

В.А. ШАБАНОВ
Е.А. ПУПКОВ
Т.В. КАШИРИНА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF NON-STATIONARY FILTRATION IN SANDY SOILS

Приведены результаты исследования времени фильтрации через постоянную толщину песка при различных начальных напорах. Рассматриваются пять значений начальных напоров, каждый опыт проводился семь раз, повторяемость опытов три раза. Полученные результаты интерпретировались как отклики однофакторного пятиуровневого эксперимента. Для анализа данных использовались методы дисперсионного анализа. Показана нелинейная зависимость времени просачивания от начального напора. Результаты можно использовать при прогнозировании работы противофильтрационных устройств земляных плотин.

Ключевые слова: нестационарная фильтрация, планирование эксперимента, дисперсионный анализ, песчаные грунты.

Решение таких задач, как устойчивость земляных, бетонных и иных плотин, фильтрация из каналов, положение уровня грунтовых вод после постройки каналов, орошение и осушение почвы открытыми каналами, дренаж и т.д. невозможно без знания условий движения грунтового потока. Известны труды по исследованию фильтрационных потоков в различных средах, в различных сооружениях, при различных начальных и граничных условиях [1, 2].

Кроме знания движения фильтрационных потоков при проектировании грунтовых плотин и подобных сооружений, требуется исследование фильтрационной прочности грунтов тела плотин, что предусмотрено строительными нормами и правилами (Свод правил СП 39.13330.2012 «СНиП 2.06.05-84. Плотины из грунтовых материалов»). Пункт 9.5 норм требует: «Фильтрационную устойчивость тела плотины, а также противофильтрационных устройств оценивают на основе соответствующих расчетов и экспериментальных исследований грунтов при действующих в сооружении градиентах напора с учетом напряженно-деформированного состояния соору-

The paper presents the results of the research of filtration time through constant sand thickness at different entry pressures. Five values of entry pressures were considered, each experiment was performed seven times, and each test was repeated three times. The obtained results were interpreted as responses of one-factorial five-level experiment. For data analysis methods of the dispersive analysis were used. Nonlinear dependence of time of infiltration on an entry pressure is shown. The research results can be used when projecting anti-filtration devices of earth dams work.

Key Words: non-stationary filtration, experiment planning, dispersive analysis, sandy soil.

жения и его основания, особенностей конструкции, методов возведения и условий эксплуатации». При этом предлагается рассматривать **усредненные** значения градиентов.

Авторами выполнены теоретические исследования [3-4] и проведены эксперименты [5] по изучению процесса инфильтрации вязкой жидкости в пористую среду при переменном напоре.

В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния **переменных** градиентов на фильтрационные показатели песчаных грунтов.

Для исследования влияния переменного напора на фильтрационные характеристики песков была проведена серия опытов на экспериментальных стендах, внешний вид которых показан на рис. 1.

Экспериментальный стенд представляет собой монтажную площадку, имеющую пять отверстий для установки стеклянных трубок со шкалой для контроля уровня воды.

На днище стеклянной трубки (рис. 2) с внутренним диаметром 13 мм устанавливается мелкая

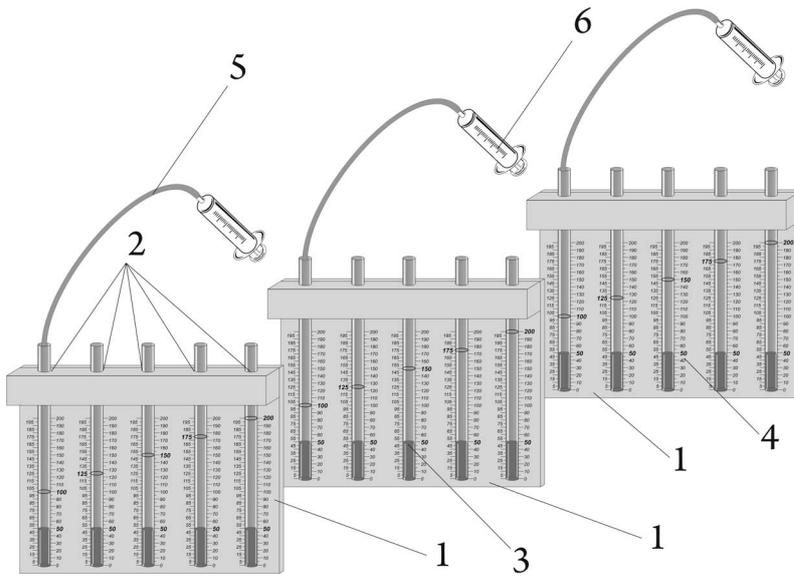


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – монтажная площадка; 2 – отверстия для установки трубок; 3 – стеклянная трубка с песком; 4 – шкала для контроля уровня воды; 5 – гибкий шланг для подачи воды в стеклянную трубку; 6 – шприц

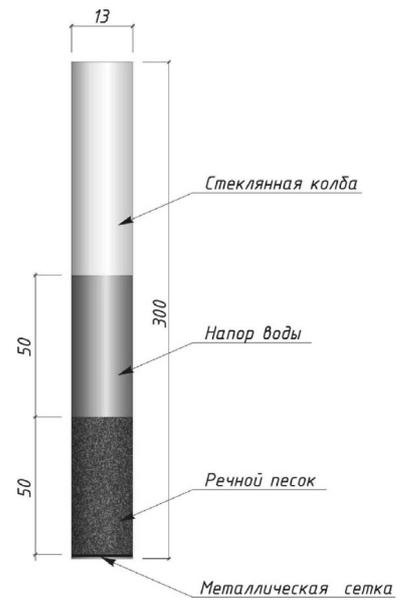


Рис. 2. Стеклянная трубка с песком

металлическая сетка, предотвращающая высыпание песка, уложенного и уплотненного потряхиванием и постукиванием на высоту 50 мм.

Эксперимент включал в себя проведение трех опытов, каждый из которых заключался в наполнении стеклянных трубок различным уровнем воды, градиенты которого представлены ниже:

Высота столба воды, мм	50	75	100	125	150
Градиент	1	1,5	2	2,5	3

С помощью шприца через гибкие трубки вода подавалась последовательно в каждую из пяти стеклянных трубок. Время заполнения водой изменялось незначительно и потому не учитывалось в дальнейшем. В качестве исследуемой величины выбрано время просачивания воды через песок. Опыты

проводились 7 раз на протяжении трех недель. Для повышения точности данных, последовательность выполнения опытов выбиралась произвольно с помощью генератора случайных чисел.

Для каждого из градиентов воды заполнялась таблица, включающая в себя номер опыта, номер экспериментального стенда, время просачивания воды и среднее время. Пример для случая наполнения стеклянной трубки на отметку 150 мм (уровень воды 100 мм) показан в табл. 1.

На основании имеющихся данных строилась графическая зависимость времени просачивания от номера опыта. Пример графика для табл. 1 представлен на рис. 3.

Для подтверждения гипотезы о принадлежности полученных данных к выборке из нормально

Таблица 1

Результаты замера времени просачивания воды через песок при высоте столба воды в трубке 100 мм

№ опыта	Время просачивания воды, с			Среднее время просачивания, с
	I стенд	II стенд	III стенд	
1	232	302	235	256
2	327	431	403	387
3	339	506	417	421
4	429	577	429	478
5	485	611	486	527
6	547	632	590	589
7	630	672	689	663

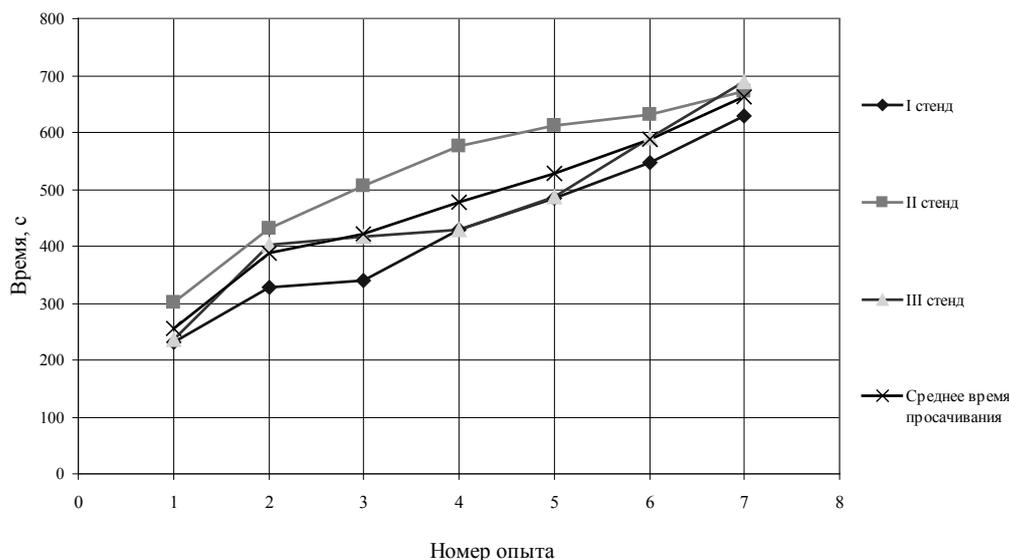


Рис. 3. График зависимости времени просачивания воды при высоте столба воды 100 мм

распределенной совокупности величин определялась величина студентизированного размаха R (разность между максимальными и минимальными значениями факторов в данном плане) по формуле

$$R = (X_{\max} - X_{\min})/S,$$

где X_{\max} – максимальное значение случайной величины; X_{\min} – минимальное значение случайной величины; S – стандартное выборочное отклонение.

Значения величины размаха для различных градиентов напора приведены ниже:

Градиент	1	1,5	2	2,5	3
R (размах)	2,74	2,86	3,01	2,85	2,77

Фактические данные размахов выборок лежат в пределах от 2,74 до 3,01 [18]. Сравнивая эти значения с критическими границами (табл. 72 [1]), видим, что полученные данные принадлежат диапазону $R=2,49-3,14$ при объеме выборки $n=7$, а вероятность ошибки – менее 0,1.

В каждом из трех опытов определяется дисперсия и проводится их сравнение с использованием F-критерия.

Результаты обработки данных представлены ниже:

Градиент H	50	75	100	125	150
Значение F	1,49	1,74	1,24	1,74	3,29

Вероятность ошибки P показана ниже:

Градиент H	50	75	100	125	150
Вероятность ошибки, P	0,201	0,160	0,251	0,164	0,063

Таким образом, сравнение дисперсий показало, что воспроизводимость высокая, все дисперсии (опыты) однородны и могут рассматриваться и обрабатываться совместно.

Дальнейшая обработка результатов заключалась в построении аппроксимирующих зависимостей времени просачивания воды от номера опыта.

Во всех опытах была подтверждена однородность дисперсий, что дает основание для совместной обработки полученных данных. Используя такой показатель, как студентизированный размах, сделан вывод о принадлежности данных экспериментов к нормально распределенной генеральной совокупности.

Основываясь на результатах опытов по изучению нестационарных фильтрационных процессов, проведенных другими исследователями, в качестве аппроксимирующей функции была выбрана логарифмическая функция. Были получены численные значения коэффициентов для каждого из градиентов, а также определены значения квадрата коэффициента корреляции – Пирсона. На рис. 4 представлен график зависимости среднего времени просачивания воды при начальном напоре 100 мм от номера опыта. Аналогичные графики получены и для остальных значений градиента.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что аппроксимация логарифмической кривой очень удачная, так как коэффициент корреляции Пирсона R^2 очень высокий: $R^2 > 0,95$.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что проведенный эксперимент

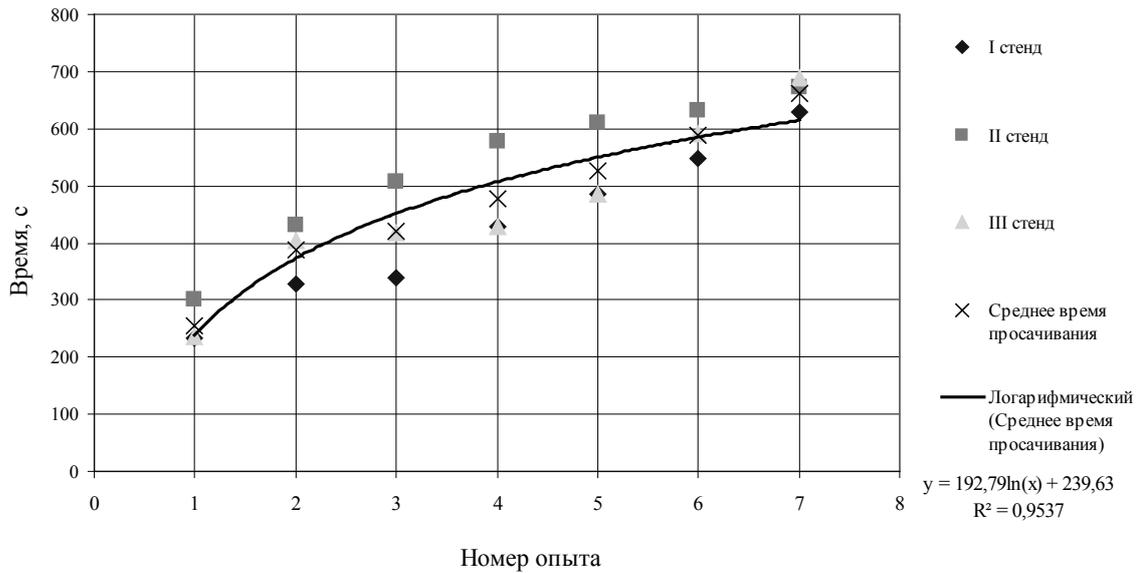


Рис. 4. Аппроксимация зависимости среднего времени просачивания воды при начальном напоре 100 мм

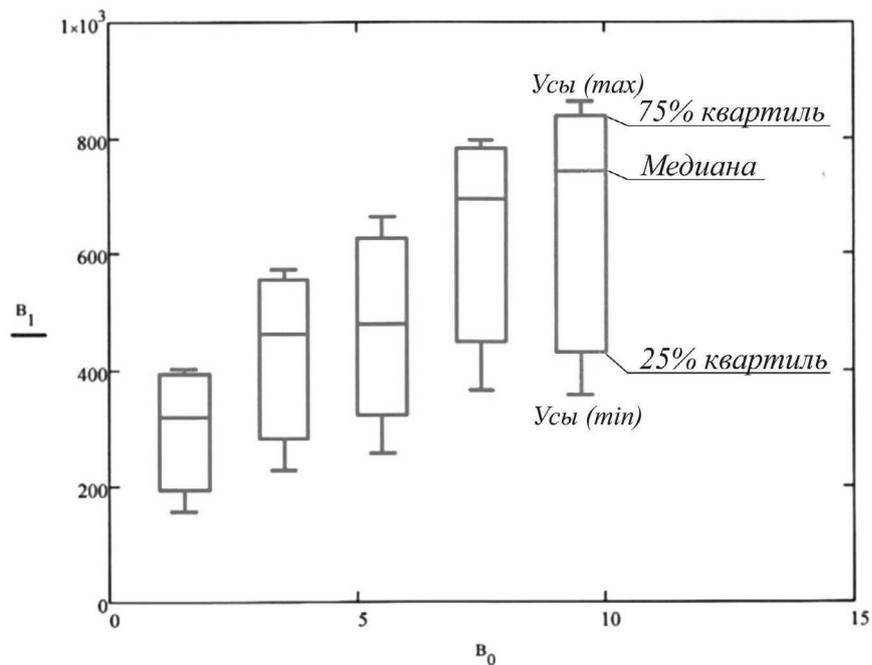


Рис. 5. Зависимость времени от градиента «Ящик с усами»

есть однофакторный семиуровневый эксперимент, а следовательно, можно воспользоваться методами дисперсионного анализа данных, реализованными в системе Mathcad-15, с использованием программы Anova-1.

Используя функцию Boxplot, была построена зависимость «Ящик с усами» (рис. 5) [7]. На нем явно видна зависимость времени от градиента.

Результаты дисперсионного анализа результатов эксперимента приведены ниже:

$$A = \begin{pmatrix} \text{"Source"} & \text{"SSE"} & \text{"DF"} & \text{"MSE"} & \text{"F"} & \text{"P"} \\ \text{"A"} & 6.182 \times 10^5 & 4 & 1.545 \times 10^5 & 7.947 & 1.57 \times 10^{-4} \\ \text{"Error"} & 5.834 \times 10^5 & 30 & 1.945 \times 10^4 & \text{NaN} & \text{NaN} \\ \text{"Total"} & 1.202 \times 10^6 & 34 & \text{NaN} & \text{NaN} & \text{NaN} \end{pmatrix}$$

Здесь «Source» – название каждого источника отчета; «A» – давление; «Error» – ошибка, зависящая от давления; «Total» – общее; «SSE» – сумма квадратов между группами для каждого фактора; «DF» – число

степеней свободы; «MSE» – отношение средних квадратов к числу степеней свободы; «F» – отношение среднего квадрата к ошибке; «P» – вероятности отказа от взаимодействия факторов или блокирование на основе его статистики.

Из матрицы А видно, что ошибка, объясняемая зависимостью отклика, равная $1,545 \times 10^5$ и объясняемая влиянием А, на порядок больше, чем остаточная ошибка «Еггог» $1,945 \times 10^4$.

Анализируя рис. 5, можно предположить, что зависимость между напором и временем просачивания нелинейная. Мы аппроксимировали опытные данные полиномом 2-й степени. Коэффициент корреляции между экспериментальными данными и расчетными оказался равным $R^2=0.98$.

Вывод. Экспериментально доказана нелинейная зависимость времени просачивания конечного объема воды от градиента напора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1978. 244 с.
2. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в природной среде. М.-Л.: Гостехпрофиздат, 1947. 244 с.

Об авторах:

ШАБАНОВ Всеволод Александрович

кандидат технических наук, профессор кафедры природоохранного и гидротехнического строительства, член-корреспондент Российской Академии наук Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (846) 242-21-71

ПУПКОВ Евгений Александрович

ассистент кафедры космического машиностроения Самарский государственный аэрокосмический университет
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, тел. (846) 335-18-26
E-mail: zuce@mail.ru

КАШИРИНА Татьяна Владимировна

магистр кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: t.cashirina2013@yandex.ru

3. Шабанов В.А. Проникновение конечного объема жидкости в пористую среду // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы 63-й Всероссийской науч.-техн. конф. по итогам НИР / СГАСУ; под ред. Н.Г. Чумаченко. Самара, 2006. С. 292-293.

4. Шабанов В.А. Проникновение вязкой жидкости в грунт при её проливе на поверхность // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы 64-й Всероссийской науч.-техн. конф. по итогам НИР / СГАСУ. Самара, 2007. С. 361.

5. Шабанов В.А., Михасек А.А. Экспериментальное исследование проникновения вязкой жидкости в пористую среду // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 11-12. С. 29-32.

6. Закс Л. Статистическое оценивание/ пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. М.: Статистика, 1976. 598 с.

7. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ / пер. с англ. А.Ф. Кушнира, А.Л. Петросяна, Е.Л. Резникова; под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1981. 692 с.

© Шабанов В.А., Пупков Е.А.,
Каширина Т.В., 2015

SHABANOV Vsevolod

PhD in Engineering Science, Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering, Chair Corresponding member of the Russian Academy of architecture and construction sciences Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (846) 242-21-71

PUPKOV Evgeniy

assistant of the space mechanical engineering department Samara State Aerospace University 443086, Russia, Samara, Moskovskoye shosse, 34, tel. (846) 335-18-26
E-mail: zuce@mail.ru

CASHIRINA Tatyana

magister of the Environmental and Hydraulic Engineering Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: t.cashirina2013@yandex.ru

Для цитирования: Шабанов В.А., Пупков Е.А., Каширина Т.В. Экспериментальное исследование нестационарной фильтрации в песчаных грунтах // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. №3 (20). С. 82-86.

For citation: Shabanov V.A., Pupkov E.A., Cashirina T.V. Experimental analysis of non-stationary filtration in sandy soils // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arhitektura [Vestnik of SSUACE.Town Planning and Architecture]. 2015. № 3 (20). Pp. 82-86.