УДК 622.02

Т.Р. Тедеев, Т.М. Тезиев

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТИ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

Получено аналитическое решение нелинейного уравнения влагопроницаемости в многофазной грунтовой среде с учетом потенциала нагрузки. Проведены исследования с учетом влияния внешней нагрузки на общий вид профиля влажности в грунтовой среде, скорость влагопроницаемости и скорость перемещения фронта смачивания. Показано, что инфильтрационные зоны влагопереноса имеют формальный характер и не обоснованы ни теорией, ни экспериментом. Графически представлены результаты исследования перераспределения влажности вследствие изменения интенсивности давления и расчета влагопроницания по глубине и во времени.

Ключевые слова: влагопроницаемость, потенциал нагрузки, несплошной поток, структурные разновидности влаги.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-70-76

Известно [1, 2, 3, 4, 5], что влага в грунтовой среде может находиться под влиянием сил, имеющих различную природу: адсорбционных (монослойной и полислойной), осмотических, капиллярных и гравитационных. Величина этих сил зависит от минералогического и гранулометрического составов, исходной влажности, плотности скелета среды, концентрации порового раствора и нагрузки, действующей на многофазную среду [3, 4, 6, 8, 9]. Полный потенциал, зависящий от совокупности действия силовых полей, в этом случае подразделяется на отдельные слагаемые, соответствующие каждому силовому полю.

В известной работе [5] автор предлагает методику определения потенциала нагружения: потенциал нагрузки равен отношению элементарной работы dA, произведенная грунтовой средой при поглощении влаги к массе поглощенной жидкости dm_w. Увеличение влагосодержания элементарного объема грунта $dxdydz$ от приращения влажности dW можно представить в следующем виде: $dm = \rho_s dWdxdydz/(1 + e_0)$, где ρ_s — плотность частиц грунта; e_0 —начальный коэффициент пористости грунта. Окончательно, при приложении на поверхности грунтовой среды равномерного давления P с учетом собственного веса грунта, автором получено [5]:

$$\Omega = (P + \int_0^z \gamma dz)(\partial e / \partial W)_\sigma / \rho_s$$

Полученное выражение для одномерной задачи содержит зависимость коэффициента пористости от влажности и давления. При этом частная производная ($\partial e/\partial W$) при определенных допущениях переходит в абсолютную (de/dW), что позволяет исключить давление из числа независимых переменных и упростить расчеты. Установлено [5], что между этими величинами имеется определенная функциональная

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 70–76.
© Т.Р. Тедеев, Т.М. Тезиев. 2017.

связь в виде прямолинейной, параболической, гиперболической и логарифмической зависимости. Отмечается также, что экспериментальные данные лучше описываются уравнением параболической зависимости.

Для определения потенциала нагружения рассмотрим нелинейную параболическую зависимость коэффициента пористости от влажности и следуя методике Е.А. Сорочана [5] исключим давление из числа независимых переменных для частной производной, тогда можно получить:

$$\Omega = (P + \int_0^z \gamma dz)(\partial e / \partial W)_\sigma / \rho_s , \quad (1)$$

где *a* и *b* — экспериментальные коэффициенты.

Известно [3, 6], что скорость влагопроницания в единицу времени через единичную площадь многофазной грунтовой среды можно определить следующим образом:

$$u_w = -K_w(w)\frac{\partial \Phi}{\partial z} , \quad (2)$$

где $K_w(w)$ — коэффициент водопроницаемости несплошного потока; Φ — суммарный потенциал грунтовой влаги в рассматриваемой задаче:

$$\Phi = \Omega_{wp} + \Psi_{wd} + \Psi_{wc} - Z , \quad (3)$$

здесь Ω_{wp} — потенциал нагружения без учета собственного веса грунта:

$$\Omega_{wp} = P(2aW + b) / \rho_s , \quad (4)$$

Ψ_{wd} — потенциал диффузионной влаги:

$$\Psi_{wd} = P_{wd} / \rho_{wd} , \quad (5)$$

Ψ_{wc} — потенциал капиллярной влаги:

$$\Psi_{wc} = P_{wc} / \rho_{wc} , \quad (6)$$

Z — гравитационный потенциал,

где P_{wd}, P_{wc}, ρ_{wd}, ρ_{wc} — давления и плотности соответственно диффузионной и капиллярной влаги.

Функциональная зависимость между давлением поровой влаги P_w и влажностью грунтовой среды *W* в дифференциальной форме имеет вид:

$$dP = -\alpha_{wi} dW , \quad (7)$$

где α_{wi} — коэффициент пропорциональности [6].

Интегрирование зависимости (7) производится с учетом предельных значении интервала изменения каждой структурной разновидности влаги.

Окончательно, после выполнения интегрирования, можно получить зависимости между давлением и влажностью[6]:

- для диффузионной влаги

$$P_{wd} = -\alpha_{wd}(W_{\max}^D - W) \quad (8)$$

- для капиллярной влаги

$$P_{wc} = -\alpha_{wc}(W_{\max}^C - W) \quad (9)$$

Подставляя соотношения (3)—(6) и (8)—(9) в зависимость (2), для скорости влагопереноса в многофазной грунтовой среде можно получить:

$$u_w = -K_w(w)\cdot\left[(\alpha_{wp}/\rho_s + \alpha_{wd}/\rho_{wd} + \alpha_{wc}/\rho_{wc})\frac{\partial W}{\partial z}\right] + K_w(w) \qquad (10)$$

где $\alpha_{wp} = P\cdot 2a$ — результат дифференцирования потенциала нагружения по координате.

Рассматривая задачу влагопроницаемости без учета внутреннего распределенного источника влаги, условие неразрывности влажностного потока будет иметь следующий вид:

$$\frac{dn_w}{dt} + \frac{du_w}{dz} = 0\,, \qquad (11)$$

где u_w — скорость влагопроницания через единичную площадь грунтовой среды; t — время;

При этом известно [3, 4, 6], что задача влагопереноса в многофазной грунтовой среде под действием сил всасывания сводится к рассмотрению несплошного потока через поровое пространство многофазной среды.

Площадь несплошного потока влаги в этом случае может быть определена по величине коэффициента водонасыщенности многофазной среды:

$$n_w = nS_w\,, \qquad (12)$$

где n — пористость грунтовой среды.

Для определения коэффициента водонасыщенности имеем

$$S_w = W/W_{\max}\,, \qquad (13)$$

где $W_{\max}$ — влажность, которая соответствует полному заполнению среды

$$W_{\max} = \frac{n\rho_w}{m\rho_s}\,, \qquad (14)$$

где W — влажность среды; ρ_s — плотность минеральных частиц грунтовой среды; ρ_w — плотность поровой жидкости; m — объем частиц в единице объема среды.

Тогда, для многофазной среды скорость изменения площади потока влаги в порах среды во времени определится как

$$\frac{dn_w}{dt} = \frac{m\rho_s}{\rho_w}\frac{dW}{dt}\,. \qquad (15)$$

Подставляя значения скорости влагопроницания u_w и изменения площади потока влаги во времени из (10) и (15) в уравнение (11), получим

$$\frac{m\rho_s}{\rho_w}\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left\{\left[\left(\frac{K_w\alpha_{wp}}{\rho_s} + \frac{K_w\alpha_{wd}}{\rho_{wd}} + \frac{K_w\alpha_{wc}}{\rho_{wc}}\right)\frac{\partial W}{\partial z}\right] - K_w(W)\right\} \qquad (16)$$

при соответствующем начальном условии

$$W(z,0) = W_0\,, \qquad (17)$$

а на границе — граничного условия

$$W(0,t) = W_s\,. \qquad (18)$$

После введения коэффициентов диффузии $D(W)$ и проницаемости $K(W)$ грунтовой среды, нелинейное дифференциальное уравнение (16) принимает вид:

$$\frac{m\rho_s}{\rho_w}\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left\{\left[D_{wp}(W) + D_{wd}(W) + D_{wc}(W)\right]\frac{\partial W}{\partial z} - K_w(W)\right\} \qquad (19)$$

где $K_w(W)$ — коэффициент влагопроницаемости грунтовой среды по С.Ф. Аверьянову [3, 6]:

$$K_w(W) = K_o\left[\frac{W - W_0}{n - W_0}\right]^k, \tag{20}$$

$D_{wi}(W)$ — коэффициент диффузии пленочной влаги

$$D_{wi}(W) = D_0^{wi}\frac{(W - W_0)^{k-1}}{(n - W_0)^k},\ i = p,\ d,\ c. \tag{21}$$

Здесь W_0 — влага, прочносвязанная поверхностью грунтовой среды; K_0 — коэффициент влагопроницаемости при полном влагонасыщении грунтовой среды; D^{wi}_0 — коэффициент диффузии для каждой структурной разновидности [6].

Согласно [7], для построения автомодельного решения следует ввести в уравнение (19) волновую переменную

$$\eta = z - \lambda t\,. \tag{22}$$

Приняв обозначение $W - W_0 = Y(\eta)$, относительно последней получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{\lambda m(n - W_0)^k \rho_s}{\rho_w}\frac{dy}{d\eta} = \frac{d}{d\eta}\left\{\left[(D_0^{wp} + D_0^{wd} + D_0^{wc})Y^{k-1}\frac{dY}{d\eta}\right] - K_0 Y^k\right\}, \tag{23}$$

которое равнозначно:

$$\frac{d}{d\eta}\left[(D_0^{wp} + D_0^{wd} + D_0^{wc})Y^{k-1}\frac{dY}{d\eta} - K_0 Y^k + \lambda m(n - W_0)^k\frac{\rho_s}{\rho_w}Y\right] = 0\,. \tag{24}$$

Следуя [7], для получения решения дифференциального уравнения (24), необходимо принять

$$\left(D_0^{wp} + D_0^{wd} + D_0^{wc}\right)Y^{k-1}\frac{dY}{d\eta} - K_0 Y^k + \lambda m(n - W_0)^k\frac{\rho_s}{\rho_w}Y = 0 \tag{25}$$

В дальнейшем для суммы коэффициентов диффузии грунтовой среды принимаем обозначение

$$D_0^{w\Sigma} = D_0^{wp} + D_0^{wd} + D_0^{wc}, \tag{26}$$

после чего дифференциальное уравнение принимает вид:

$$D_0^{w\Sigma}Y^{k-1}\frac{dY}{d\eta} - K_0 Y^k + \lambda m(n - W_0)^k\frac{\rho_s}{\rho_w}Y = 0\,. \tag{27}$$

Решением дифференциального уравнения (25) является следующая функция

$$\frac{W - W_0}{n - W_0} = \left[\frac{\lambda m\rho_s}{K_0\rho_w}(n - W_0) + C\exp\left\{\frac{K_0(k-1)}{D_0^{w\Sigma}}\eta\right\}\right]^{\frac{1}{k-1}} \tag{28}$$

Постоянные интегрирования λ и C определяются из условии (17)—(18).

При этом известно, что на фронте смачивания, координаты которого определяются как $Z = Z_s = \lambda t$, влажность грунтовой среды равна начальной, то есть $W = W_0$. Это условие позволяет найти постоянную C:

$$C = -\frac{\lambda m\rho_s}{K_0\rho_w}(n - W_0)\,. \tag{29}$$

Для определения постоянной λ можно воспользоваться условием (18), которое приводит к следующей зависимости

$$\lambda = \frac{K_0 \rho_w}{m \rho_s (n - W_0)} \left[\frac{W_s - W_0}{n - W_0} \right]^{k-1} / \beta , \qquad (30)$$

где

$$\beta = 1 - \exp\left\{ -\frac{K_0 (k-1)}{D_0^{w\Sigma}} \lambda t \right\}. \qquad (31)$$

Следует заметить, что физически оправданное решение для скорости перемещения фронта смачивания с учетом текущего времени и функциональных зависимостей коэффициента диффузии для каждой структурной разновидности влаги можно получить из разложения зависимости (31) в ряд и удержанием первых двух членов ряда. В этом случае для определения скорости распространения фронта смачивания получим:

$$\lambda = \left(\frac{1}{t} \frac{\alpha_{wi}(W_i - W_0)}{\rho_{wi}(k-1)} \frac{m(n - W_0)\rho_s}{K_0 \rho_w} \left(\frac{W_s - W_0}{n - W_0} \right)^{k-1} \right)^{0,5} . \qquad (32)$$

Подставляя соотношения (29) и (32) в уравнение (28) получим зависимость для определения влажности грунтовой среды в зависимости от предела проницания влаги и текущего времени:

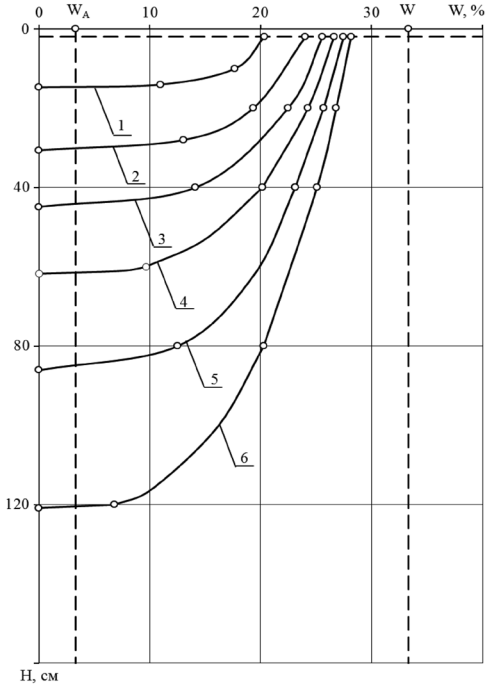

Рис. 1. Формирование профиля влажности грунтовой среды во времени и по глубине: 1—1 сут.; 2—3 сут.; 3—6 сут.; 4—12 сут.; 5—24 сут.; I — область прочносвязанной влаги $W \le W$; II — область диффузионной влаги $W_A < W \le W_C$; III — область насыщения порового пространства $W_C < W \le W_S$

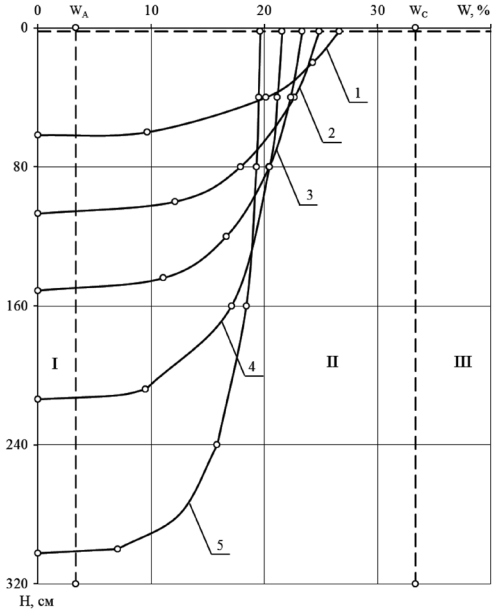

Рис. 2. Перераспределение влажности вследствие изменения интенсивности давления (время — 1 сутки): 1 — кривая, *P* = 0,0 МПа; 2 — кривая, *P* = 0,025 МПа; 3 — кривая, *P* = 0,05 МПа; 4 — кривая, *P* = 0,1 МПа; 5 — кривая, *P* = = 0,2 МПа; 6 — кривая, *P* = 0,4 МПа

$$\frac{W-W_0}{n-W_0}=H_\lambda^t\left[1-\exp\left\{\frac{K_0(k-1)}{D_0^{w\Sigma}}(z-\lambda t)\right\}\right]^{\frac{1}{k-1}}, \qquad (33)$$

где

$$H_\lambda^t=\left[\left(\frac{1}{t}\frac{\alpha_{wi}(W_i-W_0)}{\rho_{wi}(k-1)}\frac{m(n-W_0)\rho_s}{K_0\rho_w}\left(\frac{W_s-W_0}{n-W_0}\right)^{k-1}\right)^{0,5}\right]^{\frac{1}{k-1}}. \qquad (34)$$

Изложенные теоретические положения и разработанная методика позволили решить модельную задачу по определению профиля влажности в разные моменты времени (t = 1 сутки, 3 сут., 6 сут., 12 сут., 24 сут.) При этом грунтовая среда (суглинок) увлажняется из полосы W_s = 0,3, начальная влажность среды $W(z, 0)$ = = W_0 = 0,03. Исходя из этого, были приняты следующие расчетные значения параметров: см/с, n = 0,4; m = 0,6; ρ_s = 2,7 г/см³; ρ_w = 1 г/см³; $к$ = 3,56; α_W = 0,006 МПа; α_{WP} = 0,106 МПа. Исследование перераспределения влажности вследствие изменения интенсивности давления предствлено на рис. 1. Результаты расчета влагопроницания по глубине и во времени представлены на рис. 2.

Обобщая полученные результаты в первом приближении можно сделать следующие выводы:

• Получено аналитическое решение нелинейного уравнения влагопроницаемости в многофазной грунтовой среде с учетом потенциала нагрузки. При этом в явной форме учитывается собственный вес грунтовой среды.

• Исследования показали, что учет потенциала нагружения существенно влияет на общий вид профиля влажности в грунтовой среде, скорость влагопроницания и скорость перемещения фронта смачивания.

• Важным преимуществом полученного аналитического решения нелинейного уравнения влагопроницаемости является возможность определения закономерностей проницания структурных разновидностей влаги при инфильтрации с учетом как внешней нагрузки, так и собственного веса среды на всем интервале неполного водонасыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полубаринова-*Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1977. — 664 с.
2. *Бэр Я. Д.*, *Заславский С.*, *Ирмей С.* Физико-математические вопросы фильтрации воды. — М.: Мир, 1971. — 452 с.
3. *Тер-Мартиросян З. Г.* Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов. — М.: Недра, 1986. — 292 с.
4. *Цытович Н. А.*, *Тер-Мартиросян З. Г.* Основы прикладной геомеханики в строительстве. — М.: Высшая школа, 1981. — 318 с.
5. *Сорочан Е. А.* Строительство сооружений на набухающих грунтах. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1989. — 312 с.
6. *Тедеев Т. Р.*, *Арунянц Г. Г.* Методология и алгоритмы расчета полей влажности в задачах проектирования грунтовых сооружений. — Владикавказ: Терек, 2005. — 203 с.
7. *Самарский А. А.*, *Галактионов В. А.*, *Курдюмов С. П.*, *Михайлов А. Г.* Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. — М.: Наука, 1987. — 476 с.
8. *Karl Terzaghi, Ralfh B. Peck, Golamreza Mesri.* Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition, 1995, 549 p.
9. *Steven L. Kramer.* Geotechnical Earthquake Engineering, University of Washington, 1996, 653 p. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тедеев Тимур Рутенович — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: trt0013@mail.ru,
Владикавказский научный центр РАН,
Тезиев Таймураз Муратович — кандидат технических наук, доцент,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 70–76.

UDC 622.02

T.R. Tedeev, T.M. Teziev

INFLUENCE OF LOAD POTENTIAL ON MOISTURE PERMEABILITY OF SOIL

The analytical solution is obtained for the nonlinear equation of moisture permeability in a multiphase soil medium with regard to the load potential. The effect of the external influence on the shape of the moisture content profile in soil, on the moisture permeability rate and on the velocity of the soil wetting front is studied. It is shown that infiltration zones of moisture transfer are formal and are proved neither theoretically nor experimentally. The research findings on the moisture redistribution under pressure intensity change and the calculations of moisture permeability versus depth and time are presented in graphical form.

Key words: moisture permeability, load potential, discontinuous flow, structural species of moisture.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-70-76

AUTHORS

Tedeev T.R., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: trt0013@mail.ru,
362027, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia,
Teziev T.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
North Caucasus Mining-and-Metallurgy Institute (State Technological University),
362021, Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia.

REFERENCES

1. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* (Theory of groundwater flow), Moscow, Nauka, 1977, 664 p.

2. Ber Ya.D., Zaslavskiy S., Irmey S. *Fiziko-matematicheskie voprosy fil'tratsii vody* (Physico-mathematical issues of water percolation), Moscow, Mir, 1971, 452 p.

3. Ter-Martirosyan Z.G. *Prognoz mekhanicheskikh protsessov v massivakh mnogofaznykh gruntov* (Prediction of mechanical processes in multi-phase soil masses), Moscow, Nedra, 1986, 292 p.

4. Tsytovich N.A., Ter-Martirosyan Z.G. *Osnovy prikladnoy geomekhaniki v stroitel'stve* (Basics of applied geomechanics in construction), Moscow, Vysshaya shkola, 1981, 318 p.

5. Sorochan E.A. *Stroitel'stvo sooruzheniy na nabukhayushchikh gruntakh*. 2-e izd. (Construction on swelling soil, 2nd edition), Moscow, Stroyizdat, 1989, 312 p.

6. Tedeev T.R., Arunyants G.G. *Metodologiya i algoritmy rascheta poley vlazhnosti v zadachakh proektirovaniya gruntovykh sooruzheniy* (Calculation methodology and algorithms for moisture fields in soil structure design), Vladikavkaz, Terek, 2005, 203 p.

7. Samarskiy A.A., Galaktionov V.A., Kurdyumov S.P., Mikhaylov A.G. *Rezhimy s obostreniem v zadachakh dlya kvazilineynykh parabolicheskikh uravneniy* (Modes with aggravations in the problems for quasi-linear parabolic equations), Moscow, Nauka, 1987, 476 p.

8. Karl Terzaghi, Ralfh B. Peck, Golamreza Mesri. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third Edition, 1995, 549 p.

9. Steven L. Kramer. *Geotechnical Earthquake Engineering*, University of Washington, 1996, 653 p.