

6. Arsenyev, G. S. "Modern problems of the extreme flash floods regulation by the hydropower plant reservoirs." *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University* 10 (2009): 13–20.
7. Lapin, G. G., and A. N. Zhirkevich. "Passage of the 2006 and 2007 spring floods through structures at the Zeya hydroproject." *Power Technology and Engineering* 42.6 (2008): 323–330. DOI: 10.1007/s10749-009-0063-x.
8. "Zejskaja GJeS i Burejskaja GJeS v propuske anomalnogo pavodka v Amurskoj oblasti v 2013 godu." *Gidrotehnika. XXI vek* 3 (2013): 12–17.
9. Gaydaychuk, E. I., A. M. Slobodchikov, and M. N. Schevtsov. "Analysis of major flooding in the Amur river basin." *Dalnij vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* 1 (2013): 302–305.
10. Danilov-Danil'yan, V. I., and A. N. Gel'fan. "On the rostrum of the RAS presidium." *Herald of the Russian Academy of Sciences* 84.5 (2014): 335–343. DOI: 10.1134/S1019331614050013.
11. Vasilev, O. F., A. T. Zinovev, K. B. Koshelev, A. V. Djachenko, and A. A. Kolomejcev. "Jekstremal'nyj dozhdevoj pavodok 2014 g. v bassejne Verhnej Obi: uslovija formirovaniya, prognozirovanie i naturnye nabljudeniya." *Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Centralnoj Azii. T.1: tr. Vseros. nauchn. konf. s mezhdunarodn. Uchastiem: v 2 t. (25-29 avg. 2014 g., Barnaul.)*. Barnaul: IVJeP SO RAN, 2014: 9–16.
12. Russian Federation. Set of rules. 40.13330.2012. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: OOO «Analitik», 2012.
13. USSR. Sanitary standards and rules. 2.06.06-85. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: CITP Gosstroja SSSR, 1986.
14. USSR. Sanitary standards and rules. 2.06.05-84. Plotiny iz gruntovyh materialov. M.: APP CITP, 1991.
15. USSR. Sanitary standards and rules. 2054-77. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye. M.: Strojizdat, 1978.
16. USSR. Sanitary standards and rules. II-53-73. Plotiny iz gruntovyh materialov. M.: Strojizdat, 1974.
17. Avakjan, A. B., and V. A. Sharapov. *Vodohranishha gidrojelektrostantsij SSSR*. 3d ed. M.: Jenergija, 1977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коношенков Александр Алексеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
a.konoshenkov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konoshenkov Aleksandr Alekseevich — postgraduate.
Supervisor:
Kolosov Mihail Aleksandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
a.konoshenkov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-128-133
УДК 626

Я. С. Смирнов-Туманов,
Н. М. Панченко

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ

Статья посвящена описанию процесса создания лабораторной установки — прибора Дарси. Данный прибор необходим для того, чтобы получить возможность проведения более детальных исследований в области изучения фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси. Изучение фильтрационных свойств смеси, которая представляет собой не единую субстанцию, а состоит из комбинации двух различных смесей, представляет особый интерес, так как лабораторные испытания по выяснению коэффициента фильтрации такой смеси ранее не проводились. Результаты эксперимента, т. е. вычисление коэффициента фильтрации комбинированной щебеночно-песчаной смеси дает возможность практического их применения при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции

грунтовых гидротехнических сооружений. Рассмотрены некоторые существующие способы определения коэффициента фильтрации проницаемого грунта. Проанализирована эффективность и возможность применения каждого из существующих способов для определения фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси. Для достижения поставленной цели выбран лабораторный метод определения фильтрационных свойств с помощью прибора Дарси как метод, дающий наиболее точные и достоверные ответы на поставленные вопросы. Изложена история прибора Дарси и приведен линейный закон фильтрации в качестве основной функциональной зависимости, описывающей фильтрационный процесс. Представлена конструкция лабораторной установки, сделано описание конструктивных узлов и элементов, описана технология проведения эксперимента, приведены практические рекомендации по планированию и проведению подобных экспериментов.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации, пористость, метод Дарси, комбинированная смесь, щебень, песок.

Введение

Точные значения пористости и коэффициента фильтрации применяются при расчётах фильтрации через грунтовые сооружения, при определении дебета скважины, при проектировании дренажных и водопонижающих систем, а также в горной, нефтегазовой и других отраслях науки и техники. Для решения задач, связанных с фильтрацией, необходимо обладать точными знаниями о пористости и коэффициенте фильтрации грунта. Если для простых грунтов (пески и щебни различных крупности) значения пористости и коэффициента фильтрации известны, то в случае комбинированного грунта (равномерная смесь песка и щебня в различных пропорциях), вопрос остается открытым. Одной из задач исследования является получение точной непрерывной численной оценки фильтрационных свойств смеси в зависимости от комбинации пропорций компонентов.

Таким образом, представляет интерес функциональная зависимость фильтрационных свойств смеси от пропорций. Возможно скомбинировать пропорции смеси таким образом, что коэффициент фильтрации полученной смеси будет на много порядков ниже, чем щебня и песка в отдельности. Методике данного исследования и посвящена настоящая статья.

Существует множество универсальных и авторских методик определения фильтрационных свойств, но любая из этих методик относится к одному из четырех способов: полевому, теоретическому, натурному и лабораторному [1], [2].

Полевой способ отличается высокой производительностью (в день исследованию подвергается несколько десятков проб) и отсутствием потребности в высокоточных габаритных приборах для исследования. Отрицательным аспектом полевого способа является большая погрешность полученных результатов.

Теоретический способ широко применяется при недостаточности полевых данных [3]. Необходимо знать лишь некоторые (род грунта, объемный вес, гранулометрический состав) свойства грунта, чтобы вычислить коэффициент фильтрации. Однако данный способ дает лишь оценочное представление фильтрационных свойствах грунта, реальные же показатели могут отличаться на порядок.

Натурный способ определения фильтрационных свойств грунта применяется на реальных сооружениях, подверженных фильтрационному процессу. Успешность такого исследования и достоверность результатов во многом зависят от программы испытаний, правильности и точности применяемой аппаратуры, и являются уникальными, а не массовыми [4], [5].

Лабораторный метод дает возможность провести систематические и комплексные измерения с высокой точностью и высокой степенью достоверности полученных результатов.

Изложение метода исследования

Исследование производится с помощью прибора Дарси. Принцип работы этого прибора заключается в использовании цилиндрического сосуда, заполненного исследуемой смесью, через

который при постоянной разнице напоров пропускается вода. С помощью пьезометров определяется давление в различных по высоте сечениях фильтрующей смеси. В процессе проведения эксперимента меняется состав смеси, замеряются показания пьезометров и определяется расход воды по ГОСТам 25584-90 и 5180-84 ([6], [7]).

Ввиду того, что режим течения жидкости в порах ламинарный, потери напора пропорциональны скорости ее движения в первой степени. Эта зависимость впервые была установлена французским инженером Анри Филибером Гаспаром Дарси при исследованиях им движения воды в песчаных фильтрах и получила название закон Дарси, или линейный закон фильтрации.

Исторически закон был получен экспериментально, но он может быть получен также с помощью осреднения уравнений Навье–Стокса, описывающих течение в масштабе пор (в настоящее время имеются доказательства для пористых сред с периодической и случайной микроструктурой). Этот закон выражает зависимость скорости фильтрации флюида от градиента напора [8]:

$$\vec{u} = -k \cdot \vec{I},$$

где $\vec{u}$ — скорость фильтрации; k — коэффициент фильтрации; $\vec{I}$ — градиент напора.

Область применимости закона Дарси ограничена фильтрацией жидкости, подчиняющейся закону вязкого трения Ньютона (закону Навье–Стокса) [9], [10]. Для ньютоновских жидкостей область применения закона Дарси ограничивается малой скоростью фильтрации. При больших скоростях зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации нелинейна (хорошее совпадение с экспериментальными данными дает квадратичная зависимость — закон фильтрации Форхгеймера).

Описание лабораторной установки

Приведенная на рисунке (с. ...) лабораторная установка спроектирована специально для описываемого эксперимента. Фильтрационная колонна представляет собой пластиковую трубу $d = 200$ мм и высотой 2 м. В нижнюю часть трубы вставляется концевая заглушка с вмонтированным в нее сливным вентилям. Многооборотный вентиль предпочтительнее шарового, так как позволяет «тоньше» регулировать расход воды. Устья пьезометров представляют собой сантехнические штуцеры, вмонтированные через резиновое уплотнение в заранее устроенные отверстия с шагом 0,4 мм. При пяти пьезометрах интервал наблюдения составляет 1,6 м. Расстояния 0,2 м ниже пьезометра № 5 и 0,2 м выше пьезометра № 1 являются технологическими запасами. Трубки пьезометров представляют собой гибкие шланги $d = 12$ мм, жестко закрепленные на деревянном пьезометрическом стенде с соблюдением прямолинейности. На переднюю стенку пьезометрического стенда нанесена масштабная координатная сетка, позволяющая снимать показания пьезометров с точностью до 1 мм.

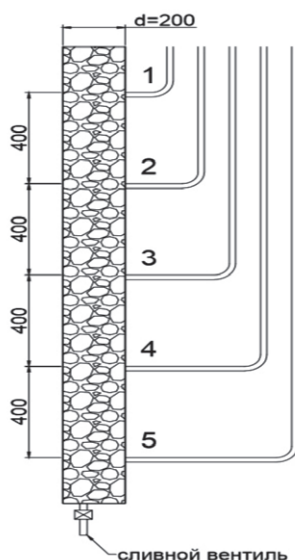


Схема установки: 1 – 5 — устья пьезометров

Целью работы является создание лабораторной установки, которая позволит исследовать фильтрационные свойства различных комбинированных щебеночно-песчаных смесей и в дальнейшем получить функциональную зависимость «коэффициент фильтрации – процентное соотношение» и «пористость – процентное соотношение». Исследование ведется дискретным методом с шагом дискретизации 20 %. Щебень выбирается фракции 5 – 20 мм, песок — средней крупности. Исследованию подвергаются шесть смесей, приведенных в следующей таблице:

Номер смеси	Содержание щебня, %	Содержание песка, %
1	100	0
2	80	20
3	60	40
4	40	60
5	20	80
6	0	100

При определении коэффициента фильтрации выходными данными являются показания пьезометров (определяются с помощью фотофиксации в режиме реального времени) и фильтрационный расход, измеряемый весовым методом — под сливной вентиль подставляется тара и с помощью секундомера вычисляется время наполнения тары. Далее тара взвешивается на лабораторных весах, что позволяет вычислить вес отобранной за известное время жидкости. После этого дважды измеряется температура жидкости лабораторным термометром, что позволяет с помощью общеизвестных закономерностей вычислить плотность жидкости. Зная плотность, подсчитывается объем жидкости в таре, который, будучи отнесенным к фиксируемому времени наполнения, представляет собой фильтрационный расход.

Определение пористости производится объемным методом. Тара известного объема заполняется исследуемой смесью. Далее тара вместе со смесью медленно, чтобы не происходило изменений структуры грунта, заполняется до краев водой, после чего определяется вес добавленной жидкости на лабораторных весах. Далее производятся известные манипуляции по пересчету веса жидкости в объем и соотносятся известный объем смеси с вычисленным объемом пор, что и представляет собой пористость.

Для каждой смеси производится вычисление пяти коэффициентов фильтрации (при пяти разных расходах и пяти разных потерях), затем результат осредняется, а также выполняется вычисление трех коэффициентов пористости, причем проба берется из верхней, средней части и нижней части части трубы, затем результат осредняется.

Обсуждение основных результатов

Смеси № 1 и 6 представляют собой чистый щебень и чистый песок соответственно. Смеси № 2 и 3 готовятся путем добавления песка в смесь № 1 и в смесь № 2 соответственно. К дальнейшему использованию отработанная смесь № 3 не годится. Необходимо готовить смеси № 5 и 4 путем добавлением щебня в смесь № 6 и 5 соответственно. Таким образом, используется два комплекта смесей (это необходимо учитывать в случае планирования подобного эксперимента).

Полученные зависимости фильтрационных свойств от пропорций смеси помогут выбрать необходимое соотношение инертных материалов для обеспечения заданного коэффициента фильтрации, а также прогнозировать фильтрационные свойства комбинированных грунтов с известными пропорциями. Полученные результаты будут представлены отдельным материалом после проведения эксперимента по описанной методике получения функциональных зависимостей: «коэффициент фильтрации – процентное соотношение» и «пористость – процентное соотношение».

Вывод

Построенная лабораторная установка позволяет проводить исследования фильтрационных свойств по методу Дарси, следующим этапом работ будет являться проведение серии экспериментов, получение и обработка экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасанов С. Т. Метод определения коэффициента фильтрации в слоистых грунтах / С. Т. Гасанов, Ф. Г. Габибов // Геотехника. — 2015. — № 2. — С. 10–15.
2. Касперов Г. И. Методика лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов для оценки безопасности при эксплуатации шламохранилищ / Г. И. Касперов, В. Е. Левкевич, С. М. Пастухов [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2015. — № 2 (22). — С. 68–72.
3. Левкевич В. Е. Методика лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов / В. Е. Левкевич, Д. С. Миканович, В. А. Цедик // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2015. — Т. 1. — № 1 (6). — С. 123–125.
4. Безволев С. Г. Оптимальная методика определения коэффициентов фильтрации и консолидации глинистых грунтов / С. Г. Безволев // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 1991. — № 4. — С. 113–122.
5. Андреев В. Г. Факторы, влияющие на коэффициент фильтрации / В. Г. Андреев, А. А. Славянский, И. О. Ворошило, И. О. Ворошило // Сахар. — 2002. — № 2. — С. 47–49.
6. ГОСТ 25584-90. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 17 с.
7. ГОСТ 5180-84. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2005. — 21 с.
8. Высоцкий Л. И. Рекомендации по использованию формул для коэффициента Дарси при расчете распределения осреднённых скоростей / Л. И. Высоцкий // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. — 2014. — № 4 (16). — С. 204–212.
9. Хасанов М. К. Элементы теории фильтрации / М. К. Хасанов. — Уфа: Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. обр. «Башкирский гос. ун-т», 2008. — 58 с.
10. Гладков С. О. О законе Дарси в условиях сохранения энтальпии / С. О. Гладков // Письма в журнал технической физики. — 2002. — Т. 28. — № 20. — С. 50–57.

THE DEVELOPMENT OF LABORATORY INSTALLATION TO STUDY THE FILTRATION PROPERTIES OF THE COMBINED SAND-GRAVEL MIXTURE

The article describes the creation process of the laboratory setup - device Darcy. This device is necessary in order to obtain the possibility of conducting more detailed studies in the study of filtration properties of the combined sand-gravel mixture. The study of filtration properties of the mixture, which is not a single substance, but consists of a combination of two different compounds, is of particular interest, as laboratory tests to determine the filtration coefficient of this mixture were not carried out before. The results of the experiment, i.e. calculation of the filtration coefficient of the combined sand-gravel mixtures gives the possibility of their practical application in the design, construction, operation and reconstruction of hydraulic structures groundwater.

The article discusses some of the existing methods for determining the filtration coefficient of permeable soil. Analyzed the effectiveness and the applicability of each of the existing methods for determining the filtration properties of the combined sand-gravel mixture. To achieve this goal a laboratory method of determining the filtration properties using the device of Darcy as a method of giving the most accurate and reliable answers to questions. Further information on the history of the instrument, and given Darcy's linear law of filtration as the main functional dependence describing the filtration process. The design of the laboratory setup made description of structural nodes and elements, there is the technology of the experiment, and gives practical advice on planning and conducting such experiments.

Keywords: filtration coefficient, porosity, Darcy's method, combined mixture, crushed stone, sand.

REFERENCES

1. Gasanov, S. T., and F. O. Gabibov. "The Method Of Finding The Coefficient Of Filtration Of Schistose The Problem Of Finding The Coefficient Of Filtration In Schistose Ground." *Geotekhnika* 2 (2015): 10–15.
2. Kasperav, Heorhi, Viktor Levkevich, Siarhei Pastukhou, Mikhail Kukshinov, Aliaksandr Buzuk, Dmitry Mikanovich, and Valery Kabiak. "The technique of laboratory tests to determine the filtration coefficient of sandy soils to assess the safety in the operation of sludge storage tanks." *Herald of the University of Civil Protection of the MES of Belarus* 2(22) (2015): 68–72.
3. Levkevich, V. E., D. S. Mikanovich, and V. A. Cedik. "Metodika laboratornyh issledovanij po opredeleniju koeficienta filtracii peschanyh gruntov." *Sovremennye tehnologii obespechenija grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij* 1.1(6) (2015): 123–125.
4. Bezvolev, S. G. "Optimalnaja metodika opredelenija koeficientov filtracii i konso-lidacii glinistyh gruntov." *Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija* 4 (1991): 113–122.
5. Andreev, V. G., A. A. Slavjanskij, I. O. Voroshilo, and I. O. Voroshilo. "Faktozy, vlijajushhie na koeficient filtracii." *Sahar* 2 (2002): 47–49.
6. Russian Federation. State Standard 25584-90. Jelektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija koeficienta filtracii. M.: Izdatelstvo standartov, 1993.
7. Russian Federation. State Standard 5180-84. Jelektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fizicheskikh harakteristik. M.: Standartinform, 2005.
8. Vysotskiy, Lev Ilich. "Guidance for the use of formulas for Darcy coefficient calculating the distribution of averaged velocities." *Scientific Journal of Russian Research Institute of Land Improvement Problems* 4(16) (2014): 204–212.
9. Hasanov, M. K. *Jelementy teorii filtracii*. Ufa: Federalnoe agentstvo po obrazovaniju, Gos. obrazovatelnoe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovanija "Bashkirskij gos. un-t", 2008.
10. Gladkov, S. O. "O zakone Darsi v uslovijah sohraneniya jentalpii." *Technical Physics Letters* 28.20 (2002): 50–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнов-Туманов Ярослав Сергеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
istmeister@gmail.com
Панченко Наталья Михайловна —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smirnov-Tumanov Jaroslav Sergeevich —
postgraduate.
Supervisor:
Kolosov Mikhail Aleksandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
istmeister@gmail.com
Panchenko Natalia Mikhailovna — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_gsk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.