

Н. С. БУХМАН
Л. М. БУХМАН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ГРУНТА IN SITU

ON ONE METHOD FOR DETERMINING THE POROSITY
AND FILTRATION COEFFICIENT OF SOIL IN SITU

Рассмотрен простой и недорогой полевой способ оценочного определения пористости грунта и его коэффициента фильтрации. Представлены графики для непосредственного определения этих параметров по глубине лужи жидкости на поверхности сухого грунта, времени полного впитывания жидкости в грунт и времени половинного впитывания, в течение которого глубина лужи уменьшается в два раза. Представлены упрощенные методики, позволяющие ограничиться измерением исходной глубины лужи и времени ее полного впитывания и позволяющие получить приближенную оценку коэффициента фильтрации с точностью до фактора 2.

Ключевые слова: фильтрация, жидкие загрязнения, пористый грунт, время впитывания, пористость, коэффициент фильтрации

Одним из важных и до сих пор недостаточных хорошо изученных источников загрязнения окружающей среды является фильтрация загрязненной воды и иных жидких загрязнений в грунте. Речь идет о фильтрации поверхностных сточных вод, загрязненных, например, нефтепродуктами или гербицидами, и о миграции грунтовых вод как через выведенные из эксплуатации, так и через действующие шламонакопители предприятий [1–7]. Ясно, что при такой миграции происходит загрязнение грунтовых вод токсичными отходами пищевой, нефтехимической, химической промышленности. Существенно, что загрязненные жидкости

A simple and cheap field method for determining the porosity of the soil and its filtration coefficient is considered. Graphs are presented for the direct determination of these parameters by the depth of a puddle of liquid on the surface of dry soil, the time of complete absorption of this liquid into the soil and the time of half absorption, during which the depth of the puddle decreases by 2 times. Simplified techniques are presented that allow us to limit ourselves to measuring the initial depth of the puddle and the time of its complete absorption and allow us to obtain an approximate estimate of the filtration coefficient with an accuracy of factor 2.

Keywords: filtration, liquid impurities, porous soil, absorption time, porosity, filtration coefficient

мигрируют не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении, в результате чего оказывается возможным загрязнение грунтовых вод на значительной территории, миграция загрязнений в реки и даже попадание их в системы водоснабжения населенных пунктов.

Общеизвестной теоретической основой для изучения фильтрации жидкостей в пористой среде является уравнение Дарси [8, 9], для решения которого необходимы экспериментальные данные об основных параметрах среды – пористости и коэффициенте фильтрации. Теоретический расчет этих параметров практически невозможен, а экспериментальное опре-

деление на стационарных установках является достаточно длительным и трудоемким процессом. Кроме того, при использовании стационарных установок для получения надежных результатов требуется тщательное соблюдение правил отбора, упаковки и транспортирования образцов грунта ненарушенного сложения. Поэтому широкое распространение получили полевые методы исследования коэффициента фильтрации [9], в основном связанные с накачкой или откачкой воды с использованием скважин и потому еще более трудоемкие. На этом фоне выгодно выделяется своей простотой и невысокой трудоемкостью такой полевой метод определения пористости и коэффициента фильтрации, как налив воды в шурф с последующим слежением за свободным понижением уровня воды в шурфе. По временной зависимости понижения уровня воды в шурфе можно определить как пористость грунта, так и его коэффициент фильтрации.

Один из вариантов этого метода рассматривается в данной работе. Мы рассматриваем случай «плоского» шурфа, горизонтальные размеры которого значительно превышают его глубину. По существу речь идет о неглубокой плоской «луже», поэтому можно использовать приведенные в [10] результаты решения 1D-задачи о динамике впитывания слоя жидкости в грунт.

Основным результатом [10] является формула

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{1-m} \left(\frac{h_{e0} - h_e(t)}{h_{e0}} - \frac{m}{1-m} \times \ln \left(1 + \frac{1-m}{m} \frac{h_{e0} - h_e(t)}{h_{e0}} \right) \right). \quad (1)$$

Здесь t – время, прошедшее с начала впитывания; $h_e(t)$ – глубина лужи в данный момент времени; h_{e0} – глубина лужи в начальный момент времени ($h_{e0} = h_e(0)$); m – пористость грунта, параметр $t_0 = h_{e0}/C$, где C – коэффициент фильтрации грунта.

Для определения двух неизвестных параметров (m и C) не требуется полностью фиксировать временную зависимость глубины лужи $h_e(t)$ – вполне достаточно двух параметров, в качестве которых можно использовать время полного впитывания лужи t_1 ($h_e(t_1) = 0$) и время половинного впитывания лужи $t_{1/2}$ ($h_e(t_{1/2}) = h_{e0}/2$), в течение которого глубина лужи уменьшается в два раза в сравнении с исходной. Для этих параметров из (1) нетрудно получить

$$\frac{t_1}{t_0} = \frac{1}{1-m} \left(1 + \frac{m}{1-m} \ln(m) \right) \quad (2)$$

$$\frac{t_{1/2}}{t_0} = \frac{1}{1-m} \left(\frac{1}{2} - \frac{m}{1-m} \ln \left(\frac{m+1}{2m} \right) \right). \quad (3)$$

Существенно, что и время полного впитывания, и время половинного впитывания зависят от коэффициента фильтрации и исходной глубины лужи единообразно – лишь через параметр $t_0 = h_{e0}/C$. Поэтому их безразмерное отношение $\delta \equiv t_1/t_{1/2}$ не зависит ни от исходной глубины лужи, ни от коэффициента фильтрации и определяется лишь пористостью среды:

$$\delta = \frac{t_1}{t_{1/2}} = \frac{2(1-m+m \ln(m))}{1-m+2m \ln(2m/(1+m))} \equiv \varphi_1(m). \quad (4)$$

График функции $\delta = \varphi_1(m)$ приведен на рис. 1.

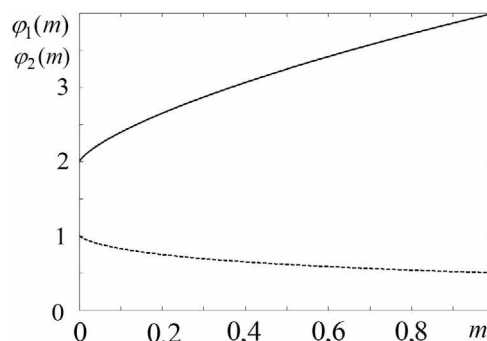


Рис. 1. Графики зависимости функций $\varphi_1(m)$ (сплошная кривая) и $\varphi_2(m)$ (штриховая кривая) от пористости среды m

Функция $\varphi_1(m)$ изменяется от 2 при $m \rightarrow 0$ до 4 при $m \rightarrow 1$. Видно, что эта функция монотонна и потому обратная к ней функция $m(\delta)$ однозначна и тоже монотонна. Данная функция изменяется от 0 при $\delta = 2$ до 1 при $\delta = 4$. График этой функции приведен на рис. 2.

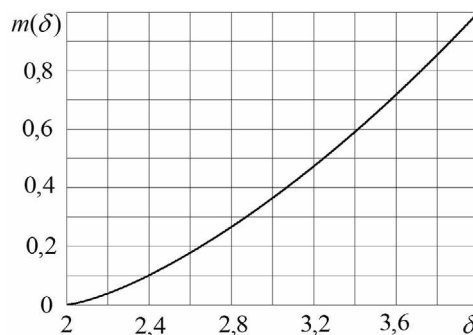


Рис. 2. График зависимости пористости среды m от отношения времени полного впитывания и половинного впитывания $\delta \equiv t_1/t_{1/2}$

Таким образом, измерив отношение времени полного впитывания к времени половинного впитывания $\delta \equiv t_1 / t_{1/2}$, можно найти пористость среды непосредственно с использованием рис. 2. Так, например, в случае $\delta = 3,4$ пористость среды равна 60 %.

Для коэффициента фильтрации из (2) имеем

$$C = \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right) \varphi_2(m), \quad (5)$$

где график функции

$$\varphi_2(m) \equiv \frac{1}{1-m} \left(1 + \frac{m}{1-m} \ln(m) \right) \quad (6)$$

также приведен на рис. 1. Функция $\varphi_2(m)$ монотонна и изменяется от 1 при $m \rightarrow 0$ до 1/2 при $m \rightarrow 1$. Измерив среднюю скорость впитывания $v_{av} = \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right)$ и уже зная пористость грунта, нетрудно найти и его коэффициент фильтрации.

Можно поступить еще проще, используя однозначную и монотонную функцию $\varphi_3(\delta) \equiv \varphi_2(m(\delta))$, график которой приведен на рис. 3, и формулу

$$C = \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right) \varphi_3(\delta). \quad (7)$$

Функция $\varphi_3(\delta)$ монотонно убывает от 1 при $\delta = 2$ до 1/2 при $\delta = 4$.

Таким образом, измерив всего три параметра – исходную глубину лужи h_{e0} , время полного впитывания t_1 и время половинного впитывания $t_{1/2}$ и найдя отношение $\delta \equiv t_1 / t_{1/2}$ можно

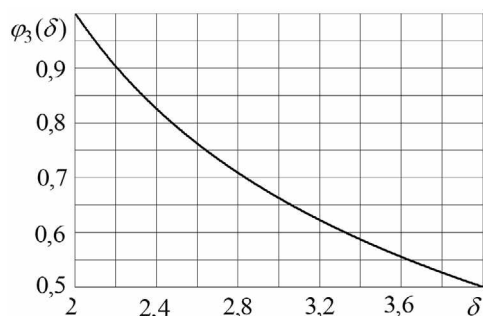


Рис. 3. График зависимости функции $\varphi_3(\delta) \equiv \varphi_2(m(\delta))$, необходимой для вычисления коэффициента фильтрации среды по формуле (7), от отношения времени полного впитывания и времени половинного впитывания $\delta \equiv t_1 / t_{1/2}$

по графику рис. 2 найти пористость среды, а по графику рис. 3 совместно с формулой (7) – ее коэффициент фильтрации.

Разумеется, описанный метод измерения пористости и коэффициента фильтрации имеет ряд очевидных недостатков и не может быть рекомендован для ответственных измерений, требующих особой надежности (например при проектировании). Тем не менее его простота и дешевизна (по существу требуется только лопата, линейка и часы) позволяет использовать его в тех случаях, когда главным критерием является оперативность и дешевизна измерений (например при проведении научных исследований).

За счет некоторого снижения точности процедуру измерения коэффициента фильтрации можно упростить еще больше, отказавшись от измерения пористости грунта и половинного времени впитывания. Действительно, из рисунка 3 видно, что функция $\varphi_3(\delta) \equiv \varphi_2(m(\delta))$ при любом значении параметра δ находится в пределах от 1 до 1/2, т. е. значение коэффициента фильтрации в любом случае находится в пределах от средней скорости впитывания

$v_{av} = \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right)$ до половины этой скорости:

$$\left(\frac{h_{e0}}{2t_1} \right) < C < \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right). \quad (8)$$

Если учесть, что обычно [10] пористость среды близка к 50 %, для грубых оценок можно пользоваться формулой

$$C = 0,62 \left(\frac{h_{e0}}{t_1} \right). \quad (9)$$

Выбор начальной глубины лужи при измерениях несущественен, поскольку, как известно [11], средняя скорость понижения уровня воды от исходной глубины лужи не зависит. Ясно, что из соображений удобства измерения времени впитывания исходная глубина лужи должна быть достаточно велика в случае сред в высокими значениями коэффициента фильтрации (типа крупнозернистых песков) и достаточно мала в случае сред с низкими значениями этого параметра (типа суглинков).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стрелков А.К., Теплых С.Ю. Охрана окружающей среды и экология гидросферы. Самара, 2015. 240 с.
2. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалев П.А., Саргсян А.М. Экологические аспекты воздействия по-

верхностных сточных вод с железнодорожных станций // Градостроительство и архитектура. 2013. № S4 (13). С. 83–88.

3. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалева П.А., Саргсян А.М. Оценка экологического состояния технической полосы отвода // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 3. С. 31–34.

4. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Бухман Н.С., Саргсян А.М. Анализ и характеристика фильтрации поверхностного стока в балластной призме железнодорожного пути // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 12. С. 63–72.

5. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалева П.А. Методика определения категории загрязненности железнодорожных путей // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: мат-лы 66-й Всерос. науч.-техн. конф. / СГАСУ. Самара, 2009. С. 109–111.

6. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалева П.А. Влияние хозяйственной деятельности на качественный состав поверхностных водотоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 8. С. 21–26.

7. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Горшкалева П.А., Саргсян А.М. Современное состояние вопроса сбора и очистки поверхностного стока с железной дороги // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 123–129.

8. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.

9. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Институт компьютерных исследований. Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 628 с.

10. Бухман Н.С., Теплых С.Ю., Бухман Л.М. Динамика впитывания жидких загрязнений в пористый грунт // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 4 (132). С. 51–59.

11. Бухман Н.С., Теплых С.Ю., Бухман Л.М. О линейной зависимости времени впитывания скопления жидкости от высоты ее слоя на поверхности почвогрунта // Приволжский научный журнал. 2022. № 4 (64). С. 73–78.

REFERENCES

1. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu. *Okhrana okruzhayushchey sredy i ekologiya gidrosfery* [Environmental Protection and Hydrosphere Ecology]. Samara, 2015. 240 p.

2. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. Environmental aspects of the impact of surface wastewater from railway stations. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban planning and architecture], 2013. no. S4(13), pp. 83–88. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.23.

3. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. Environmental assessment of the technical right-of-way. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities], 2014, no. 3, pp. 31–34. (un Russian)

4. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Bukhman N.S., Sargsyan A.M. Analysis and characteristics of surface runoff filtration in the ballast prism of the railway track. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment], 2015, no. 12, pp. 63–72. (in Russian)

5. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A. Methodology for determining the category of contamination of railway tracks. *Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika: mat-ly 66-y Vseros. nauch.-tekhn. konf. / SGASU* [Actual problems in construction and architecture. Education. Science. Practice: checkpoints of the 66th All-Russia. scientific and technical conf. / SGASU]. Samara, 2009, pp. 109–111. (In Russian).

6. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A. Influence of economic activity on the qualitative composition of surface watercourses. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment], 2014, no. 8, pp. 21–26. (in Russian)

7. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Gorshkalev P.A., Sargsyan A.M. The current state of the issue of collecting and cleaning surface runoff from the railway. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2014, no. 4, pp. 123–129. (in Russian)

8. Leontyev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Fundamentals of filtration theory]. Moscow, Publishing house of the Center of applied researches at the MSU Faculty of Mechanics and Mathematics, 2009. 88 p.

9. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede. Institut komp'yuternykh issledovaniy* [Flow of homogeneous liquids in a porous medium. Institute for Computer Studies]. Moscow – Izhevsk: Research Center “Regular and Chaotic Dynamics”, 2004. 628 p.

10. Bukhman N.S., Teplykh S.Yu., Bukhman L.M. Dynamics of absorption of liquid contaminants into porous soil. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov* [Problems of collection, treatment and transportation of oil and petroleum products], 2021, no. 4(132), pp. 51–59. (in Russian)

11. Bukhman N.S., Teplykh S.Yu., Bukhman L.M. On the linear dependence of the time of fluid accumulation absorption on the height of its layer on the soil surface. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Volga Scientific Journal], 2022, no. 4(64), pp. 73–78. (in Russian)

Об авторах:

БУХМАН Николай Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики, профессор кафедры
строительной механики, инженерной геологии,
оснований и фундаментов
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 244
E-mail: nik3141rambler@rambler.ru

BUKHMAN Nikolay S.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor
of Physics Chair, Professor of Structural Mechanics,
Engineering Geology, Foundations and Foundations
Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244
E-mail: nik3141rambler@rambler.ru

БУХМАН Любовь Михайловна

старший преподаватель кафедры строительной
механики, инженерной геологии, оснований
и фундаментов, преподаватель колледжа
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 244
E-mail: liubov1967@list.ru

BUKHMAN Lyubov M.

Senior Lecturer of Structural Mechanics, Engineering
Geology, Foundations and Foundations Chair, College
Teacher
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244
E-mail: liubov1967@list.ru

Для цитирования: Бухман Н.С., Бухман Л.М. Метод определения пористости и коэффициента фильтрации грунта in situ // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 2. С. 4–8. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.02.01.
For citation: Bukhman N.S., Bukhman L.M. On one method for determining the porosity and filtration coefficient of soil in situ. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 2, pp. 4–8. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.02.01.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»



Журнал включен с 01.12.2015 г. в Перечень ВАК, индексируется в системе РИНЦ, каждой статье присваивается идентификатор цифрового объекта DOI
Индекс журнала в Объединенном каталоге «Пресса России»: 70570

Рубрики:

- Строительство
- Архитектура

Полный перечень рубрик можно посмотреть на официальном сайте журнала journals.eco-vector.com

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ БЕСПЛАТНАЯ

СТРЕЛКОВ Александр Кузьмич

доктор технических наук, главный редактор

443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244
тел. (846) 242-36-98; +79276510709
vestniksgasu@yandex.ru

