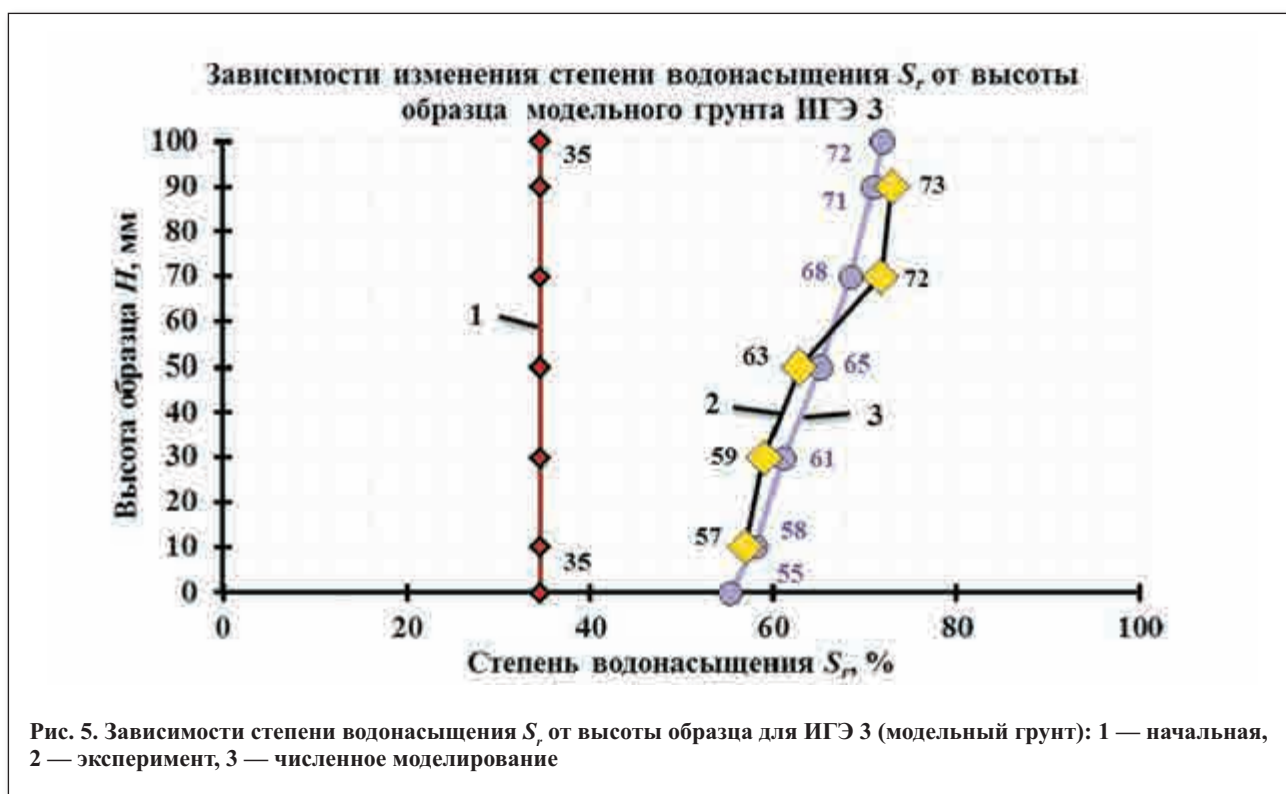


Рис. 5. Зависимости степени водонасыщения S_r от высоты образца для ИГЭ 3 (модельный грунт): 1 — начальная, 2 — эксперимент, 3 — численное моделирование

Результаты исследований

Выпадение среднесуточной нормы атмосферных осадков (воды) за самый пасмурный месяц при положительной температуре поверхности грунта (в субтропическом климате) увеличивает степень водонасыщения S_r образца на 36–38% в течение часа.

Для модельного грунта ИГЭ 4 при $k_f = 0,35$ м/сут фронт влаги прошел через весь образец и наиболее увлажненной частью оказался низ образца, для модельного грунта ИГЭ 3 при $k_f = 0,18$ м/сут, наоборот, наиболее

увлажненная часть — верх образца, при этом фронт влаги также прошел через образец, что указывает на сравнительно быстрое движение влаги по порам, обусловленное существенным содержанием крупнообломочной фракции. Полученные распределения степеней водонасыщения по образцам в результате эксперимента демонстрируют, что модельный грунт с большим коэффициентом фильтрации и меньшим содержанием пылевато-глинистого заполнителя интенсивнее проводит влагу, что не противоречит гидрофизике почв (грунтовых

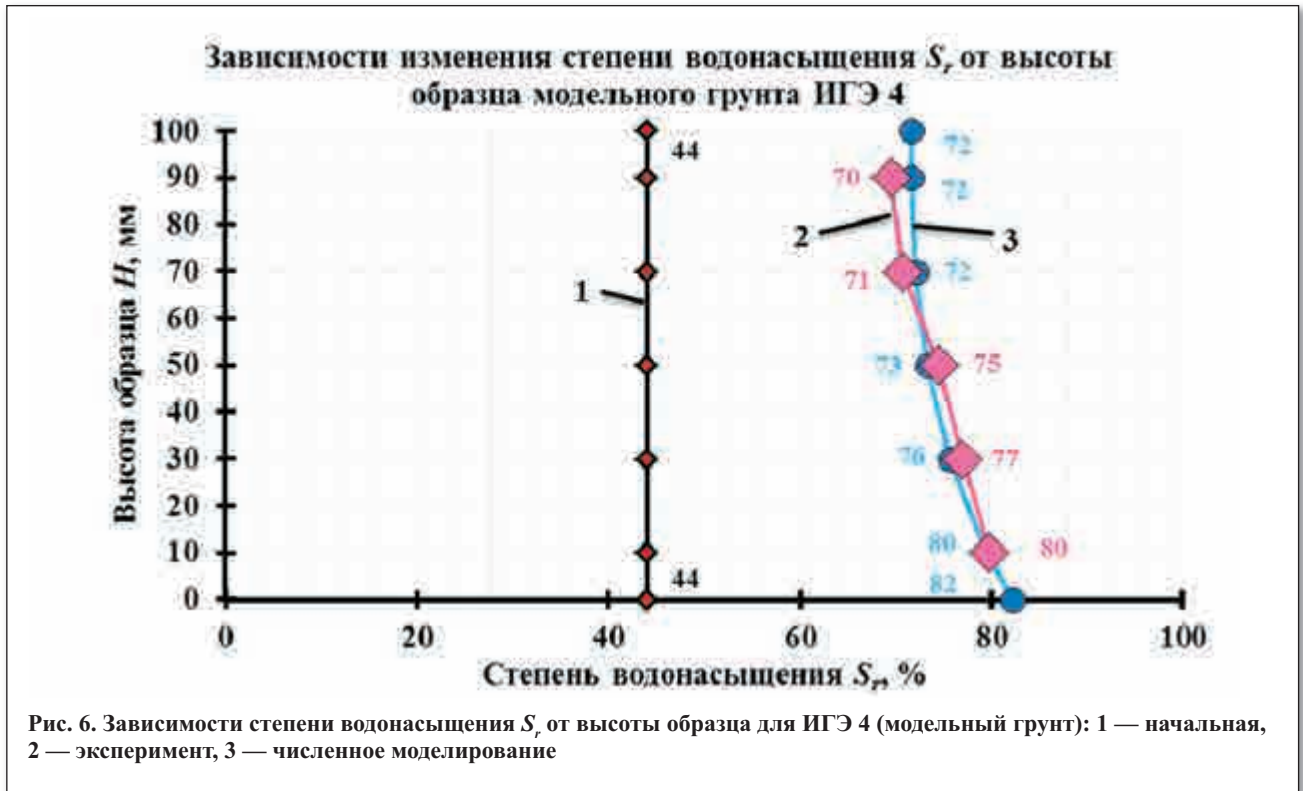


Таблица 3

Параметры модели Ван Генухтена						
n/n	Грунт	Состояние	$\Theta_s, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\Theta_s, \text{см}^3/\text{см}^3$	$g_a, \text{1/см}$	g_n
1	ИГЭ 3 (модельный грунт)	Высушивание	0,036	0,313	0,0130	1,761
2		Увлажнение	0,013	0,314	0,07824	1,687
3	ИГЭ 4 (модельный грунт)	Высушивание	0,036	0,311	0,01587	1,616
4		Увлажнение	0,013	0,312	0,10061	1,623

сред). А значит, что реализованный подход к подбору модельных грунтов по коэффициенту фильтрации, плотности скелета грунта и весовой влажности (с учетом природного состояния) в лабораторных условиях является допустимым.

Характер кривых водоудерживающей способности, определенных для модельных грунтов, имеет выположенную S-образную форму в зоне капиллярной и гравитационной влаги. Эти кривые накладываются друг на друга (совпадают). Кривая водоудерживающей способности модельных грунтов характеризуется наличием гистерезиса — несовпадением по ветвям высушивания и увлажнения, что обусловлено равновесным и неравновесным состоянием давления влаги соответственно, а также формой порового пространства, а именно нецилиндричностью пор.

Полученные параметры модели Ван Генухтена имеют корреляцию с гранулометрическим составом, а именно для модельного грунта ИГЭ 4 параметр водоотдачи g_n меньше, чем у модельного грунта ИГЭ 3. Параметр, обратный давлению входа воздуха g_a модельного грунта ИГЭ 4, больше, чем у модельного грунта ИГЭ 3, что со-

ответствует процентному содержанию песчаного и пылевато-глинистого заполнителя модельных грунтов ИГЭ 4, ИГЭ 3 (29,7% и 38,0% соответственно).

Выполненные лабораторные эксперименты и численное моделирование показывают, что подобранные модельные грунты ИГЭ 3 и ИГЭ 4 имеют практически одинаковую форму кривой водоудерживающей способности, при этом по скорости фильтрации отличаются в два раза. Данный эффект обусловлен близкими значениями плотностей скелета грунта, а также непосредственным влиянием гранулометрического состава. Содержание песчаной фракции у модельного грунта ИГЭ 3 больше, чем у модельного грунта ИГЭ 4, что приводит к снижению численных значений пределов Аттерберга, при этом процентное содержание крупнообломочной фракции у модельного грунта ИГЭ 4 больше, чем у модельного грунта ИГЭ 3. Поэтому пересчет весовых влажностей заполнителя модельного грунта на пределах Аттерберга ко всему грунту с учетом весового содержания крупнообломочной фракции в соответствии с гранулометрическим составом выравнивает численные значения влажностей между собой.

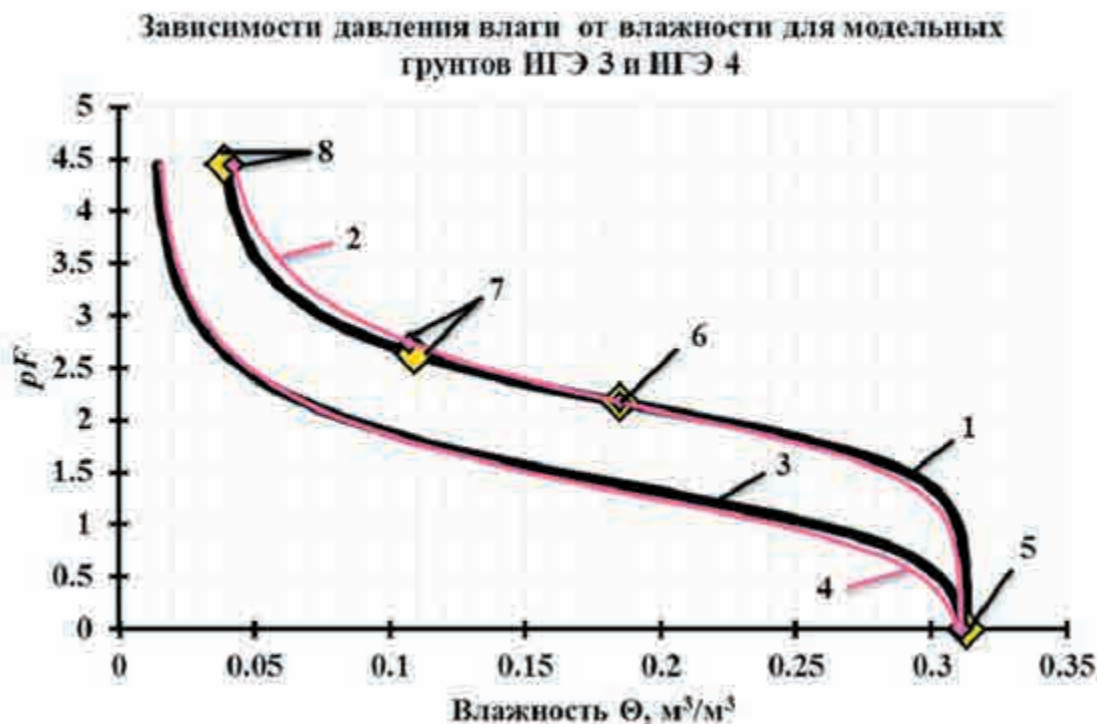


Рис. 7. Кривая водоудерживающей способности. Обозначения: 1 — ИГЭ 3 модельный грунт (высушивание), 2 — ИГЭ 4 модельный грунт (высушивание), 3 — ИГЭ 3 модельный грунт (увлажнение), 4 — ИГЭ 4 модельный грунт (увлажнение); почвенно-гидрологические константы: 5 — объемная влажность грунта, соответствующая полному заполнению пор водой при $pF = 0$; 6 — объемная влажность грунта, приведенная от заполнителя на границе текучести ко всему грунту при $pF = 2,17$; 7 — объемная влажность грунта, приведенная от заполнителя на границе раскатывания ко всему грунту при $pF = 2,17 + 3W_p$; 8 — объемная влажность грунта максимальной гигроскопичности при $pF = 4,445$

Основные выводы

1. Водоудерживающую способность для разнородных грунтов, таких как крупнообломочные (галечниковые, щебенистые, гравийные или дресвяные) с глинистым заполнителем, необходимо оценивать по заполнителю (фракции < 2 мм) в области капиллярной влаги (пленочно-менисковой и адсорбционной), так как преимущественно он влияет на гидрофизические свойства, что соответствует энергетической концепции А.Д. Воронина.
2. При восстановлении кривой водоудерживающей способности по ветви высушивания необходимо связывать капиллярно-сорбционное (матричное) давление влаги с влажностью заполнителя, а затем приводить весовую влажность заполнителя к влажности всего грунта (с учетом веса крупнообломочных фракций > 2 мм) и после выполнять аппроксимацию функцией Ван Генухтена.
3. Расчеты неустановившейся фильтрации (инфильтрации) воды в результате выпадения атмосферных

осадков с целью определения влажностного режима основания (склона, откоса) необходимо выполнять в зависимости от начальной степени водонасыщения грунтов (рассмотренных выше). Если грунт характеризуется как маловлажный или влажный, требуется использовать ветвь увлажнения, поскольку преобладает процесс насыщения грунта водой; если грунт характеризуется как насыщенный водой, то оправдано использовать ветвь высушивания, так как поры грунта практически полностью заполнены водой и будет преобладать процесс испарения.

4. Результаты изменения влажностного режима основания, сложенного крупнообломочными грунтами с глинистым заполнителем, необходимо учитывать при расчете устойчивости конструкций инженерной защиты, так как данные грунты характеризуются существенной влагопроводимостью и водоудерживающей способностью, что в условиях субтропического климата может приводить к значительному приращению степени водонасыщения. 🔄

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабошкина, С.В., Пузанов, А.В., Ельчинова, О.А., Рождественская, Т.А., 2016. Водно-физические свойства и моделирование процесса движения влаги в черноземах южных Канской межгорной котловины (бассейн р. Чарыш, северо-западный Алтай). Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 3 (137), с. 47–54.
2. Безухов, Д.А., Шнайдер, В.А., 2015. Влияние инфильтрационных процессов на местную устойчивость откосов земляного полотна автомобильных дорог. Материалы международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), Омск, 2015, Том 1, с. 28–34.

3. Болотов, А.Г., Дубский, С.Н., Шаталов, Александр Н., Шаталов, Алексей Н., Бутырин, И.Н., Кузнецов, Е.Н., Гончаров, И.А., Гончаров, Н.А., 2015. Моделирование основной гидрофизической характеристики черноземов алтайского края. Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 2 (124), с. 31–35.
4. Воронин, А.Д., 1984. Структурно-функциональная гидрофизика почв. Изд-во Московского университета, М.
5. Качинский, Н.А., 1970. Водно-физические свойства и режимы почв. Ч. 2. Высшая школа, М.
6. Маняхин, И.В., 2017. Анализ напряженно-деформированного состояния склонов, закрепленных грунтовыми анкерами, с учетом инфильтрации атмосферных осадков. Вестник гражданских инженеров, № 2 (61), с. 143–153.
7. Маняхин, И.В., 2017. Расчетный прогноз влияния инфильтрации атмосферных осадков на устойчивость склонов, сложенных щебнисто-глинистыми грунтами. Жилищное строительство, № 9, с. 20–24.
8. Нгуен, Ф.З., Буряков, О.А., 2013. Влияние инфильтрации дождевых осадков на устойчивость откосов грунтовых сооружений. Гидротехническое строительство, № 5, с. 23–26.
9. Огородников, Л.П., Постников, П.А., 2015. Просачивание атмосферных осадков через почву на среднем Урале. АПК России, Том 73, с. 116–119.
10. Панина, С.С., Шеин, Е.В., 2014. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий. Вестник Московского университета, Серия 17. Почвоведение, № 3, с. 45–50.
11. Пузанов, А.В., Бабошкина, С.В., Рождественская, Т.А., Балькин, С.Н., 2014. Сравнительный анализ основной гидрофизической характеристики степных и горно-лесных почв Алтая, восстановленной расчетными методами. Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 12 (122), с. 29–35.
12. Терлеев, В.В., Баденко, В.Л., Топаж, А.Г., Миршель, В., Гусева, И.Ю., 2014. Преимущества усовершенствованного метода Муалема-Ван Генухтена на примере глинистой почвы. Агрофизика, № 4 (16), с. 27–34.
13. Терлеев, В.В., Нарбут, М.А., Топаж, А.Г., Миршель, В., 2014. Моделирование гидрофизических свойств почвы как капиллярно-пористого тела и усовершенствование метода Муалема-Ван Генухтена: теория. Агрофизика, № 2 (14), с. 35–44.
14. Умарова, А.Б., Шеин, Е.В., Кухарук, Н.С., 2014. Основная гидрофизическая характеристика агросерых почв: влияние анизотропии и масштабного фактора. Почвоведение, № 12, с. 1460–1466.
15. Человечкова, А.В., 2017. Основная гидрофизическая характеристика выщелоченных черноземов и солонцов центральной части Курганской области. Восточно-Европейский научный журнал, № 4 (20), с. 24–29.
16. Шеин, Е.В., Скворцова, Е.Б., Дембовецкий, А.В., Абросимов, К.Н., Ильин, Л.И., Шнырев, Н.А., 2016. Распределение пор по размерам в суглинистых почвах: сравнение микротомографического и капилляриметрического методов определения. Почвоведение, № 3, с. 344–354.
17. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, No. 12, pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.
18. Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, No. 1 (5), pp. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
19. Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, No. 44 (5), pp. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
20. Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/2-91/065.

REFERENCES

1. Baboshkina, S.V., Puzanov, A.V., Rozhdestvenskaya, T.A., Balykin, S.N., 2016. Water-physical properties and modeling of moisture transfer in the southern chernozems of the Kansk intermontane depression (the Charysh basin, north-west Altai). Bulletin of Altai State Agricultural University, No. 3 (137), pp. 47–54. (in Russian)
2. Bezukhov, D.A., Schneider, V.A., 2015. Influence of infiltration processes on local stability of slopes of road cover. Materials of the international scientific and practical conference (on the occasion of the 85th anniversary of the SibADI FGBOU), Omsk, 2015, Vol. 1, pp. 28–34. (in Russian)
3. Bolotov, A.G., Dubskiy, S.N., Shatalov, Aleksandr N., Shatalov, Aleksey N., Butyrin, I.N., Kuznetsov, Ye.N., Goncharov, I.A., Goncharov, N.A., 2015. Modeling of water retention curve of the chernozems of the Altai region. Bulletin of Altai State Agricultural University, No. 2 (124), pp. 31–35. (in Russian)
4. Voronin, A.D., 1984. Structural and functional hydrophysics of soils. Publishing house of Moscow State University, Moscow. (in Russian)
5. Kachinskii, N.A., 1970. Water-physical properties and soil regimes. Part 2. High school, Moscow. (in Russian)
6. Manyakhin, I.V., 2017. Analysis of stress-strain condition of slopes reinforced with soil anchors taking into account the infiltration of atmospheric precipitation. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, No. 2 (61), pp. 143–153. (in Russian)
7. Manyakhin, I.V., 2017. Design forecast of influence of atmospheric precipitation infiltration on stability of slopes formed by gravel-clay soils. Zhilishchnoe stroitelstvo, No. 9, pp. 20–24. (in Russian)

8. Nguyen, F.Z., Buryakov, O.A., 2013. Influence of rainfall infiltration on the stability of soil slopes structures. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*, No. 5, pp. 23–26. (in Russian)
9. Ogorodnikov, L.P., Postnikov, P.A., 2015. Precipitation infiltration into soil in the Middle Urals. *Agro-industrial complex of Russia*, Vol. 73, pp. 116–119. (in Russian)
10. Panina, S.S., Shein, E.V., 2014. Mathematical models of soil moisture transfer: importance of the model's experimental assurance and the upper boundary condition. *Moscow University Soil Science Bulletin*, No. 3, pp. 45–50. (in Russian)
11. Puzanov, A.V., Baboshkina, S.V., Rozhdestvenskaya, T.A., Balykin, S.N., 2014. Comparative analysis of water retention curve of the steppe and mountain-forest soils of Altai recovered with computation methods. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, No. 12 (122), pp. 29–35. (in Russian)
12. Terleev, V.V., Badenko, V.L., Topazh, A.G., Mirshel, V., Guseva, I.Yu., 2014. Advantages of the improved Mualem-Van Genuchten method on the example of clay soil. *Agrophysics*, No. 4 (16), pp. 27–34. (in Russian)
13. Terleev, V.V., Narbut, M.A., Topazh, A.G., Mirshel, V., 2014. Modeling of hydrophysical properties of soil as a capillary-porous body and improvement of the Mualem-Van Genuchten method: theory. *Agrophysica*, No. 2 (14), pp. 35–44. (in Russian)
14. Umarova, A.B., Shein, E.V., Kukharuk, N.S., 2014. The main hydrophysical characteristic of agrosphere soils: the influence of anisotropy and the scale factor. *Eurasian Soil Science*, No. 12, pp. 1460–1466. (in Russian)
15. Chelovechkova, A.V., 2017. Basic hydrophysical characteristics leached chernozems and solonchets the central part of the kurgan region. *East European Scientific Journal*, No. 4 (20), pp. 24–29. (in Russian)
16. Shein, E.V., Skvortsova, E.B., Dembovetskii, A.V., Abrosimov, K.N., Ilyin, L.I., Shnyrev, N.A., 2016. Pore distribution by size in loamy soils: comparison of microtomographic and capillarimetric methods of determination. *Eurasian Soil Science*, No. 3, pp. 344–354. (in Russian)
17. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, No. 12, pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.
18. Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, No. 1 (5), pp. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.
19. Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, No. 44 (5), pp. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
20. Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/2-91/065.

CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. Instruments SoyuzDorNIИ for determining the filtration factor and characteristic sample of model soil

Fig. 2. Dependence of the filtration coefficient on a silty-clay filler. Designations: 1 — IGE 3 (model soil), 2 — IGE 4 (model soil)

Fig. 3. Annual distribution of atmospheric precipitation according to meteorological stations “Achishkho” and “Krasnaya Polyana”

Fig. 4. Annual distribution of soil temperature according to meteorological stations “Achishkho” and “Krasnaya Polyana”

Fig. 5. Dependences of the degree of water saturation S_r on the height of the sample for IGE 3 (model soil): 1 — initial, 2 — experiment, 3 — numerical simulation

Fig. 6. Dependences of the degree of water saturation S_r on the height of the sample for IGE 4 (model soil): 1 — initial, 2 — experiment, 3 — numerical simulation

Fig. 7. Water retention curve. Designations: 1 — IGE 3 model soil (desiccation), 2 — IGE 4 model soil (desiccation), 3 — IGE 3 model soil (humidification), 4 — IGE 4 model soil (humidification); soil-hydrological constants: 5 — volumetric soil moisture corresponding to complete pore filling with water at $pF = 0$; 6 — volumetric soil moisture, reduced from the filler at the yield point to the entire soil at $pF = 2,17$; 7 — volumetric soil moisture, reduced from the aggregate at the boundary of rolling to the entire soil at $pF = 2,17 + 3W_p$; 8 — volumetric soil humidity of maximum hygroscopicity at $pF = 4,445$

CAPTIONS TO TABLES

Table 1. Granulometric composition and physical properties of soils

Table 2. Humidity for soil-hydrological constants

Table 3. Parameters of the Van Genuchten model

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

МАНЯХИН И.В.

Аспирант кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MANYAKHIN I.V.

Post-graduate student of the Geotechnics Department of Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia