

УДК 626.8:624.131.6

Константин Константинович ЖИБУРГОВИЧ,
кандидат технических наук,
доцент кафедры "Механика
материалов и детали машин"
Белорусского государственного
аграрного технического
университета

Эдуард Иванович МИХНЕВИЧ,
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
"Водоснабжение и водоотведение"
Белорусского национального
технического университета

ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОГО ВОДОНАСЫЩЕНИЯ И ПРИ СОДЕРЖАНИИ В НИХ ВОЗДУХА

WATER PERMEABILITY OF SANDY SOILS UNDER CONDITIONS OF TOTAL SATURATION

В статье приводятся формулы для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов, полученные на основании данных опытов с песчаными смесями различного гранулометрического состава, проведенных с использованием методов планирования и анализа эксперимента. Показано, что даже незначительное содержание воздуха в грунте существенно уменьшает его водопроницаемость. Это обстоятельство требует пересмотра формул по определению фильтрации в грунтах с целью замены в них коэффициента фильтрации для полностью насыщенного водой грунта коэффициентом водопроницаемости грунта, учитывающим величину заземленного воздуха.

Formulas for determination of the coefficient of sandy soil filtration are given. These formulas have been obtained in the experiments with sandy mixtures of different soil grading. The methods of planning and experiment analysis have been applied in the tests. It has been proved that even small air content in the soil considerably decreases its water permeability. This fact makes us revise the formulas for determination of soil filtration for the purpose of substituting the filtration coefficient for totally water-saturated soil by the permeability coefficient, taking into account the value of entrapped air.

ВВЕДЕНИЕ

Водопроницаемость песчаных грунтов колеблется в очень больших пределах и зависит не столько от общей пористости, сколько от размеров пор, которые определяются главным образом гранулометрическим составом грунтов, их плотностью и формой зерен. Чем неоднороднее грунты по гранулометрическому составу, тем они менее водопроницаемы.

Для неоднородных грунтов принимают величину диаметра частиц грунта, отражающего так или иначе их водопроницаемость. Такой диаметр называют действующим или эффективным, понимая под ним диаметр зерен, из которых искусственно сложенная порода будет иметь водопроницаемость, одинаковую с испытываемой естественной породой. Для определения величины действующего диаметра существуют способы, предложенные Хазеном и Крюгером. На основании многих опытов Хазен нашел, что действующий диаметр равен диаметру зерен d_{10} , мельче которых в породе имеется 10 % по массе [1].

Для грунтов с коэффициентом неоднородности более 5 за действующий диаметр Крюгер предлагает принимать диаметр таких зерен, из которых сложенная искусственная порода имеет удельную поверхность, одинаковую с удельной поверхностью данной испытываемой породы.

Таким образом, коэффициент фильтрации зависит в основном от гранулометрического состава грунтов. Кроме того, коэффициент фильтрации в некоторой степени зависит от свойств фильтрующейся жидкости, от ее вязкости, которая, как известно, для одной и той же жидкости зависит от температуры и количества растворенных солей. Учет влияния вязкости при определении коэффициента фильтрации для пресных подземных вод производится с помощью введения температурной поправки τ , равной

$$\tau = 0,7 + 0,03T, \quad (1)$$

где τ — температурная поправка;
 T — температура, °С, при которой ведется опыт.

Поправка высчитана для приведения коэффициента фильтрации к температуре 10 °С.

Для вычисления коэффициента фильтрации наиболее часто используются формулы Хазена, Слихтера, Казагранде, Зауредрия, Крюгера и др. Значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по формулам указанных авторов, могут различаться между собой в 1,5–2 раза и более [1].

В настоящее время широкое распространение получил метод косвенного выведения коэффициента фильтрации для применения в гидромелиоративной практике из полных линий гранулометрического состава, определяемых по методу Казагранде. Метод Казагранде принимает во внимание кроме величины зерен d_{10} также среднюю крутизну кривой гранулометрического состава на важном отрезке между значениями d_{10} и d_{60} , которая в значительной мере оказывает влияние на проницаемость грунтов и которая не содержится ни в одной из выше приведенных зависимостей.

ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОГО ВОДОНАСЫЩЕНИЯ

Цель проведенных авторами статьи опытов состояла в определении коэффициента фильтрации минеральных грунтов легкого механического состава в функции не только от характерного диаметра частиц грунта d_{10} , но и коэффициента неоднородности грунта $U = d_{60}/d_{10}$, которая бы более полно, по сравнению с имеющимися, учитывала данные гранулометрического состава грунта.

Коэффициент фильтрации определяли в приборе КФ-01 по общепринятой методике [2] с использованием дистиллированной воды. Высота образца грунта в опытах составляла 10 см. Грунт загрузался отдельными порциями (слоем по 2–3 см) с уплотнением каждой пор-

ции и последующим насыщением всего столба водой снизу по капиллярам.

В опытах использовали песчаные смеси, которые приготавливали в соответствии с кривыми гранулометрического состава, приведенными на рис. 1, в зависимости от d_{10} и U . Плотность частиц грунта составляла 2640–2660 кг/м³.

Для обоснования необходимой повторности опытов, обеспечивающих определение K_{Φ} с требуемой точностью, была выполнена серия методических опытов. Повторность опытов принималась равной трем, поскольку по данным методического опыта установлено, что погрешность оценки среднего значения K_{Φ} в этом случае не превышает 10 %.

Для проведения эксперимента использовали ротатбельный, симплексно-суммируемый план на шестиугольнике [3].

После статистического анализа и раскодирования переменных x_1 и x_2 уравнение для определения K_{Φ} песчаных грунтов легкого механического состава приводится к виду (при $0,02 \leq d_{10} \leq 0,16$; $2,0 \leq U \leq 8,0$):

$$K_{\Phi} = [(67,5d_{10}^2 + 15,88d_{10}) - (0,049U^2 - 0,533U) - 0,76d_{10}U - 1,324], \quad (2)$$

где d_{10} — диаметр частиц, менее которых в грунте содержится 10 % по массе, мм;
 U — коэффициент неоднородности грунта,
 $U = d_{60}/d_{10}$.

В таблице 1 значения K_{Φ} , рассчитанные по зависимости (2), сопоставлены с данными, полученными в опытах.

Для определения K_{Φ} крупнозернистых и гравелистых песков был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^k [4, 5].

В качестве математической модели использовали полином первого порядка вида:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (3)$$

После статистического анализа и раскодирования переменных x_1 и x_2 уравнение (3) приводится к виду (при $0,16 \leq d_{10} \leq 0,50$; $2,0 \leq U \leq 8,0$):

Таблица 1. Сопоставление расчетных и опытных значений K_{Φ}

Значение K_{Φ} , м/сут	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Опытное	10,534	13,318	0,0569	31,92	0,0582	0,597	5,168	5,109
Расчетное по зависимости (2)	10,505	13,322	0,0583	31,70	0,5600	0,580	5,115	5,115

Таблица 2. Сравнение разных методов выведения коэффициента фильтрации ($t = 10^\circ\text{C}$)

№ п/п	d_{10} , мм	d_{60} , мм	Метод						
			HAG	HAZ	KOZ	ZAM	SP	KAS	AWT
1	0,015	0,081	0,026	0,130	0,001	Менее 0,001	0,784	0,150	0,101
2	0,063	0,315	0,460	3,175	0,173	0,194	3,829	1,158	1,311
3	0,072	0,54	0,568	3,920	0,042	0,063	6,375	1,053	1,001
4	0,073	0,33	0,618	4,263	0,092	0,124	4,523	2,006	1,829
5	0,085	0,33	0,838	5,780	0,099	0,127	5,076	3,656	2,539
6	0,110	0,38	1,404	7,580	0,162	0,227	7,255	6,133	4,894
7	0,130	0,69	1,960	13,520	0,694	0,788	12,157	6,864	7,870

Примечание — HAG — Хаген, HAZ — Хазен, KOZ — Козени, ZAM — Замарин, SP — Шпачек, KAS — по методу Казагранде, AWT — по зависимости (2).

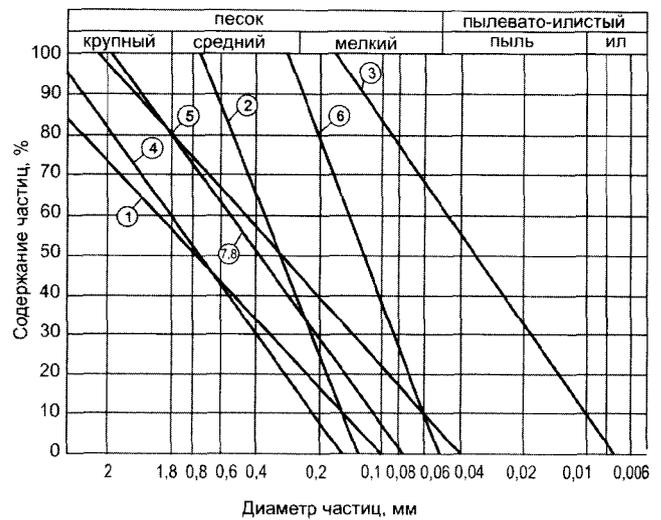


Рис. 1. Кривые гранулометрического состава исследуемых грунтов

$$K_{\Phi} = 400d_{10} - 0,32U - 1,33d_{10} \cdot U - 47,40. \quad (4)$$

В таблице 2 приведены данные, рассчитанные по методу Казагранде и по обычно применяемым эмпирическим формулам для опубликованных в [6] образцов, сопоставленные с величинами коэффициента фильтрации, полученными по предлагаемой зависимости (2). Из анализа данных, приведенных в таблице 2, вытекает предпочтительное использование предложенной зависимости (2) для расчета K_{Φ} легких минеральных грунтов — примерное сходство с решением по методу Казагранде и Хазена. Решение Хазена является недостаточно обоснованным из-за того, что расчет производится на основании только значения d_{10} , так же как и решение Хагена. Аналогично, решения Козени и Замарина дают в наших условиях результаты, неприемлемые в практике.

ВОДПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ ПРИ СОДЕРЖАНИИ В НИХ ВОЗДУХА

Коэффициент фильтрации характеризует водопроницаемость почвогрунта, полностью насыщенного вла-

Таблица 3. Сопоставление расчетных и опытных значений K_0

Значение K_0 , м/сут	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Опытное	3,349	9,552	0,00100	16,217	0,141	0,163	1,811	1,790
Расчетное по зависимости (9)	3,330	9,430	0,00103	16,822	0,161	0,182	1,838	1,838

гой. В природе полные насыщенные грунта влагой встречается редко. Даже в опытах с насыпными колоннами при насыщении их снизу, и тем более сверху, всегда остается некоторое количество заземленного воздуха в порах, со всех сторон замкнутых водой. Содержание воздуха в грунте значительно уменьшает его водопроницаемость [7].

Исследуя вопрос о влиянии заземленного воздуха на коэффициент фильтрации $K_ф$, С. Ф. Аверьянов вывел формулу

$$K_в = K_о \cdot \left(\frac{\omega - \omega_0}{n - \omega_0} \right)^{3,5}, \quad (5)$$

где $K_в$ — водопроницаемость при влажности ω , $\omega > \omega_0$;
 ω_0 — наименьшая влагоемкость;
 n — пористость.

В частности, при полной влагоемкости ω_n с учетом заземленного воздуха (нижняя граница зоны аэрации) $K_в$ определяется по формуле

$$K_в = K_0 = K_о \cdot \left(\frac{\omega_n - \omega_0}{n - \omega_0} \right)^{3,5}. \quad (6)$$

Однако приведенные зависимости не позволяют производить расчеты K_0 по косвенным признакам, что в значительной степени затрудняет их практическое применение.

Ранее авторами статьи были получены расчетные зависимости для ориентировочной оценки количества заземленного воздуха в зонах с неустойчивым водным режимом в легких минеральных смесях в функции от их механического состава [8]:

— при $0,01 \leq d_{10} \leq 0,16$; $2,0 \leq U \leq 8,0$:

$$a_0 = 0,666 - 0,866 d_{10} + 0,016 U + 0,1 d_{10} \cdot U + 1,7 d_{10}^2 - 0,012 U^2, \quad (7)$$

— при $0,16 \leq d_{10} \leq 0,50$; $2,0 \leq U \leq 8,0$:

$$a_0 = 0,267 d_{10} + 0,0186 U - 0,0535 d_{10} \cdot U - 0,034, \quad (8)$$

где a_0 — доля порового пространства, занятого заземленным воздухом;
 d_{10} , U — то же, что в формуле (2).

Цель проведенных авторами статьи опытов состояла в разработке зависимости для легких минеральных грунтов (с учетом формул (7) и (8)), позволяющей в отличие от формулы (6) определять K_0 по косвенным признакам, в функции от d_{10} и U .

После статистического анализа и раскодирования переменных x_1 и x_2 уравнение для определения K_0 приводится к виду (при $0,02 \leq d_{10} \leq 16,0$; $2,0 \leq U \leq 8,0$):

$$K_0 = [15,0 d_{10} - (0,009 U^2 - 0,14 U) - 0,9 d_{10} \cdot U - 0,44]^{3,5}. \quad (9)$$

В таблице 3 значения K_0 , рассчитанные по зависимости (9), сопоставлены с опытными данными.

Для определения K_0 средне- и крупнозернистых песчаных грунтов аналогично $K_ф$ был реализован ПФЭ типа 2^к.

После статистического анализа уравнение для определения K_0 средне- и крупнозернистых песчаных грунтов приводится к виду (при $0,16 \leq d_{10} \leq 0,50$; $2,0 \leq U \leq 8,0$):

$$K_0 = 165,38 d_{10} - 2,29 U + 690 d_{10} \cdot U - 14,06. \quad (10)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения коэффициента фильтрации грунта $K_ф$ в условиях полного водонасыщения рекомендуются формулы (2) и (4).

Даже незначительное содержание воздуха в грунте существенно уменьшает его водопроницаемость. Это обстоятельство требует пересмотра формул по расчету фильтрации в почвогрунтах при наличии в них заземленного воздуха. При полной влагоемкости почвогрунтов на границе с зоной аэрации для определения их водопроницаемости K_0 могут быть использованы зависимости (9) и (10), косвенно учитывающие содержание воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутц, Ш. Ф. Пособие к практическим занятиям по гидрогеологии / Ш. Ф. Бутц, В. С. Самарина. — Л.: Изд. Ленинградского университета, 1956. — 172 с.
2. Руководство по лабораторным геотехническим исследованиям грунтов. Физико-механические испытания. — М.: Союзводпроект, 1981. — 264 с.
3. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) / В. З. Бродский [и др.]. — М.: Металлургия, 1982. — 752 с.
4. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов [и др.]. — М.: Наука, 1980. — 230 с.
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер [и др.]. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
6. Spacek, J. Stanoveni koeficienta filtrace z totalnich krivier zrnitosti / J. Spacek // Meliorace, 23. — Praha, 1987. — С. 1–13.
7. Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. — М.: Колос, 1982. — 238 с.
8. Жибуртович, К. К. Методика расчета коэффициента влагопроводности в зоне равновесного влагосодержания / К. К. Жибуртович, С. Ф. Пилипчук // Мелиорация переувлажненных земель: сб. науч. работ БелНИИМил. Т. XXXIX. — Минск, 1992. — С. 49–54.

Статья поступила в редакцию 06.01.2011.