

УДК 624.131

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАБУХАЮЩЕГО ГРУНТА
С УЧЕТОМ ЦИКЛОВ ВЫСЫХАНИЯ И НАМОКАНИЯ**

Шаокунь Ма¹, Сяо Хуан¹, Чжибо Дуань¹, Минь Ма¹, Юй Шао^{2,3}

¹Колледж гражданского строительства и архитектуры, Гуансийский университет,
E-mail:duanzhibo_1993@163.com, Гуанси Китай

²Компания “Guangxi Xinfazhan Communications Group Co., Ltd”, Наньнин, Гуанси, Китай

³Компания “Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co. Ltd”, Наньнин, Гуанси, Китай

Исследованы свойства набухающего грунта из округа Наньнин (Китай). С использованием известных уравнений получены основные гидрофизические характеристики грунта в условиях нескольких циклов высыхания и намокания. Предложена новая модель прогнозирования, учитывающая два фактора, в основе которой лежит модель Ван Генухтена. В ней рассматривается не только капиллярно-сорбционное (матричное) давление, но и учитывается количество циклов высыхания и намокания. Данная модель позволяет установить общее уравнение аппроксимации кривой основной гидрофизической характеристики с такими же параметрами, как в предыдущей модели, что может значительно снизить трудоемкость измерений. Применимость модели расширена за счет сравнения результатов испытаний набухающего грунта и вулканического туфа.

Циклы высыхания и намокания, кривая основной гидрофизической характеристики, прогнозирующая модель, набухающий грунт из округа Наньнин

DOI: 10.15372/FTPRPI20210305

Набухающий грунт является примером ненасыщенного грунта, который обладает свойствами набухания и усадки в зависимости от изменения содержания влаги [1, 2]. Множество объектов инфраструктуры, таких как скоростные дороги и здания, построены на набухающих основаниях, которые подвержены разбуханию и усадке [3, 4]. В результате сезонного выпадения осадков или изменения уровня подземных вод в набухающем грунте образуются видимые макротрещины и деформация микропор, что оказывает значительное влияние на его прочность на сдвиг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№. 51678166 и 5106802), Гуансийской главной лаборатории геомеханики и геотехники (№ 16-KF-01), Гуансийской главной лаборатории предотвращения катастроф и инженерной безопасности (2016ZDX003), Гуансийского фонда естественных наук (№.2020GXNSFDA238024) и Инновационного проекта гуансийского послевузовского образования (YCBZ2020024).

Кривая основной гидрофизической характеристики (ОГХ) — важный показатель, который представляет собой отношение между содержанием влаги и капиллярно-сорбционным давлением Ψ (КСД) в грунте. Этот показатель обладает сильной связью с механическими свойствами ненасыщенного грунта [5]. Актуальность изучения ОГХ заключается в предотвращении аварийных происшествий на инженерных и горнодобывающих объектах, связанных с набухающими грунтами. На рис. 1 представлена типичная кривая ОГХ, на которой показаны две точки перегиба. Первую точку можно обозначить как давление выхода воздуха из грунта. Когда капиллярно-сорбционное давление превышает давление выхода воздуха, объемное содержание влаги в грунте быстро снижается. Вторую точку можно определить как остаточное содержание влаги. Когда капиллярно-сорбционное давление превышает остаточное содержание влаги, уменьшение объемного содержания влаги в грунте постепенно замедляется. Эти точки делят кривую ОГХ на три области.

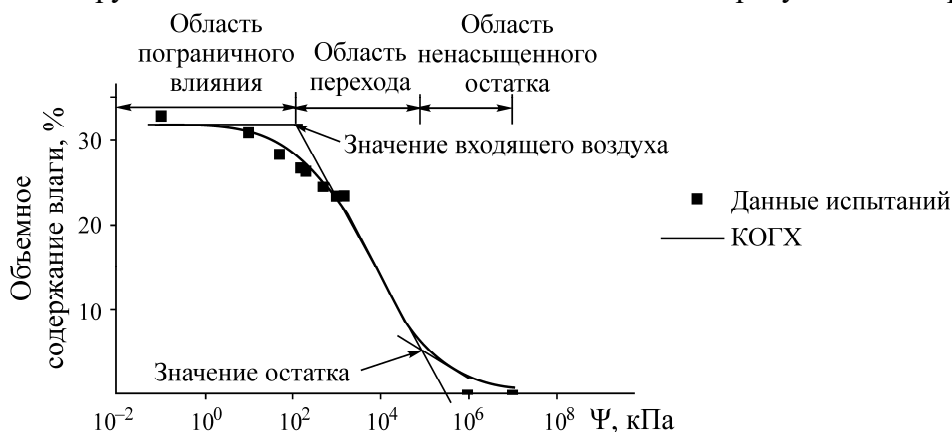


Рис. 1. Типичная кривая общей гидрофизической характеристики

Предыдущие исследования в основном концентрировались на прочностных изменениях грунта и образовании трещин после циклов высыхания и намокания (ЦВН). Для изучения механических свойств в [6] проведено трехосевое компрессионное испытание набухающего грунта из округа Лужонг в условиях ЦВН. С помощью анализа влияния изменений прочности на сжатие и растяжение, глубины трещин и уровня содержания влаги в набухающем грунте разработана модель расчета глубины трещин в условиях ЦВН [7]. В [8] изучено влияние малых напряжений и ЦВН на прочность на сдвиг склонов из набухающего грунта, а также создана численная модель с учетом нелинейного распределения прочности на сдвиг. В [9] выполнены динамические и количественные измерения изображений трещин набухающего грунта и определена его прочность на сдвиг при различной степени развития трещин в условиях циклов высыхания и намокания.

Тем не менее свойства ОГХ набухающего грунта после множественных циклов высыхания и намокания исследованы слабо, особенно в контексте моделирования прогноза. В [10] рассмотрена характеристика деформации, связанная с содержанием воды, образцов набухающего грунта из округа Наньнин после 1–6 ЦВН. Обнаружено, что такие параметры, как площадь усадки, площадь распространения трещин, содержание влаги и коэффициент пористости, изменяются в зависимости от количества циклов [10]. В [11] определена ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин после трех ЦВН в условиях наличия и отсутствия давления, в [12] — ОГХ вулканического туфа после трех ЦВН с помощью плиты объемного давления. Проведены нагрузочные испытания совместно со сканирующей электронной микроскопией (SEM) и ртутной интрузионной порозиметрией (MIP) повторно уплотненного набухающего грунта для определения его ОГХ при различных условиях циклов высыхания и намокания [13].

В настоящей работе на основе анализа существующих данных, полученных в ходе предыдущих исследований набухающего грунта из округа Наньнин, разработана новая модель прогнозирования основной гидрофизической характеристики набухающего грунта с учетом множественных циклов высыхания и намокания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ранее было выявлено значительное влияние первого цикла высыхания и намокания на ОГХ и его уменьшение с последующими циклами. Равновесное состояние достигается спустя 3–5 ЦВН [14–16]. Таким образом, образцы грунта, собранные в районе Тунли, который расположен на севере от дороги Юнжинг, округ Наньнин, были просушены, измельчены, просеяны через сетку 0.5 мм и разделены на шесть групп: A0, A1, A2, A3, A4, A5. Затем в образцы была добавлена вода. Ниже представлена совокупность физических и механических свойств набухающего грунта из округа Наньнин: объемная плотность в сухом состоянии — 1.69 г/см^3 ; содержание влаги — 16.1 %; удельная плотность G_s — 2.72; ограничение жидкости — 41.5 %; предел пластичности — 19.5 %; отношение свободного разбухания — 62 %; содержание влаги в насыщенном состоянии — 32 %; коэффициент проницаемости в насыщенном состоянии — $4.211 \times 10^{-7} \text{ м/с}$.

Большинство исследователей используют метод сушки образцов грунта в печи или ускоренный метод сушки дегидрацией, который практически не отражает естественный процесс ЦВН в инженерной практике [17–19]. В проводимых испытаниях выбраны методы воздушной сушки и распыления воды для моделирования высыхания и намокания соответственно. Образцы подготавливались с помощью циркулярного ножа. На основе локальных измерений физических свойств набухающего грунта в качестве нижней и верхней границ содержания влаги выбрано 12 и 32 %, что отражает содержание влаги при усадке и при насыщении водой соответственно. На рис. 2 приведен циклический процесс высыхания и намокания образцов.

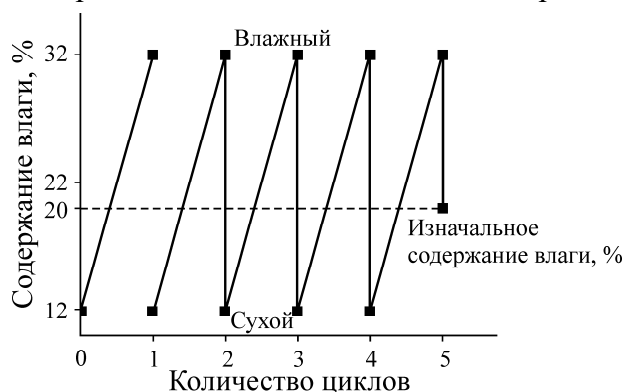


Рис. 2. Циклы высыхания и намокания

На рис. 3а представлены образцы после различного количества циклов высыхания и намокания. Для более детального изучения трещин грунта с помощью ПО MATLAB сгенерированы бинарные изображения образцов после 0–5 ЦВН. Области белого и черного цвета показывают трещины и грунт соответственно. Согласно рис. 3б, трещины в грунте появляются на поверхности образцов грунта в течение второго ЦВН и увеличиваются с последующими циклами. Спустя пять циклов, трещины теряют свою четкость, так как поверхность грунта начинает отслаиваться.

В настоящей работе для измерения потенциала почвенной влаги применен метод диализа. Данный метод имеет большой диапазон регулирования параметров диффузии и прост в применении. Впервые он использовался для разделения и очистки растворов в биомедицине, затем в геотехнической инженерии [20–24].

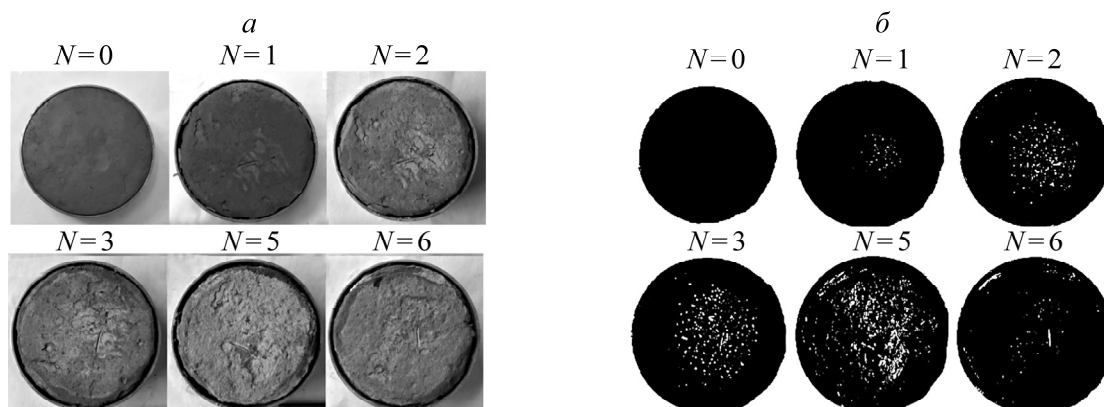


Рис. 3. Внешний вид образцов грунта после N -го количества ЦВН: исходные изображения (а); бинарные изображения (б)

Для испытаний использовалась полупроницаемая мембрана со значением MWCO 14000 (MWCO — показатель пористости ультрамембран, кДа) и раствор полиэтиленгликоля (далее ПЭГ) с молекулярной массой 20000, чье КСД достигает 6.3 МПа. На рис. 4 показана магнитная мешалка, обеспечивающая постоянную температуру, со встроенным цифровым дисплеем 85-2. С помощью различной концентрации ПЭГ подготовлено 8 растворов со следующими значениями КСД: 0.1; 10; 50; 150; 200; 500; 1000 и 1500 кПа. Концентрация раствора определена по индексу Брикса. Соотношение между индексом Брикса и КСД имеет следующий вид:

$$Br = \frac{90}{\sqrt{\frac{11}{\psi} + 1}}. \quad (1)$$



Рис. 4. Внешний вид оборудования для проведения диализа

Процесс испытания включал следующие пять этапов:

- погружение сухих полупроницаемых мембран в деионизированную воду более чем на 30 мин для исключения влияния поверхностного защитного слоя на результат;
- разрез образцов породы на блоки массой около 10 г и помещение блоков в полупроницаемую мембрану. Концы мембраны скреплялись для предотвращения попадания раствора. Образец помещался в ПЭГ-раствор, затем в него добавлялось небольшое количество пенициллина с целью исключения эрозии полупроницаемой мембраны бактериями, содержащимся в образцах грунта;

— герметизация лабораторного стакана полиэтиленовой пленкой для сокращения уровня испарения воды из раствора ПЭГ;

— установка лабораторного стакана на нагревательную плиту магнитной мешалки (рис. 4). В ПЭГ-растворе поддерживалась постоянная температура в течение перемешивания при помощи магнитной мешалки. В испытании участвовало шесть групп образцов грунта. В каждой группе измерено 8 образцов с различными значениями КСД. Продолжительность каждого диализа составила около 7 дней. Общий процесс диализа занял не менее 126 дней;

— извлечение образцов грунта при достижении равновесного состояния диализа и измерение содержания влаги методом сушки.

УРАВНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИИ

Для прогнозирования ОГХ некоторые исследователи разработали методы аппроксимации, включающая уравнение с двумя параметрами и уравнение с тремя параметрами. Далее представлены пять наиболее распространенных уравнений.

Уравнение Гарднера [25]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{1 + a\psi^b}, \quad (2)$$

где a — параметр, связанный со значением входящего воздуха; b — параметр грунта, связанный со степенью дегидрации грунта в момент, когда КСД превышает входящее значение.

Уравнение Косуги [26]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} Q \left[\frac{\ln\left(\frac{a-\psi}{a-b}\right)}{m} - m \right] & \psi > a, \\ 1 & 0 \leq \psi \leq a, \end{cases} \quad (3)$$

где $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{(2\pi)^{0.5}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$; a — значение входящего воздуха; b — капиллярное давление

в точке перегиба; m — среднеквадратичное отклонение нормального распределения $\ln\left(\frac{a-\psi}{a-b}\right)$.

Уравнение Брукса и Кори [27]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{a}{\psi}\right)^b & \psi > a, \\ 1 & 0 \leq \psi \leq a, \end{cases} \quad (4)$$

здесь b — индекс распределения пор по размеру.

Уравнение Ван Генухтена [28]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^m}, \quad (5)$$

где a — параметр, связанный со значением входящего воздуха; b — параметр грунта, связанный со степенью дегидрации грунта в момент, когда КСД превышает входящее значение.

Уравнение Фредлунда и Сина [29]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right\}^m}, \quad (6)$$

a — значение входящего воздуха; b — индекс распределения пор по размеру; m — параметр, связанный с остаточным содержанием влаги.

Тем не менее, как показано в табл. 1, параметры аппроксимации предыдущих моделей значительно изменяются с увеличением ЦВН. Использовать эти уравнения и данные измерений для прогнозирования ОГХ при различном количестве ЦВН некорректно. Также существующие модели учитывают только один фактор — КСД, что значительно ограничивает их применимость в инженерной практике. Необходимо разработать модель ОГХ, способную учитывать как КСД, так и количество ЦВН.

ТАБЛИЦА 1. Параметры аппроксимации, полученные различными моделями после N -го количества циклов высыхания и намокания

(а) Модель Гарднера				(б) Модель Брукса и Кори			
N	a	b	R^2	N	a	b	R^2
0	1.75116×10^{-4}	0.52567	0.988	0	105.3828	0.20167	0.938
1	1.82879×10^{-4}	0.51654	0.989	1	106.2198	0.20472	0.943
2	2.15807×10^{-4}	0.44425	0.972	2	82.99781	0.20356	0.937
3	2.48658×10^{-4}	0.44718	0.978	3	80.86832	0.20784	0.947
4	2.73559×10^{-4}	0.44689	0.980	4	76.91220	0.20921	0.949
5	2.34555×10^{-4}	0.44735	0.976	5	79.52867	0.20388	0.943

(в) Модель Ван Генухтена					(г) Модель Косуги				
N	a	b	m	R^2	N	a	b	m	R^2
0	2.338×10^{13}	0.367	1994.22	0.995	0	-25.8879	-25.4762	3.0963	0.991
1	2.413×10^{11}	0.354	304.72	0.998	1	-81.8138	-80.0126	2.8328	0.994
2	3.664×10^{11}	0.304	153.81	0.988	2	-197.1123	-195.1912	2.7981	0.991
3	3.155×10^{11}	0.305	158.61	0.993	3	-110.2300	-109.7249	3.0007	0.993
4	2.684×10^{11}	0.305	156.30	0.993	4	-78.7105	-78.4860	3.1175	0.988
5	3.235×10^{11}	0.305	156.55	0.991	5	-134.9710	-134.2354	2.9496	0.993

(е) Модель Фредлунда и Сина				
N	a	b	m	R^2
0	3378480.891	0.3816	19.5458	0.994
1	3828424.572	0.3732	19.7939	0.998
2	4792830.173	0.3263	17.1949	0.987
3	7119260.192	0.3221	19.6708	0.990
4	5443780.21	0.3227	18.8067	0.993
5	5263122.851	0.3240	17.8175	0.990

Благодаря комплексному учету всех факторов, практичности и гибкости, в качестве основы взята модель Ван Генухтена (модель с тремя параметрами). Для разработки модели и построения кривой использовано ПО “1stOpt”. Данное ПО обладает значительными преимуществами в области оценки параметров и решении сложных нелинейных инженерных моделей. Также использован глобальный алгоритм оптимизации, который позволяет задать подходящие начальные значения параметров методом итерации.

Рассмотрим наиболее общий вид аппроксимирующей функции:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{p_1} \right)^{p_2} \right]^{p_3} (1 + N)^{p_4}}, \quad (7)$$

где ψ — значение КСД; N — количество ЦВН; p_1, p_2, p_3, p_4 — параметры аппроксимации.

Также при рассмотрении коэффициента проницаемости ненасыщенных грунтов необходимо соблюсти условие $p_3 = 1 - 1/p_2$ [30], в противном случае расчет коэффициента проницаемости будет иметь большое отклонение на участке высокого отрицательного давления:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{p_1} \right)^{p_2} \right]^{(1 - \frac{1}{p_2})} (1 + N)^{p_3}}. \quad (8)$$

Только с помощью трех параметров уравнение (8) способно спрогнозировать ОГХ после N -го количества ЦВН. Значение N лежит в диапазоне от 0 до 5. При $N=0$ модель имеет вид модели Ван Генухтена (модель аппроксимации ОГХ, не учитывающая количество ЦВН). При стремлении N к 5 кривая аппроксимации остается почти неизменной и достигает равновесного состояния, что доказано полученными данными и предыдущими исследованиями [14–16].

При использовании уравнения (8) необходимо собрать три набора данных для определения параметров модели и прогнозирования ОГХ в условиях различного количества ЦВН, что исключает многочисленные повторяемые измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для построения ОГХ в ПО “Origin” выбрано несколько моделей. Все данные испытаний обработаны с учетом двух условий: (1) диапазон КСД должен быть большим, чтобы точки не располагались плотно друг к другу, иначе могут возникнуть множественные решения [31]; (2) следует добавить две характерные точки (10е6, 0), (10е7, 0) для аппроксимации, так как набухающие грунты обладают крайне высоким значением КСД при крайне низком насыщении.

На рис. 5 представлены кривые аппроксимации и тестовые данные при 0–5 ЦВН набухающего грунта из округа Наньнин, полученные с помощью выбранных моделей. Относительные параметры аппроксимации приведены в табл. 2. Для визуального наблюдения влияния количества ЦВН на ОГХ построены кривые указанных моделей после 0–5 ЦВН (рис. 6). Из рис. 5 видно, что ОГХ набухающего грунта после нескольких ЦВН может быть аппроксимирована рассматриваемыми моделями. Значения R^2 из табл. 2 показывают закономерность этих моделей, которая заключается в том, что чем больше параметров имеет модель, тем более точными получаются результаты. При сравнении соответствия моделей с таким же числом параметров очевидно, что модель Ван Генухтена может обеспечить наиболее точную аппроксимацию по сравнению с моделями Фредлунда и Сина, Косуги, Гарднера, Брукса и Кори.

В соответствии с закономерностью, представленной на рис. 6, ОГХ значительно изменяется после 1–2 ЦВН и затем почти достигает равновесного состояния. При условии одинакового насыщения КСД грунта уменьшается, а степень его дегидратации значительно увеличивается при увеличении количества ЦВН. Основная причина заключается в разрушении характерной микроструктуры грунта при увеличении количества ЦВН: закрытые поры становятся связанными друг с другом, коэффициент пористости увеличивается, способность удержания влаги и КСД уменьшаются.

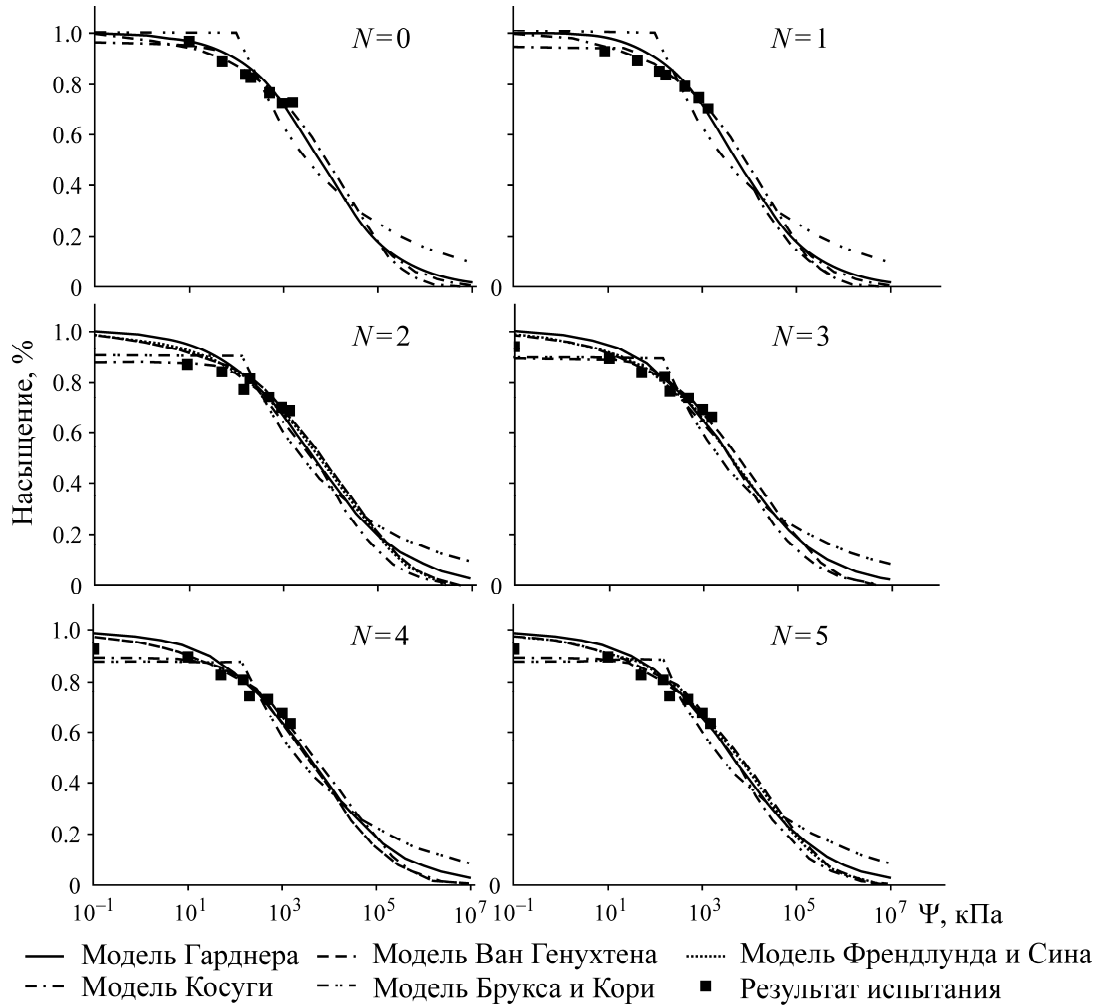


Рис. 5. Результаты испытаний и ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин, аппроксимированные различными моделями после N -го количества ЦВН

Для визуального наблюдения влияния количества ЦВН и КСД Ψ на насыщение S_r построен график модели (рис. 7). Точки на кривой поверхности соответствуют точкам ОГХ. Если количество ЦВН и КСД равняются 0, то насыщение равняется 1, что согласуется с фактическим случаем. Если количество ЦВН находится в пределах от 0 до 2, кривая поверхность значительно изменяется. Если количество ЦВН находится в пределах от 3 до 5, кривая поверхность изменяется незначительно. Это свидетельствует о том, что ОГХ грунта достигает равновесного состояния после двух ЦВН. В результате значения ОГХ, полученные с помощью уравнения аппроксимации, согласуются со значениями ОГХ, полученными в ходе испытаний.

Для проверки точности разработанной модели данные испытаний после 0–2 ЦВН набухающего грунта из округа Наньнин подставлены в уравнение (8). Получены следующие значения эмпирических параметров: $p_1 = 13.32$, $p_2 = 1.07$, $p_3 = 0.053$, $R^2 = 0.98$.

Уравнение аппроксимации имеет следующий вид:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{13.32} \right)^{1.07} \right]^{(1 - \frac{1}{1.07})} (1 + N)^{0.053}}. \quad (9)$$

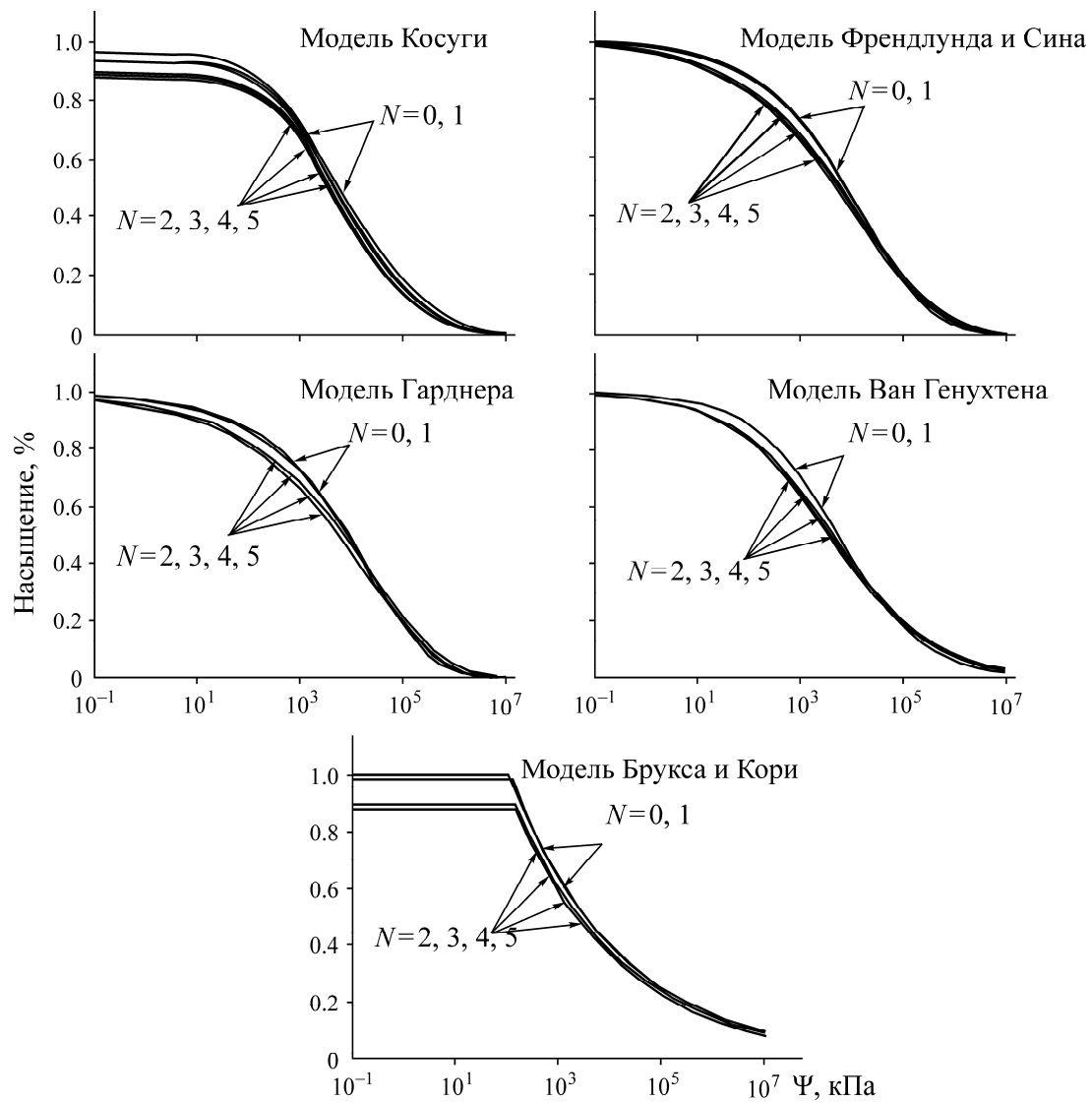


Рис. 6. Основные гидрофизические характеристики набухающего грунта из округа Наньнин, аппроксимированные различными моделями после N -го количества ЦВН

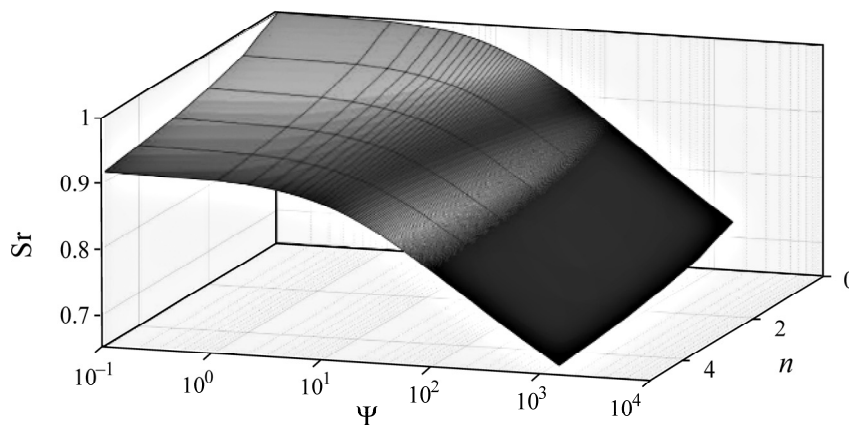


Рис. 7. Трехмерный график разработанной модели

ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин после 4 и 5 ЦВН спрогнозирована с помощью уравнения (9). Результаты сравнения с данными испытаний показаны на рис. 8. Видно, что спрогнозированное значение согласуется с данными испытаний, что доказывает корректность разработанной модели.

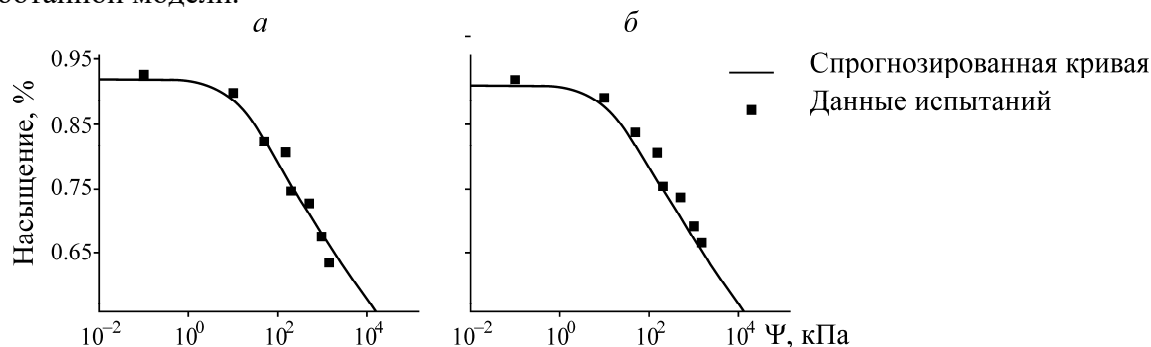


Рис. 8. Сравнение данных испытаний и результатов прогнозирования, полученных с помощью разработанной модели после N -го количества ЦВН: a — $N=4$; b — $N=5$

ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

Представленные результаты доказывают, что разработанная модель может быть использована для изначально равномерного грунта. Для изучения применимости модели для грунтов с начальными макротрещинами и деформацией микропор данные испытаний после 1, 2, 3 и 2, 3, 4 ЦВН подставлены в уравнение (8). Состояние образцов грунта после 1 и 2 ЦВН принято начальным ($N=0$). Далее модели использовались для прогнозирования ОГХ при другом количестве ЦВН. В табл. 2 представлены параметры аппроксимации.

ТАБЛИЦА 2. Параметры аппроксимации, сгенерированные разработанной моделью

p_1	p_2	p_3	R^2
$N=1, 2, 3$			
6.5008	1.060	0.0645	0.960
$N=2, 3, 4$			
3.2472	1.060	0.0377	0.931

Как показано на рис. 9, данные испытаний хорошо согласуются с различными моделями, которые генерируются на основе различного количества ЦВН. Это доказывает, что разработанная модель может использоваться для аппроксимации ОГХ с изначально макротрещинами и деформацией микропор.

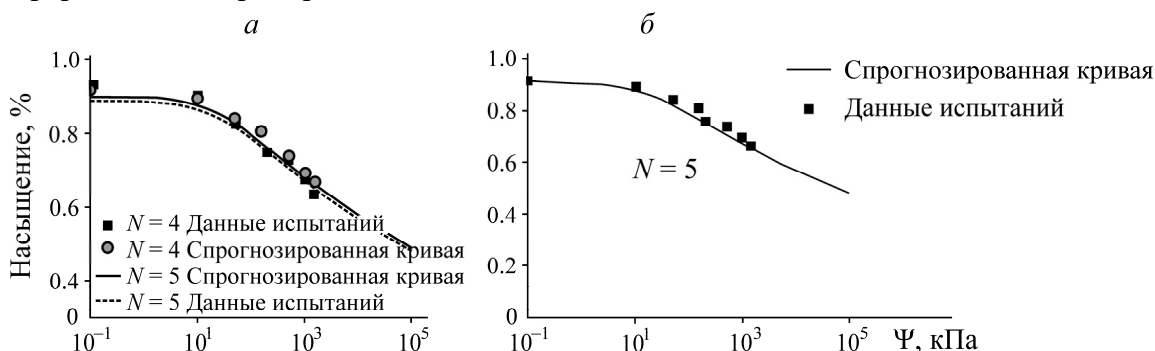


Рис. 9. Результаты прогнозирования, полученные с помощью моделей при различных количествах ЦВН: $N=1, 2, 3$ (a); $N=2, 3, 4$ (b)

Более того, для проверки общей применимости разработанной модели ее использовали для прогнозирования ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин [11] и вулканического туфа [12]. В [11] измерена ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин с использованием нагрузочной плиты. С помощью модели выбраны данные трех ЦВН без учета изменения объема и приложения нагрузки сверху. Результаты аппроксимации показаны на рис. 10а. Видно, что значение коэффициента детерминации R^2 достигает 0.99. В [12] получена ОГХ вулканического туфа. Для прогнозирования ОГХ разработанной моделью данные испытаний, полученные таким же образом, подставлены в модель. Согласно кривой аппроксимации на рис. 10б, новая модель также способна прогнозировать ОГХ вулканического туфа при значении $R = 0.97$.

Таким образом, на основе сравнения и проверки модели можно утверждать, что разработанная модель обладает широкой применимостью.

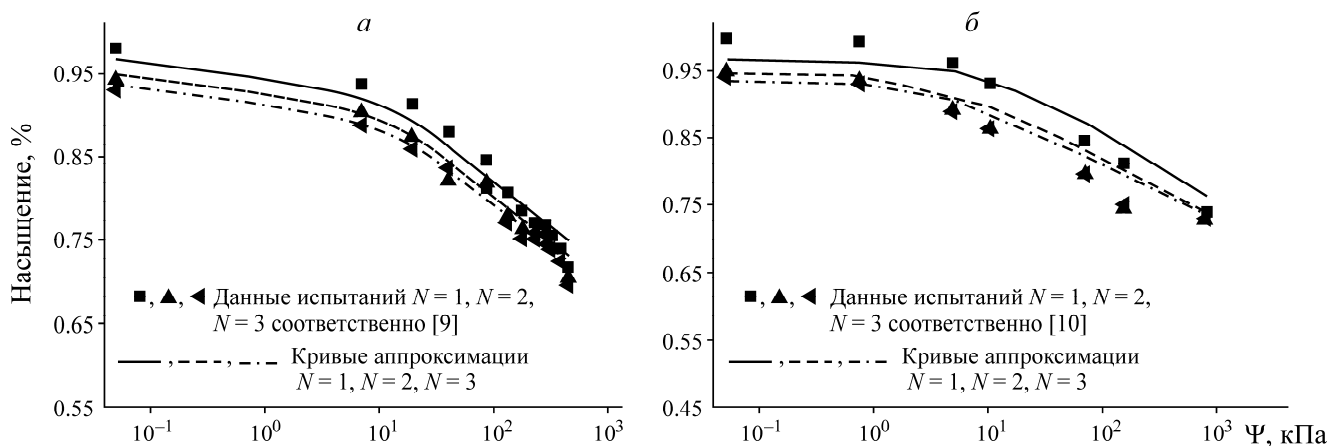


Рис. 10. Сравнение данных испытаний и результатов аппроксимации, полученных с помощью разработанной модели при различном количестве ЦВН набухающего грунта из округа Наньнин (а) и вулканического туфа (б)

ВЫВОДЫ

Рассмотрена кривая общей гидрофизической характеристики набухающего грунта из округа Наньнин (Китай) после множественных циклов высыхания и намокания, а также разработана улучшенная модель прогнозирования кривой основной гидрофизической характеристики набухающего грунта.

В ходе работы получены следующие основные результаты:

— модели Гарднера, Ван Генухтена, Косуги, Брукса и Кори, Фредлунда и Сина способны точно прогнозировать ОГХ набухающего грунта из округа Наньнин после множественных циклов высыхания и намокания. Параметры аппроксимации, генерируемые данными моделями, после различного количества циклов высыхания и намокания значительно колеблются;

— после двух ЦВН структура грунта достигает равновесного состояния. При повышении их количества способность грунта к удержанию влаги уменьшается;

— разработанная модель учитывает несколько факторов: количество циклов высыхания и намокания и капиллярно-сорбционное давление. Модель обладает высокой эффективностью прогнозирования ОГХ, более того, она может генерировать общее уравнение и идентичные параметры аппроксимации после различного количества ЦВН, что сокращает трудоемкость инженерных измерений;

— новая модель может быть использована для аппроксимации как грунта с изначально равномерной структурой, так и грунта с изначальноными макротрещинами и деформацией микропор. Модель применима для других грунтов, в частности для прогнозирования кривой основной гидрофизической характеристики вулканического туфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mu Q. Y., Zhou C., Ng C. W. W.** Compression and wetting induced volumetric behavior of loess: Macro- and micro-investigations, *Transp Geotech*, 2020, Vol. 23 100345.
2. **Chen R., Huang J. W., Zhou C., Ping Y., and Chen Z. K.** A new simple and low-cost air permeameter for unsaturated soils, *Soil till res*, 2021, Vol. 213: 105083.
3. **Jones J. R., D. Earl., and Holtz W. G.** Expansive soils-the hidden disaster, *Civ. Eng*, 1973, Vol. 43, No. 8.
4. **Liu Y. L., Vanapalli, and Sai K.** Influence of lateral swelling pressure on the geotechnical infrastructure in expansive soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2017, Vol. 143, No. 6
5. **Lins Y., Zou Y. Z., and Schanz T.** Physical modeling of SWCC for granular materials, *Theor. Numer. Unsaturated Soil Mech.*, 2007. — P. 61–74.
6. **Zhao Z. R., Yang H. X.** Experimental Study on Engineering Characteristics of Expansive Soil of Lu-zhong, *Int. Conf. Electr. Technol. Civ. Eng.*, 2012. — P. 1286–1289.
7. **Shi B. X., Chen S. S., and Wang G. L.** Computation Module of Expansive Soil Crack Depth Considering Dry-Wet Cycles, In: *Advances in Transportation Geotechnics and Materials for Sustainable Infrastructure*, 2014. — P. 33–39.
8. **Peng H. E.** Shallow sliding failure prediction model of expansive soil slope based on Gaussian process theory and its engineering application, *Ksce J. Civ. Eng.*, 2018, Vol. 22, No. 5. — P. 1709–1719.
9. **Huang Z.** Surface crack development rules and shear strength of compacted expansive soil due to dry–wet cycles, *Geotech. Geol. Eng.*, 2019, Vol. 37, No. 4. — P. 2647–2657.
10. **Sun D. A. and Huang D. J.** Soil-water and deformation characteristics of Nanyang expansive soil after wetting-drying cycles, *Rock Soil Mech.*, 2015, Vol. 36. — P. 115–119.
11. **Miao L. C., Liu S. Y., and Lai Y. M.** Research of soil–water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil, *Eng. Geol.*, 2002, Vol. 65, No. 4. — P. 261–267.
12. **Ng. Charles W. W., and Pang Y. W.** Experimental investigations of the soil-water characteristics of a Volcanic soil., *Can. Geotech. J.*, 2000, Vol. 37, No. 6. — P. 1252–1264.
13. **Zhang R., Zheng J. L., N. G., and Charles W. W.** Experimental study on stress-dependent soil water characteristic curve of a recompacted expansive soil, *Appl. Math. Mech.*, 2013. — P. 283–286.
14. **Al-Homoud A. S.** Cyclic swelling behavior of clays, *J. Geotech. Eng.*, 1995, Vol. 121, No.7. — P. 562–565.
15. **Mijares R. G. and Khire M. V.** Soil-water characteristic curves of compacted clay subjected to multiple wetting and drying cycles, *Geotech. Spec. Publ.*, 2010. — P. 400–409.
16. **Sayem H. M. and Kong L. W.** Effects of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve, *DEStech Trans. Environ. Energy Earth Sci.*, 2016.
17. **O'Kelly B. C., and Sivakumar V.** Water content determinations for peat and other organic soils using the oven-drying method, *Dry Technol.*, 2014, Vol. 32, No. 6. — P. 631–643.
18. **Zein A. K.** Rapid determination of soil moisture content by the microwave oven drying method. *Sudan Eng. Soc. J.*, 2002, Vol. 48, No. 40. — P. 43–54.
19. **O'Kelly B. C.** Accurate determination of moisture content of organic soils using the oven drying method, *Dry Technol.*, 2004, Vol. 22, No. 7. — P. 1767–1776.

20. Lagerwerff J. V., Ogata G., and Eagle H. E. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol., Science, 1961, Vol. 133. — P. 1486–1487.
21. Zur B. Osmotic control of the matrix soil-water potential: I. soil-water system, Soil Sci., 1966, Vol. 102, No. 6. — P. 394–398.
22. Kassiff G. and Shalom A. B. Experimental relationship between swell pressure and suction, Géotechnique, 1971, Vol. 21, No. 3. — P. 245–255.
23. Nam S. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils, Eng. Geol., 2010, Vol. 110, No. 1–2. — P. 1–10.
24. Delage P. and Cui Y. J. An evaluation of the osmotic method of controlling suction, Geomech. Geoenviron., 2008, Vol. 3, No.1. — P. 1–11.
25. Gardner W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, Soil Sci., 1958, Vol. 85, No. 4. — P. 228–232.
26. Kosugi K. I. Three-parameter log normal distribution model for soil water retention, Water Resour Res., 1994, 30.4. — P. 891–901.
27. Brooks R. H. and Corey A. T. Hydraulic properties of porous media, Hydrology Papers (Colorado State University), 1964, No. 3.
28. Van G. and M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. AM. J., 1980, Vol. 44, No. 5. — P. 892–898.
29. Fredlund D. G. and Xing A. Q. Equations for the soil-water characteristic curve, Can. Geotech. J., 1994, Vol. 31, No. 4. — P. 521–532.
30. Tan X. H. Experimental study and curve fitting of soil–water characteristic curve, Rock Soil Mech., 2013, Vol. 34, No. S2. — P. 51–56.
31. Chen W. J., Cheng D. H., and Tao W. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model, Hydrogeol. and Eng. Geology, 2011, Vol. 44, No. 6. — P. 147–153.

Поступила в редакцию 03/VIII 2020

После доработки 17/XI 2020

Принята к публикации 24/V 2021